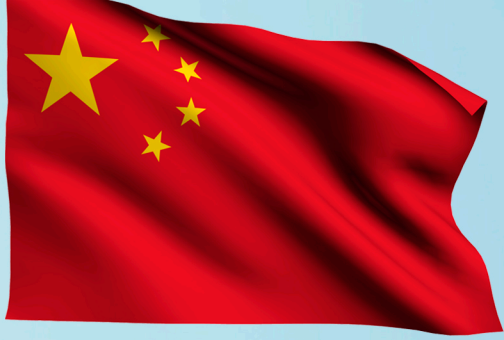




Российско-Китайская Конференция

Russian-Chinese Conference



МЕТАЛЛОГЕНИЯ БЕЗ ГРАНИЦ 2025

METALLOGENY WITHOUT BORDERS 2025

Сборник тезисов докладов

Proceedings of The Conference

Научное электронное издание

Scientific Electronic Publication

11-17 августа 2025 г., Россия, г. Чита

August 11-17, 2025, Russia, Chita

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ПРОБЛЕМАМ РУДООБРАЗОВАНИЯ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПЕТРОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИГЕМ РАН)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ЗабГУ)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОЛОГИИ И КРИОЛОГИИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИПРЭК СО РАН)

КИТАЙСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ КОРПОРАЦИЯ

КИТАЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ПЕКИНСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ УРАНОВОЙ ГЕОЛОГИИ

ВОСТОЧНО-КИТАЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ТЯНЬЦЗИНЬ, ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА КИТАЯ

ЦЗИЛИНЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КИТАЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОНАУК (ПЕКИН)

МЕТАЛЛОГЕНИЯ БЕЗ ГРАНИЦ 2025

Российско-Китайская конференция

Чита, 11 – 17 августа 2025 г.

Тезисы докладов

Москва
2025

УДК 553+552+548/549+550.4+550.3+502/504+550.93
ББК 26.3
М54

МЕТАЛЛОГЕНИЯ БЕЗ ГРАНИЦ 2025: Российско-Китайская конференция, Чита, 11 – 17 августа 2025 г. Тезисы докладов [Электронный ресурс] – Электрон. дан. (1 файл: 29,7 Мб) – М.: ИГЕМ РАН, 2025.

В сборнике представлены тезисы докладов Российско-Китайской конференции «Металлогения без границ 2025». Доклады посвящены результатам изучения, сравнительного анализа и разработки геолого-поисковых моделей месторождений благородных, цветных, редких и редкоземельных металлов в пределах трансграничных территорий Российской Федерации и Китайской Народной Республики в целях регионального и локального прогноза, поисков, разведки и разработки рудных объектов.

Редакторы: В. А. Петров, С. А. Устинов, А. С. Гусева, Д. С. Лапаев, А. А. Андреев, А. Д. Свечеревский

Дизайн обложки – С. А. Устинов, А. А. Андреев

ISBN 978-5-88918-080-7

© Коллектив авторов, 2025
© ИГЕМ РАН, 2025

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES
SCIENTIFIC COUNCIL OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES ON ORE FORMATION PROBLEMS

Federal State Budgetary Institution of Science
INSTITUTE OF GEOLOGY OF ORE DEPOSITS, PETROGRAPHY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (IGEM RAS)

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
TRANSBAIKAL STATE UNIVERSITY (TSU)

Federal State Budgetary Institution of Science
INSTITUTE OF NATURAL RESOURCES, ECOLOGY AND CRYOLOGY OF THE SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (IPREC SB RAS)

CHINA NATIONAL NUCLEAR CORPORATION (CNNC)

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES (CAS)

BEIJING RESEARCH INSTITUTE OF URANIUM GEOLOGY (BRIUG)

EAST CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (ECUT)

TIANJIN GEOLOGICAL SURVEY CENTER, CHINA GEOLOGICAL SURVEY (CGS)

JILIN UNIVERSITY (JU）

CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCE (CUG)

METALLOGENY WITHOUT BORDERS 2025

Russian-Chinese Conference

Chita, 11 – 17 August 2025

Proceedings of The Conference

Moscow
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ / CONTENTS

Роль коровой контаминации в формировании юрских вулканитов Хада-Булакской депрессии (Борзинский район, Юго-Восточное Забайкалье)
Андреев А.А., Андреева И.А., Устинов С.А., Лапаев Д.С., Свечеревский А.Д..... 14

The role of crustal contamination in the formation of Jurassic volcanics of the Khada-Bulak depression (Borzinsky district, South-Eastern Transbaikalia)
Andreev A.A., Andreeva I.A., Ustinov S.A., Lapaev D.S., Svecherevskiy A.D. 17

Геохимия руд на основе рудной залежи Озерного колчеданно-полиметаллического месторождения
Бадмажапов Б.Б, Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б., Викентьев И.В., Минина О.Р. 20

Geochemistry of ores based on the ore deposit of the Ozernoye pyrite-polymetallic deposit
Badmazhapov B.B., Damdinov B.B., Damdinova L.B., Vikentyev I.V., Minina O.R. 25

Вопросы минерагении и геодинамической позиции интрузивных массивов, ширяевского типа мамонского комплекса (Хоперский блок)
Белых К.В. 30

Minerageny and Geodynamic Position of the Shiryaev-Type Intrusive Massifs of the Mamonsky Complex (Khoper Block)
Belykh K.V. 31

Геолого-геохимические особенности месторождения рения и редких металлов в вулканических газах месторождения «Вулкан Кудрявый» (о. Итуруп, Курильский район Сахалинской области)
Вольфсон А.А., Марченко А.Г., Штейнберг М.Г., Коробов М.Л. 32

Geological and Geochemical Features of the Rhenium and Rare Metal Deposit in Volcanic Gases of the "Kudryavy Volcano" Deposit (Iturup Island, Kuril Region, Sakhalin Oblast)
Volfson A.A., Marchenko A.G., Steinberg M.G., Korobov M.L..... 37

Научно-методические основы экологической оценки территорий геологического риска
Вольфсон И.Ф. 41

Scientific and Methodological Foundations of Environmental Assessment of Geological risk areas
Volfson I.F..... 45

Презентация Путеводителя «Месторождения севера Забайкальского края»
Гонгальский Б.И., Криволуцкая Н.А. 49

Presentation of the Guidebook "Mineral Deposits of Northern Transbaikalia"
Gongalsky B.I., Krivolutskaya N.A. 53

Прогноз и методика поисков скрытых месторождений урана в Стрельцовской кальдере (Забайкальский край)
Гребенкин Н.А., Тубольцев И.С., Мельников С.И., Несмеянова А.И., Сорокин А.Г., Масло М.Ю., Машнин Д.М..... 57

Forecast and Methodology for the Exploration of Hidden Uranium Deposits in the Streltsovka Caldera (Zabaykalsky Krai)
Grebenkin N.A., Tuboltsev I.S., Melnikov S.I., Nesmeyanova A.I., Sorokin A.G., Maslo M.Yu., Mashnin D.M. 61

Трансграничная корреляция редкометалльного магматизма Коктогайского рудного района (Китай) и Алахинского рудного узла (Россия)
Гусев Н.И, Коваленко Е.В., Скублов С.Г 65

Transboundary correlation of rare metal magmatism of the Koktokay ore district (China) and the Alakha ore cluster (Russia) in the Greater Altai
Gusev N.I., Kovalenko E.V., Skublov S.G. 69

Метасоматическая зональность как фактор прогноза золото-медно-молибденового оруденения в пределах Шахтаминского рудного узла
Груздев Р.В., Юргенсон Г.А. 73

Metasomatic Zoning as a Predictive Factor for Gold–Copper–Molybdenum Mineralization within the Shakhtama Ore Cluster
Gruzdev R.V., Yurgenson G.A. 78

Рудная гидрогеохимическая аномалия в зоне загрязнения подземных вод Читинской ТЭЦ-1
Замана Л.В., Усманова Л.И. 82

Ore-Related Hydrogeochemical Anomaly in the Contamination Zone of Groundwater near Chita CHP-1
Zamana L.V., Usmanova L.I. 86

Геодинамические обстановки формирования фанерозойских магматических комплексов Аргунского блока (ЮВ Забайкалье, Китай, Монголия)
Кайгородова Е.Н., Андреева О.В., Козловский А.М., Петров В.А. 90

Geodynamic Settings of the Formation of Phanerozoic Magmatic Complexes of the Argun Block (SE Transbaikalia, China, Mongolia)
Kaygorodova E.N., Andreeva O.V., Kozlovsky A.M., Petrov V.A. 94

Ключевые характеристики Mo-, Mo-Cu - порфировых и Cu-Au-Fe скарново-порфировых месторождений Восточного Забайкалья как атрибуты концептуальной генетической модели постколлизионных минеральных систем
Коваленкер В.А., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Абрамов С.С., Доломанова-Тополь А., Языкова Ю.И. 98

Key Characteristics of Mo-, Mo-Cu Porphyry and Cu-Au-Fe Skarn-Porphyry Deposits of Eastern Transbaikalia as Attributes of a Conceptual Genetic Model for Post-Collisional Mineral Systems
Kovalenker V.A., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Abramov S.S., Dolomanova-Topol A., Yazykova Yu.I. 103

Тектоническая позиция урановых месторождений Хиагдинского рудного поля
Кочкин Б.Т., Петров В.А., Голубев В.Н. 108

Tectonic Position of Uranium Deposits in the Khiagda Ore Field
Kochkin B.T., Petrov V.A., Golubev V.N. 112

Геохимия и возраст магматических пород Арсеньевского и Высокогорского оловорудных месторождений (Сихотэ-Алинь)
Крук Н.Н., Гаврюшкина О.А., Крук Е.А., Федосеев Д.Г., Орехов А.А., Смирнов С.З., Семенова Д.В., Травин А.В., Касаткин С.А. 115

Geochemistry and Age of Magmatic Rocks from the Arsenyev and Vysokogorskoe Tin Deposits (Sikhote-Alin)
Kruk N.N., Gavryushkina O.A., Kruk E.A., Fedoseev D.G., Orekhov A.A., Smirnov S.Z., Semenova D.V., Travin A.V., Kasatkin S.A. 119

Мезопротерозойский пикрит-пикробазальтовый вулканизм Енисейского кряжа: петрогеохимия, метаморфизм и Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd систематика
Лиханов И.И., Козлов П.С., Ножкин А.Д., Ронкин Ю.Л. 122

Mesoproterozoic Picrite-Picrobasaltic Volcanism of the Yenisey Ridge: Petrogeochemistry, Metamorphism, and Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd Systematics
Likhanov I.I., Kozlov P.S., Nozhkin A.D., Ronkin Yu.L. 126

Дистанционный тектонофизический подход к прогнозу размещения полезных ископаемых (на примере Северной Якутии)
Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О. 129

Remote Tectonophysical Approach to Forecasting the distribution of Mineral Resources (Case Study: Northern Yakutia)
Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Nafigin I.O. 133

Возраст, состав и условия формирования рудоносных толщ колчеданно-полиметаллического Озерного месторождения (Западное Забайкалье)
Минина О.Р., Викентьев И.В., Дамдинов Б.Б., Бадмажапов Б.Б. Ланцева В.С. 136

Age, Composition, and Formation Conditions of Ore-Bearing strata of the pyrite-polymetallic Ozernoe Deposit (Western Transbaikalia)
Minina O.R., Vikentyev I.V., Damdinov B.B., Badmazhapov B.B., Lantseva V.S. 140

Анализ спутниковых данных ДЗЗ для прогноза полиметаллической минерализации в пределах Савва-Борзинского рудного узла (юго-восточное Забайкалье)
Нафигин И.О., Лапаев Д.С., Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А. 143

Analysis of remote sensing satellite data for forecasting polymetallic mineralization within the Savva-Borzinsky ore cluster (southeastern Transbaikalia)
Nafigin I.O., Lapaev D.S., Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A. 146

Рудопроявление «Никелевый ручей» Волчьетундровского габбро-анортозитового массива (Кольский полуостров, Мончегорский рудный район)
Орсоев Д.А., Веливецкая Т.А., Хромова Е.А., Высоцкий С.В., Чащин В.В. 149

«Nickel Stream» Mineral Occurrence of the Volchyetundrovsky Gabbro-Anorthosite Massif (Kola Peninsula, Monchegorsk Ore District)
Orsoev D.A., Velivetskaya T.A., Khromova E.A., Vysotsky S.V., Chashchin V.V. 154

Рудоконтролирующие структуры Восточной Сибири
Павленко Ю.В. 158

Ore-Controlling Structures of Eastern Siberia

Pavlenko Yu.V. 163

Фанерозойские магматические комплексы и металлогения Аргунского блока (ЮВ Забайкалье, Китай, Монголия)
Петров В.А., Андреева О.В., Кайгородова Е.Н., Козловский А.М. 167

Phanerozoic Magmatic Complexes and Metallogeny of the Erguna Block (SE Transbaikalia, China, Mongolia)
Petrov V.A., Andreeva O.V., Kaigorodova E.N., Kozlovsky A.M. 172

Опыт визуализации временных металлогенических рядов (на примере ЮВ Забайкалья)
Петров В.А., Устинов С.А., Минаев В.А., Нафигин И.О., Гришков Г.А. 176

Experience in Visualizing Temporal Metallogenic Series (Case Study: Southeastern Transbaikalia)
Petrov V.A., Ustinov S.A., Minaev V.A., Nafigin I.O., Grishkov G.A. 180

К вопросу о вертикальном и временном диапазоне эндогенного рудообразования (на примере минералообразующих систем урановых месторождений)
Петров В.А., Пэк А.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Мальковский В.И., ... 184

On the Vertical and Temporal Range of Endogenous Ore Formation (Case Study of Mineral-Forming Systems of Uranium Deposits)
Petrov V.A., Pek A.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V., Malkovsky V.I., Ustinov S.A., ... 187

Минерально-деформационные преобразования пород и механизмы миграции урана на месторождениях в фундаменте и чехле Стрельцовской кальдеры (ЮВ Забайкалье)
Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В., Минаев В.А., Устинов С.А. 190

Mineral-Deformation Transformations of Rocks and Uranium Migration Mechanisms at Deposits in the Basement and Cover of the Streltsovka Caldera (SE Transbaikalia)
Poluektov V.V., Petrov V.A., Andreeva O.V., Minaev V.A., Ustinov S.A. 194

Урановые компоненты в подземных водах Северо-Восточного Китая, Монголии и Читинского Забайкалья
Рассказов С.В.ʾ, Чебыкин Е.П.ʾ, Дэмбэрэл С., Батсайхан Ц. , Сунь Йи-минь, Ильясова А.М. , Замана Л.В., Оргильянов А.И., Саньков В.А.ʾ 198

Uranium Components in Groundwater of Northeastern China, Mongolia, and Chita Transbaikalia
Rasskazov S.V.ʾ, Chebykin E.P.ʾ, Demberel S., Batsaikhan Ts., Sun Yi-Min, Ilyasova A.M., Zamana L.V., Orgilyanov A.I., Sankov V.A.ʾ 202

Реконструкция кинематики разрывных структур с использованием авторского программного комплекса Lineament Stress Calculator в контексте прогноза рудообразующих систем
Свечеревский А.Д., Устинов С.А., Минаев В.А., Лапаев Д.С., Петров В.А. 206

Reconstruction of Fault Structure Kinematics Using the Custom Software Suite «Lineament Stress Calculator» in the Context of Ore-Forming System Forecasting
Svecherevskiy A.D., Ustinov S.A., Minaev V.A., Lapaev D.S., Petrov V.A. 209

Модель рудообразования палеодолинных месторождений витимского типа (Республика Бурятия)

Солодов И.Н., Нестерова М.В. 212

Ore-Formation Model for Paleovalley Deposits of the Vitim Type (Republic of Buryatia)
Solodov I.N., Nesterova M.V. 215

Цаган-хунтейский трахириолит - трахибазальтовый комплекс Цаган-Хуртейской впадины Северо-Монгольской - Западно-Забайкальской рифтовой зоны: новые геохронологические, геохимические и изотопно-геохимические данные
Стриха В.Е., Гольцин Н.А., Юрченко Ю.Ю. 218

Tsagan-Khuntei Trachyriolitoid–Trachybasalt Complex of the Tsagan-Khurtei Depression, North Mongolian–Western Transbaikalian Rift Zone: New Geochronological, Geochemical, and Isotope-Geochemical Data
Strikha V.E., Goltsin N.A., Yurchenko Yu.Yu. 222

Прогнозно-поисковая модель Стрельцовского урановорудного поля на основе реконструкции этапов формирования и флюидопроницаемости каркаса разрывных нарушений
Тубольцев И.С., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А. 226

Predictive and Exploratory Model of the Streltsovsk Uranium Ore Field Based on Reconstruction of Deformation Stages and Fracture Permeability Framework
Tuboltsev I.S., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A. 230

Реконструкция параметров сдвиговых тектонических напряжений западной части Байкало-Патомского пояса на основе структурно-геоморфологического подхода в контексте прогноза рудообразующих систем
Устинов С.А., Петров В.А., Андреев А.А., Свечеревский А.Д., Кочкин И.А., Чепчугов А.М. 233

Reconstruction of Shear Tectonic Stress Parameters in the Western Part of the Baikal–Patom Belt Based on a Structural–Geomorphological Approach in the Context of Ore-Forming System Forecasting
Ustinov S.A., Petrov V.A., Andreev A.A., Svecherevskiy A.D., Kochkin I.A., Chepchugov A.M. 237

Интерпретация линеаментов в пределах юго-восточного Забайкалья с применением мультимасштабного тектонофизического подхода для прогноза урановых рудообразующих систем
Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Андреев А.А., Нафигин И.О., Свечеревский А.Д., Лапаев Д.С. 240

Interpretation of Lineaments in Southeastern Transbaikalia Using a Multiscale Tectonophysical Approach for the Prediction of Uranium Ore-Forming Systems
Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Andreev A.A., Nafigin I.O., Svecherevskiy A.D., Lapaev D.S. 244

Дешифрирование и интерпретация структур центрального типа с использованием данных дистанционного зондирования Земли для прогнозного картирования рудообразующих систем на примере юго-восточного Забайкалья
Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Нафигин И.О., Яровая Е.В. 247

Decoding and Interpretation of Central-Type Structures Using Remote Sensing Data for Forecasting Mapping of Ore-Forming Systems: A Case Study from Southeastern Transbaikalia
Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Nafigin I.O., Yarovaya E.V. 251

Возможности выделения площадей, перспективных на обнаружение месторождений рудных полезных ископаемых, на основе геофизического изучения палеосистем тепломассопереноса
Тихоцкий С.А., Черкасов С.В. 254

Prospects for Identifying Areas Favorable for the Discovery of Ore Deposits Based on Geophysical Studies of Paleosystems of Heat and Mass Transfer
Tikhotsky S.A., Cherkasov S.V. 257

Металлогеническая модель благородного оруденения фанерозоя Северного Кавказа
Черкашин В.И., Рябов Г.В., Исаева Н.А. 259

Metallogenic Model of Phanerozoic Noble Metal Mineralization in the North Caucasus
Cherkashin V.I., Ryabov G.V., Isaeva N.A. 263

Гидрогенный уран в источниках коромантийного перехода вулканических пород позднего мезозоя и кайнозоя Азии
Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А. 267

Hydrogenic Uranium in Sources of the Crust-Mantle Transition of Late Mesozoic and Cenozoic Volcanic Rocks in Asia
Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A. 271

Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений в Забайкалье
Шумилова Л.В., Юргенсон Г.А 275

Geoecological Issues of Ore Deposit Exploitation in Transbaikalia
Shumilova L.V., Yurgenson G.A. 280

Состав и свойства жильного кварца Верхнеалиинского месторождения как критерии вертикальной зональности рудоносных зон
Юргенсон Г.А 284

Composition and properties of vein quartz at the Verkhnealiinskoye deposit as indicators of vertical zoning in ore-bearing zones
Yurgenson G.A. 288

Neotectonic Controls on Large-Scale Uranium Mineralization in the Meso-Cenozioc Basins, Northern China
Cheng Yinhang, Jin Ruoshi, Miao Peisen 292

Неотектонический контроль крупномасштабной ураноносности в мезо-кайнозойских впадинах Северного Китая
Чэн Иньхан, Цзинь Жоши, Мяо Пэйсэн 293

Exudative Mineralization of Sandstone-type Uranium Deposits in the Lower Cretaceous of the Ordos Basin
Feng He., Ziying Li, Zilong Zhang 294

Экссудативная минерализация урановых месторождений в песчаниках нижнемеловых отложений Ордосского бассейна
Фэн Хэ, Цзыин Ли, Цзилун Чжан 297

In-situ SIMS U-Pb dating and oxygen isotope study of cassiterite from polymetallic mineralization in Xiangshan uranium ore field
GUO Jian, HE Sheng 301

U-Pb датирование методом SIMS и исследование изотопов кислорода касситерита из полиметаллической минерализации уранового рудного месторождения Сяншань
Го Цзянь, Хэ Шэн 303

A new exudation Metallogeny and model for uranium deposit in the red-mottled sedimentary sandstone system in northern basins of China
LI Ziying, QIN Mingkuan, QIU Linfei, TIAN Mingming, HE Feng, ZHOING Jun, LIU Wusheng, LIU Chiheng, WANG Junxian, ZHANG Yunlong, WANG Wenquan, JI Hongwei, HAN Meizhi, LI Weitao, LI Menghua 305

Новая модель уранонакопления за счёт глубинных флюидов в красноцветной пятнистой толще песчаников в северных впадинах Китая
Ли Цзыин, Цинь Минькуань, Цю Линьфэй, Тянь Минмин, Хэ Фэн, Чжун Цзюнь, Лю Ушэн, Лю Чжихэн, Ван Цзюньсянь, Чжан Юньлун, Ван Вэньцюань, Цзи Хунвэй, Хань Мэйчжи, Ли Вэйтао, Ли Мэнхуа 308

Research on Polymetallic Mineralization Mechanisms in Xiangshan Uranium Deposit Field
Junang LIU, Ziying LI, Jiangtao NIE 311

Исследование механизмов полиметаллической минерализации в уранорудном районе Сяншань
Лю Цзюнань, Ли Цзыин, Не Цзянтао 313

New progress in deep drilling of uranium science in China and Enlightenment for deep ore searching
Nie Jiangtao, Li Ziying, Guo Jian, Liu Jungang, Tian Mingming, Lai Hainan 316

Новые достижения в области глубокого научного бурения урана в Китае и выводы для глубокого прогнозирования рудных объектов
Не Цзянтао, Ли Цзыин, Го Цзянь, Лю Цзюньган, Тянь Минмин, Лай Хайнань 318

Petrogenesis and Sc Mineralization Potential of the Early Silurian Halaguole Alaskan-Type Complex in the East Kunlun Orogenic Belt
Lingyun Sun, Ye Qian 320

Петрогенезис и потенциал скандиевой минерализации раннесилурийского комплекса аляскинского типа Халаголо в Восточно-Куньлуньском орогене
Сун Линъюнь, Е Цянь 324

Comprehensive prediction technology and application of sandstone-type uranium deposits in Songliao Basin, Northeastern China
Mingkuan Qin, Qiang Guo, Shaohua Huang, Jing Xiao, Jiye Song, Licheng Jia, Jialin Liu, Wenjian Jiang 328

Комплексная технология прогноза и её применение к песчаниковым урановым месторождениям в пределах Сунляоского бассейна, Северо-Восточный Китай
Минькуань Цинь, Цянь Го, Шаохуа Хуан, Цзин Сяо, Цзие Сун, Личэн Цзя, Цзялинь Лю, Вэньцзянь Цзян; 330

Hydrocarbon Accumulations of Magmatic Rock in China
Shan Xuanlong, Yi Jian, Li Ang 332

Нефтегазовые скопления магматических пород Китая
Шань Сюаньлун, И Цзянь, Ли Анг 333

Sandstone-type uranium mineralization in southwest area of Qaidam Basin, NW China
Teng Xueming[1], Ao Cong[1], Wang Shaoyi[1], Jin Ruoshi[1], Cheng Yinhang[1] 334

Песчаниковая урановая минерализация в юго-западной части Чайдамского бассейна, Северо-Западный Китай
Тэн Сюэмин[1], Ао Цун[1], Ван Шаои[1], Цзинь Жоуши[1], Чэн Иньхан[1] 337

Characteristics and implications of uranium-beryllium mineralization of the Baiyanghe Deposit in the Xuemistan Volcanic Belt, Xinjiang
Tian Jianji[2], Liu Chang[2], Wu Yu, Yang Wenlong, Yi Longsheng[2] 340

Характеристика и значение ураново-бериллиевой минерализации месторождения Байянхэ в вулканическом поясе Сюэмистан (Синьцзян)
Тянь Цзяньцзи[2], Лю Чан[2], У Юй, Ян Вэньлун, И Луншэн[2] 343

Genesis of the Haidewula volcanic rock-hosted uranium deposit in the East Kunlun Orogen, northwestern China
Kai-Xing Wang[1]; Xiao-Dong, Liu[1]; Fei Xia[1] 345

Генезис ураносодержащего месторождения Хайдевула, приуроченного к вулканическим породам, в Восточном Куньлуньском орогене, северо-западный Китай
Ван Кайсин[1], Лю Сяодун[1], Сяо Фэй[1] 347

Uranium Isotope Study of Sandstone-type Uranium Deposits in the Junggar Basin
Wang Shaoyi[1], Teng Xueming[1], Ao Cong[1], Cheng Yinhang[1], Jin Ruoshi[1] 349

Изотопное исследование урана в песчаниковых месторождениях урана бассейна Джунгар
Ван Шаои[1], Тэн Сюэмин[1], Ао Цун[1], Чэн Иньхан[1], Цзинь Жоуши[1] 350

Investigation of Uranium Mineralogy and Enrichment Mechanisms in Sandstone-Type Uranium Deposits
Xia Fei, Zhang Chengyong, Nie Fengjun, Li Ziying, Liu Xiaodong, Wang Kaixing, Yan Zhaobin, Guo Jiang, Zhang Hujun, Zhang Haohao, Zhang Xin, Deng Wei, Zhang Qunxi, Liu Xu 351

Исследование минералогии урана и механизмов его обогащения в песчаниковых урановых месторождениях
Ся Фэй, Чжан Чэнюн, Не Фэнцзюнь, Ли Цзыин, Лю Сяодун, Ван Кайсин, Янь Чжаобин, Го Цзян, Чжан Хуцзюнь, Чжан Хаохао, Чжан Синь, Дэн Вэй, Чжан Цюньси, Лю Сюй..... 354

Geochemistry and Uranium Mineralization in Cretaceous Eolian Red Sandstone in the Southwestern Ordos Basin, China

Yi Longsheng, Lin Jinrong, Li Ziying, He Feng, Wu Zhengqian, Liu Kunpeng, Qiu Linfei, Wang Junxian, Li Xide 357

Геохимия и урановая минерализация в красных эоловых песчаниках мелового возраста на юго-западе бассейна Ордос, Китай

И. Луншэн, Линь Цзинжун, Ли Цзыин, Хэ Фэн, У Чжэнцянь, Лю Кунпэн, Цю Линьфэй, Ван Цзюньсянь, Ли Сидэ 361

Advances in Mineralization Information Extraction and Application of Sandstone-Type Uranium Deposits

Yu Rengan, Zhu Qiang, Si Qinghong, Wang Shanbo, Zhao Hualei, Chen Lulu 365

Достижения в извлечении и применении информации о минерализации в песчаниковых урановых месторождениях

Ю Жэнган, Чжу Цян, Сы Цинхун, Ван Шаньбо, Чжао Хуалэй, Чэнь Лулу 367

The Geology, Geochemistry and the Metallogenic Rules of the Alkaline Metasomatism Uranium Deposits: A Review

Zhong J., Li Z.Y., Cai Y.Q., Yu H. 369

Геология, геохимия и закономерности рудообразования урановых месторождений, связанных с щелочным метасоматозом: обзор

Чжун Цзюнь, Ли Цзыин, Цай Юйцюань, Юй Хао 372

The Latest Regional Mineralization for Sandstone Type Uranium Deposits in Central Asia: Constrained by the U-Ra Equilibrium Coefficients

Zhu Bin, He Feng, Liu Chiheng 376

Новейший этап региональной минерализации урановых месторождений песчаникового типа в Центральной Азии: по данным коэффициента равновесия U–Ra

Чжу Бинь, Хэ Фэн, Лю Чжихэн 379

Роль коровой контаминации в формировании юрских вулканитов Хада-Булакской депрессии (Борзинский район, Юго-Восточное Забайкалье)

Андреев А.А., Андреева И.А., Устинов С.А., Лапаев Д.С., Свечеревский А.Д
ИГЕМ РАН, axel-foley@yandex.ru

В пределах Юго-Восточного Забайкалья в позднемезозойское время широко проявилась магматическая активность, которая привела к формированию разнообразных месторождений и рудопроявлений полезных ископаемых. Яркими представителями позднемезозойского этапа являются вулканиты приаргунской, шадоронской и мулинской серий, прорванные гранитоидами шахтаминского и кукульбейского комплексов. В связи с этим важной задачей является определение состава, условий образования и процессов, ответственных за формирование расплавов данных магматических серий.

Тектоническая позиция рассматриваемой части Юго-Восточного Забайкалья определяется двумя крупными структурами – Ононским блоком Агинского сегмента Монголо-Охотского пояса (МОП) и Аргунским террейном, граничащими на севере с Сибирским континентом по Монголо-Охотскому разлому. Средне-верхнеюрские вулканиты локализованы преимущественно в пределах Аргунского террейна, но в незначительном объеме проявлены и в Агинском сегменте МОП. На основании различия строения разрезов и состава вулканогенных отложений, средне-позднеюрские вулканиты объединены в три стратиграфические серии: шадоронскую, мулинскую и приаргунскую (Шивохин и др., 2010).

Объектом наших исследований являются вулканиты шадоронской серии Хада-Булакской депрессионной структуры, расположенной в 25 км к северу от г. Борзя. На рассматриваемой территории разрез представлен преимущественно вулканогенными образованиями, которые несогласно залегают на терригенно-карбонатных отложениях борзинской серии и представлены рядом пород от трахиандезибазальтов до риодацитов. В центральной части структуры юрские вулканиты прорваны штоком гранитоидов шахтаминского комплекса.

В петрографическом отношении трахиандезибазальты – мелкопорфировые породы, содержащие 15-20% вкрапленников диопсида и интенсивно серицитизированного Ca-Na полевого шпата. Микролитовая основная масса сложена преимущественно теми же минералами. Трахиандезиты и трахидациты имеют схожий минеральный состав, они представляют собой среднепорфировые породы и содержат до 20-30% вкрапленников андезина и олигоклаза, а также биотита, иногда полностью замещенного хлоритом. Основная масса - микрофельзитовая, она сложена преимущественно K-Na полевым шпатом и кварцем. Самыми кислыми породами в разрезе являются риодациты со среднепорфировой структурой и микрофельзитовой основной массой. Их вкрапленники представлены олигоклазом, биотитом и кварцем.

Изученные позднемезозойские вулканиты Хада-Булакской вулкано-плутонической ассоциации образуют единый непрерывный ряд от основных до кислых умеренно-щелочных пород. Исключением являются самые кислые разновидности ассоциации, которые попадают в поле нормальной щелочности. Положение точек их составов на классификационной диаграмме зависимости (Na2O+K2O) от SiO2 позволяет отнести их к трахиандезибазальтам, трахиандезитам, трахидацитам и риодацитам. Плутонические породы Хада-Булакского штока отвечают по своему составу граносиенитам. На диаграмме в координатах K2O-SiO2 подавляющая часть фигуративных точек составов попадает в поле образований высококалиевой серии. Наблюдается рост концентраций щелочей и Al2O3 в ряду от трахиандезибазальтов до трахидацитов и их уменьшение с увеличением кремнекислоты от трахидацитов до риодацитов. Концентрации остальных петрогенных элементов уменьшаются с увеличением содержания SiO2 от основных разновидностей к кислым. Все породы среднего и кислого составов являются кварц-нормативными, а для некоторых из них отмечен

нормативный корунд (до 1.5%), который может указывать на их слабую пересыщенность глиноземом.

Все описываемые разновидности вулканических пород характеризуются схожими спектрами распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), отличаясь лишь их концентрацией. Все они обладают сильно фракционированными спектрами РЗЭ ((La/Yb)N= 23-41) с отсутствием ярко выраженной европиевой аномалии (Eu/Eu*= 0.83-0.97). Спектры распределения редких элементов, нормированных по их содержаниям в примитивной мантии, характеризуются отчетливо проявленными Ta-Nb и Ti-минимумами. Подобные геохимические характеристики свойственны породам, сформированным в островодужных обстановках, однако по сравнению с базальтами островных дуг (IAB) и даже базальтами океанических островов (OIB), рассматриваемые породы обладают более высокими содержаниями практических всех несовместимых элементов. Схожая геохимическая специфика наблюдается и для позднемезозойских вулканитов Восточно-Монгольского пояса, где воздействие мантийного плюма на метасоматически измененную литосферную мантию привело к формированию расплавов с характеристиками, промежуточными между OIB и IAB (Ярмолюк и др., 2024). Следует отметить, что в ряду от трахиандезибазальтов до риодацитов наблюдается обеднение всеми РЗЭ, что исключает ведущую роль кристаллизационной дифференциации и может указывать на значительный вклад осадочного материала в формирование расплавов среднего и кислого составов.

Гранитоиды имеют идентичные с трахидацитами спектры распределения редких и редкоземельных элементов. На дискриминантных диаграммах, разделяющих граниты A-, I-, S- и M-типов, рассматриваемые граносиениты попадают в поле гранитов I- и S-типов. Положение фигуративных точек рассматриваемых кислых пород на диаграмме CaO/(MgO+FeO)-Al2O3/(MgO+FeO) может свидетельствовать о формировании их родоначального расплава вследствие частичного плавления дацитов и тоналитов.

С целью изучения состава, условий образования и эволюции магм Хада-Булакской вулкано-плутонической ассоциации нами были изучены первичные расплавные включения в клинопироксене трахиандезибазальтов, плагиоклазе трахидацитов, а также в плагиоклазе и кварце риодацитов.

Расплавные включения в клинопироксене трахиандезибазальтов располагаются азонально, имеют эллипсовидную форму и размеры 20-30 мкм. Как правило, они полностью раскристаллизованы, газовая фаза в них плохо различима. Состав дочерних фаз не определялся в силу их малых размеров. Термометрические эксперименты с расплавными включениями показали, что их гомогенизация осуществлялась при 1050-1180 °C. При этом, полной гомогенизации включений достигнуто не было, в них сохранялись один или несколько газовых пузырьков.

Расплавные включения в плагиоклазе трахидацитов и риодацитов располагаются неравномерно. Они имеют эллипсоидную форму, либо форму отрицательного кристалла и размеры 20-40 мкм. Включения представлены двумя типами. К первому типу относятся полностью раскристаллизованные включения. Включения второго типа содержат стекло, газовую фазу, иногда дочерние минералы. Частичная гомогенизация расплавных включений в плагиоклазе трахидацитов и риодацитов осуществлялась при температурах 1110-1145 °C и 1180 °C соответственно. Расплавные включения в кварце риодацитов, как правило, округлые, но иногда имеют форму отрицательного кристалла, их размеры составляют 20-60 мкм. Они состоят из стекла и газовой фазы.

Микрозондовые исследования стекол гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене трахиандезибазальтов позволили оценить состав расплава, участвующего в их формировании. Так, изученные стекла отвечают составу андезитов и содержат (мас.%): SiO2 59-60, Al2O3 13-15, TiO2 0.4-0.7, FeOобщ. 2-3, CaO 4-5, MgO 2-4, K2O+Na2O 8-9, F 0.14.

По химическому составу стекла гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе трахидацитов можно разделить на два типа. Стекла первого типа, в целом, отвечают составу самой породы. Они характеризуются высокими глиноземистостью (A/CNK

= 1.05-1.2), щелочностью (Na_2O+K_2O = 8.5-10.5 мас.%) и низкими концентрациями железа (FeOобщ. до 5 мас. %) и кальция (CaO = 1.3-1.7 мас.%) при содержании SiO_2 62-66 мас.%. Стекла включений второго типа установлены как в плагиоклазе трахидацитов, так и в кварце и плагиоклазе риодацитов. По своему составу они отвечают риолитам и содержат (мас.%): SiO_2 71-79, Al_2O_3 11-13, TiO_2 0.07-0.19, FeOобщ. 0.19-0.64, CaO 0.2-1.5, K_2O+Na_2O 7-9.

В процессе микрозондовых исследований в некоторых включениях из трахидацитов и риодацитов были обнаружены, вероятно ксеногенные, фазы кварца каплевидной («оплавленной») формы. Учитывая морфологию этих фаз кварца, температуру гомогенизации и контрастный состав включений, а также наличие в составе вмещающей вулканиты толщи аркозовых песчаников (Шивохин и др., 2010), можно предположить его ксеногенную природу.

По результатам исследования расплавных включений методом рамановской спектроскопии было установлено, что они содержат газовую фазу CO_2 и аморфный углерод. Стоит отметить, что в ходе кристаллизационной дифференциации для кислого расплава не характерно накопление углекислоты. Наличие углекислоты и аморфного углерода может объяснятся процессом декарбонизации известняков вследствие ассимиляции магматического расплава вмещающей терригенно-карбонатной толщей.

Таким образом, двумя независимыми методами (геохимическим и методом изучения расплавных включений) установлено, что в эволюции расплавов позднеюрской вулкано-плутонической ассоциации Хада-Булакской депрессии ведущая роль принадлежит процессам коровой контаминации.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Шивохин Е.А., Озерский А.Ф., Артамонова Н.А., Духовский А.А., Карасев В.В., Куриленко А.В., Надеждина Т.Н., Павленко Ю.В., Раитина Н.И., Шор Г.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Лист M-50 – Борзя. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2010. 553 с.
2. Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Оюунчимэг Ц. Строение, возраст и условия формирования позднемезозойского Восточно-Монгольского вулканического пояса // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2024. Т. 32. № 1. С. 32-57

***The role of crustal contamination in the formation of Jurassic volcanics of the Khada-Bulak depression (Borzinsky district, South-Eastern Transbaikalia)**

Andreev A.A., Andreeva I.A., Ustinov S.A., Lapaev D.S., Svecherevskiy A.D.
IGEM RAS, axel-foley@yandex.ru;

In the South-Eastern Transbaikalia in the Late Mesozoic period, magmatic activity was widespread, which led to the formation of various deposits and ore occurrences of minerals. Prominent representatives of the Late Mesozoic stage are the volcanics of the Priargunskaya, Shadoronskaya and Mulinskaya series, intruded by granitoids of the Shakhtama and Kukulbeysky complexes. Therefore, an important task is to determine the composition, conditions of formation and processes responsible for the formation of melts of these magmatic series.

The tectonic position of the considered part of South-Eastern Transbaikalia is determined by two large structures – the Onon block of the Aginsk segment of the Mongol-Okhotsk belt (MOB) and the Erguna terrane, bordering the Siberian continent in the north along the Mongol-Okhotsk fault. Middle-Upper Jurassic volcanic rocks are mainly located within the Erguna terrane, with minor occurrences in the Aginsk segment of MOB. Based on the differences in the structure of the stratigraphic sections and the composition of the volcanogenic rocks, the Middle-Late Jurassic volcanics are combined into three stratigraphic series: Shadoron, Mulinsk and Priargunsk (Shivakhin et al., 2010).

The object of our research is the volcanics of the Shadoron series of the Khada-Bulak depression structure, located 25 km north of Borzya. In this area, the stratigraphic section is represented mainly by volcanic formations that unconformably lie on the terrigenous-carbonate rocks of the Borzya series and are represented by a number of rocks from trachyandesite basalts to rhyodacites. In the central part of the structure, the Jurassic volcanics are intruded by a stock of granitoids of the Shakhtama complex.

In petrographic terms, basaltic trachyandesites are fine-porphyritic rocks containing 15-20% diopside phenocrysts and intensely sericitized Ca-Na feldspar. The microlitic groundmass is composed mainly of the same minerals. Trachyandesites and trachydacites have a similar mineral composition; they are medium-porphyritic rocks and contain up to 20-30% andesine and oligoclase phenocrysts, as well as biotite, sometimes completely replaced by chlorite. The groundmass is microfelsic, composed mainly of K-Na feldspar and quartz. The most acidic rocks in the section are rhyodacites with a medium-porphyritic structure and a microfelsic groundmass. Their phenocrysts are represented by oligoclase, biotite and quartz.

Late Mesozoic volcanics of the Khada-Bulak volcano-plutonic association form a single continuous series from basic to acidic moderately sub-alkaline rocks. The exception is the most acidic varieties of the association, which fall within the field of normal alkalinity. The position of their composition points on the classification diagram of the dependence of ($Na_2O + K_2O$) versus SiO_2 allows us to classify them as basaltic trachyandesites, trachyandesites, trachydacites and rhyodacites. The plutonic rocks of the Khada-Bulak stock correspond in composition to granosyenites. On the diagram in K_2O-SiO_2 coordinates, the overwhelming majority of figurative composition points fall within the field of high-potassium series formations. An increase in alkali and Al_2O_3 concentrations is observed in a series from basaltic trachyandesites to trachydacites and their decrease with an increase in SiO_2 from trachydacites to rhyodacites. The concentrations of other petrogenic elements decrease with increasing SiO_2 from the basic varieties to the acidic ones. All rocks of medium and acidic compositions are quartz-normative, and for some of them normative corundum (up to 1.5%) is noted, which may indicate their supersaturation with alumina.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

All the varieties of volcanic rocks are characterized by similar spectra of rare earth elements (REE) distribution, differing only in their concentration. All of them have strongly fractionated REE spectra ($(La/Yb)_N$= 23-41) with the absence of a clearly expressed europium anomaly (Eu/Eu*= 0.83-0.97). The spectra of rare element distribution, normalized by their contents in the primitive mantle, are characterized by clearly expressed Ta-Nb and Ti minima. Similar geochemical characteristics are typical of rocks formed in island-arc settings, however, compared to island-arc basalts (IAB) and even oceanic island basalts (OIB), the rocks under consideration have higher concentrations of almost all incompatible elements. Similar geochemical specificity is observed for the late Mesozoic volcanics of the East Mongolian Belt, where the impact of a mantle plume on the metasomatically altered lithospheric mantle led to the formation of melts with characteristics intermediate between OIB and IAB (Yarmolyuk et al., 2024). It should be noted that in the series from basaltic trachyandesites to rhyodacites, depletion in all REEs is observed, which excludes the leading role of crystallization differentiation and may indicate a significant contribution of sedimentary material to the formation of melts of intermediate and acidic compositions.

Granitoids have identical to trachydacites spectra of rare and rare earth elements distribution. On discriminant diagrams separating granites of A-, I-, S- and M-types, the granosyenites under consideration fall into the field of granites of I- and S-types. The position of figurative points of the acidic rocks on the diagram CaO/(MgO+FeO) versus Al2O3/(MgO+FeO) may indicate the formation of their parental melt due to partial melting of dacites and tonalites.

In order to study the composition, formation conditions and evolution of magmas of the Khada-Bulak volcano-plutonic association, we studied primary melt inclusions in clinopyroxene of basaltic trachyandesites, plagioclase of trachydacites, as well as in plagioclase and quartz of rhyodacites.

Melt inclusions in clinopyroxene of basaltic trachyandesites are located azonally, have an elliptical shape and sizes of 20-30 μm. They are usually completely crystallized, the gas phase in them is poorly distinguishable. The composition of the daughter phases was not determined due to their small sizes. Thermometric experiments with melt inclusions showed that their homogenization was carried out at 1050-1180 °C. However, complete homogenization of the inclusions was not achieved, one or several gas bubbles were preserved in them.

Melt inclusions in plagioclase of trachydacites and rhyodacites are unevenly distributed. They have an ellipsoid shape or a negative crystal shape and are 20-40 μm in size. There are two types of inclusions. The first type includes completely crystallized inclusions. The second type of inclusions contains glass, gas phase, and sometimes daughter minerals. Partial homogenization of melt inclusions in plagioclase of trachydacites and rhyodacites was carried out at temperatures of 1110-1145 °C and 1180 °C, respectively. Melt inclusions in quartz of rhyodacites are usually rounded, but sometimes have a negative crystal shape, their sizes are 20-60 μm. They consist of glass and gas phase.

Microprobe studies of glasses of homogenized melt inclusions in clinopyroxene of basaltic trachyandesites allowed us to estimate the composition of the melt involved in their formation. Thus, the studied glasses correspond to the composition of andesites and contain (wt.%): SiO_2 59-60, Al_2O3 13-15, TiO_2 0.4-0.7, FeO_{total} 2-3, CaO 4-5, MgO 2-4, K_2O+Na_2O 8-9, F 0.14.

Based on their chemical composition, the glasses of homogenized melt inclusions in trachydacite plagioclase can be divided into two types. The glasses of the first type generally correspond to the composition of the host rock. They are characterized by high alumina content (A/CNK = 1.05-1.2), alkalinity (Na_2O+K_2O = 8.5-10.5 wt.%) and low concentrations of iron (FeO_{total} up to 5 wt.%) and calcium (CaO = 1.3-1.7 wt.%) with a SiO_2 content of 62-66 wt.%. The glasses of the second type of inclusions were found both in trachydacite plagioclase and in rhyodacite quartz and plagioclase. Based on their composition, they correspond to rhyolites and contain (wt.%): SiO_2 71-79, $Al2O_3$ 11-13, TiO_2 0.07-0.19, FeO_{total} 0.19-0.64, CaO 0.2-1.5, K_2O+Na_2O 7-9.

During microprobe studies, some inclusions from trachydacites and rhyodacites were found to contain drop-shaped (“melted”) quartz phases. Considering the morphology of these quartz phases, the homogenization temperature and the contrasting composition of the inclusions, as well as the

presence of arkose sandstones in the host volcanic rocks (Shivakhin et al., 2010), its xenogenic nature can be assumed.

Based on the results of the study of melt inclusions using Raman spectroscopy, it was found that they contain a gas phase of CO2 and amorphous carbon. It is worth noting that during crystallization differentiation, carbon dioxide accumulation is not typical for acidic melt. The presence of carbon dioxide and amorphous carbon can be explained by the process of decarbonization of limestones due to the assimilation of magmatic melt by the surrounding terrigenous-carbonate strata.

Thus, two independent methods (geochemical and melt inclusion studies) have established that the leading role in the evolution of melts of the Late Jurassic volcano-plutonic association of the Khada-Bulak depression belongs to crustal contamination processes.

The work was carried out as part of the state assignment of IGEM RAS.

1. Shivakhin E.A., Ozersky A.F., Artamonova N.A., Dukhovsky A.A., Karasev V.V., Kurilenko A.V., Nadezhdina T.N., Pavlenko Yu.V., Raitina N.I., Shor G.M. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Sheet M-50 - Borzya. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. 2010. 553 p.
2. Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Kudryashova E.A., Oyunchimeg Ts. Structure, age and conditions of formation of the Late Mesozoic East Mongolian volcanic belt // Stratigraphy. Geological correlation. 2024. T. 32. No. 1. P. 32-57

Геохимия руд на основе рудной залежи Озерного колчеданно-полиметаллического месторождения

Бадмажапов Б.Б[1], Дамдинов Б.Б.[2], Дамдинова Л.Б.[1], Викентьев И.В.[3], Минина О.Р.[1]
[1]ГИН СО РАН, badmazapovbato@gmail.com; [2]ЦНИГРИ, damdinov@mail.ru; [3]ИГЕМ РАН vikentevilya@gmail.com

Озёрное свинцово-цинковое месторождение находится на территории Еравнинского района Республики Бурятия (Российская Федерация). Оно расположено в 60 километрах от административного центра района — села Сосново-Озёрское, и примерно в 308 километрах к востоку от города Улан-Удэ. Месторождение относится к Озёрнинскому рудному узлу, который является частью более обширного Еравнинского рудного района.

В тектоническом плане Еравнинский рудный район входит в состав Удино-Витимской зоны палеозоид, представляющей собой ключевой структурный элемент Байкало-Витимской складчатой системы. Удино-Витимская зона характеризуется длительным развитием и включает комплексы каледонского (Є–S1), раннегерцинского (S2–C1) и позднегерцинского (C2–P1) структурных этажей, формировавшихся в определенных геодинамических обстановках (Руженцев и др., 2012, Минина и др., 2016 и др.). Последовательное формирование и взаимодействие этих комплексов в ходе тектономагматической эволюции региона создало фундаментальные предпосылки для локализации рудных объектов, включая Озёрное месторождение. Озёрное месторождение было открыто в 1963 году в результате целенаправленной проверки комплексной геофизической аномалии, выявленной ранее на участке «Случайный». Ключевым событием, предшествовавшим открытию, стало обнаружение в 1962 году при картировочном бурении сидеритовых руд, залегающих под лимонитовыми (железными) «свалами» (зонами окисления и скоплениями гидроксидов железа), что послужило первым прямым указанием на наличие сульфидной минерализации. Месторождение локализовано в пределах крупного останца вулканогенно-осадочных отложений, относимых к нижнепалеозойской вулканогенно-осадочной олдындинской свите (Дистанов и др., 1972; Царев, 1978; Гордиенко, Нефедьев, 2015 и др.). Рудные тела строго приурочены к одноимённой синклинальной структуре (Озёрная синклиналь, размеры 2,5 х 1,5 км), характеризующейся асимметричным блоковым строением, что подразумевает различную крутизну крыльев и разбитость структуры на отдельные тектонические блоки. Проявления палеозойского интрузивного магматизма в пределах рудного поля представлены серией даек андезитовых порфиритов, сиенит-порфиров и долеритов. В научной литературе существует дискуссия относительно их временной связи с рудообразованием: одна группа исследователей интерпретирует эти дайки как дорудные образования, потенциально связанные с источником рудного вещества или подготовившие пути для гидротермальных растворов (Дистанов и др., 1972 и др.), тогда как другая группа считает их пострудными, секущими уже сформированные рудные залежи (Царев, 1978 и др.). Все породы геологического разреза Озёрнинского рудного узла в той или иной степени содержат сульфидную минерализацию с абсолютным преобладанием пирита (FeS_2). В последние годы получены новые данные, свидетельствующие о том, что колчеданно-полиметаллические руды Озерного, Ульзутуйского месторождений и ряда проявлений Озернинского рудного узла связаны с процессами осадконакопления и вулканической деятельностью в позднем девоне – раннем карбоне, а не в кембрии (Минина и др., 2023, 2024). Рудовмещающие отложения выделены из состава олдындинской свиты и отнесены к еравнинской серии (Минина и др., 2025). Формирование руд Озерного месторождения и его аналогов имеет, вероятнее всего, полигенный и полихронный генезис - гидротермально-осадочный (сингенетический) и гидротермально-метасоматический (эпигенетический). При этом учитываются как вулканогенные процессы ответственные за привнос в бассейн рудного материала и его перераспределение в слаболитифицированных отложениях, так и процессы син-диагенеза и эпигенеза, происходящие на стадиях его развития (Викентьев и др., 2023; Минина и др., 2025). Основные сульфидные рудные тела (свинцово-

цинковые) образуют серию пластовых и пластообразных залежей, согласных со вмещающей толщей и приурочены к нескольким стратиграфическим уровням ее стратиграфического разреза. Рудные слои разделены безрудными прослоями осадочных и вулканокластических пород, мощностью от 5 до 30 метров. Для выявления особенностей геохимической зональности рудной залежи исследовался разрез скважины OZGM-007 Озерного месторождения. Разрез представлен чередованием известковистых и кремнистых туфотерригенных пород, туфов и эффузивов андезитового, андезито-дацитового, дацитового и смешанного составов, горизонтами полосчатых и брекчиевых руд. Мощность рудных прослоев достигает до 30 метров. Руды месторождения являются полиметаллическими, с ведущими полезными компонентами — свинцом и цинком. Главными рудными минералами являются сфалерит (ZnS) и галенит (PbS). Повсеместно распространён пирит (FeS_2), часто составляющий значительную долю сульфидной массы. Также на месторождении присутствуют пластовые залежи сидеритовых руд и прослои, обогащенные баритом.

В качестве второстепенных и редких минералов могут присутствовать халькопирит ($CuFeS_2$), пирротин ($Fe_{1-x}S$), арсенопирит (FeAsS), а также сульфосоли (блеклая руда). В зоне гипергенеза развиты вторичные минералы: лимонит (смесь $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$), церуссит ($PbCO_3$), и другие.

Исследования химического состава руд и пород месторождения основаны на данных по содержаниям следующих элементов-примесей на основе рентгено-флуоресцентного анализа (РФА): Au, Ag и Te, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cd, Sb, As, Pb (см. рис. 1). Руды Озерного колчеданно-полиметаллического месторождения – преимущественно представляют из себя сульфиды и их сульфосоли и характеризуются неравномерным распределением и аномальными пиками концентрации полезных элементов, таких как Zn и Pb. В целом руды Озерного месторождения отличаются очень высокими содержаниями главных химических элементов, таких как Zn, Pb, As, Cu, Cd, также повышены содержания Bi, Cr, Co, Rb, Sr, Zr Mn, Ag, Sb, Ba, Ti, Hg, Th, Cl и Sr, составляющие десятки и сотни г/т. По результатам парной линейной корреляции элементов, был рассчитан коэффициент зональности для оценки уровня эрозионного среза: K = As*Zn*Sb*Pb/W*Be*Sn*Cu. В качестве коэффициента зональности принимаются отношения произведений среднегеометрического значения элементов, где в числитель помещаются элементы, концентрирующиеся в надрудных, а в знаменатель - преимущественно в центральных и подрудных частях первичного ореола. Коэффициент рассчитан для рудного интервала скв. OZGM-007 от 96,6 м до 179,4 метров.

$$\frac{As * Cr * Co * Sb}{Cu * Sc * Rb * Cd}$$

$$+ 107.7\text{-}96.6 \text{ м} \quad \frac{324 * 26 * 26 * 34}{77 * 12 * 14 * 71} = \frac{7446816}{852852} = 9$$

$$+ 138.6\text{-}109.8 \text{ м} \quad \frac{860 * 30 * 35 * 34}{184 * 11 * 21 * 9} = \frac{37926000}{3910368} = 10$$

$$+ 148.5\text{-}139.4 \text{ м} \quad \frac{1043 * 32 * 33 * 46}{161 * 7 * 11 * 135} = \frac{50664768}{1673595} = 30$$

$$+ 158.2\text{-}148.8 \text{ м} \quad \frac{432 * 31 * 37 * 51}{295 * 8 * 13 * 187} = \frac{25270704}{5737160} = 4$$

$$+ 179{,}4\text{-}160{,}6 \text{ м} \quad \frac{592 * 28 * 44 * 46}{199 * 8 * 11 * 137} = \frac{33549824}{2399144} = 14$$

Рис.1. Расчет коэффициента зональности на основе скважины OZGM-0007

В качестве коэффициента зональности принимаются отношения произведений среднегеометрического значения элементов, где в числителе элементы, концентрирующиеся в надрудных, а в знаменателе - преимущественно в центральных и подрудных частях первичного ореола.

Предложенный коэффициент использовался при оценке уровня эрозионного среза рудной залежи. Предлагаемое соответствие величины показателей коэффициента зональности и уровня эрозионного среза приведены на рисунке 2.

Величина коэффициента зональности	Уровень эрозионного среза
>40	верхнерудный
29-39	среднерудный 1
10-29	среднерудный 2
<10	нижнерудный

№	Горизонт, м	Величина показателей коэффициента зональности	Принятый уровень эрозионного среза
1	+ 107.7-96.6	9	нижнерудный
2	+ 138.6-109.8	10	среднерудный 2
3	+ 148.5-139.4	30	среднерудный 1
4	+ 158.2-148.8	4	нижнерудный
5	+ 179,4-160,6	14	среднерудный 2

Рис.2. Величины показателей соответствия коэффициента зональности и уровня эрозионного среза

Проведенный геохимические анализ показал, что изученная зона слабо эродирована и характеризуется высокими значениями коэффициента зональности. Величина коэффициента зональности от 107 м постоянно возрастает, достигая своего максимума на 148-139 м. Этот максимум соответствует среднерудному уровню эрозионного среза для свинцово-цинковой (Au-Ag-Bi-Cu-As-Co) геохимической ассоциации. На верхних горизонтах +160-179 м мы видим снова повышение величины коэффициента зональности. Это повышение связано с неоднородностью руд. Уровень эрозионного среза определяется как среднерудный. Закономерной смены количественных соотношений рудных минералов (пирита и сфалерита) по разрезу рудной залежи (рудного прослоя) не отмечается.

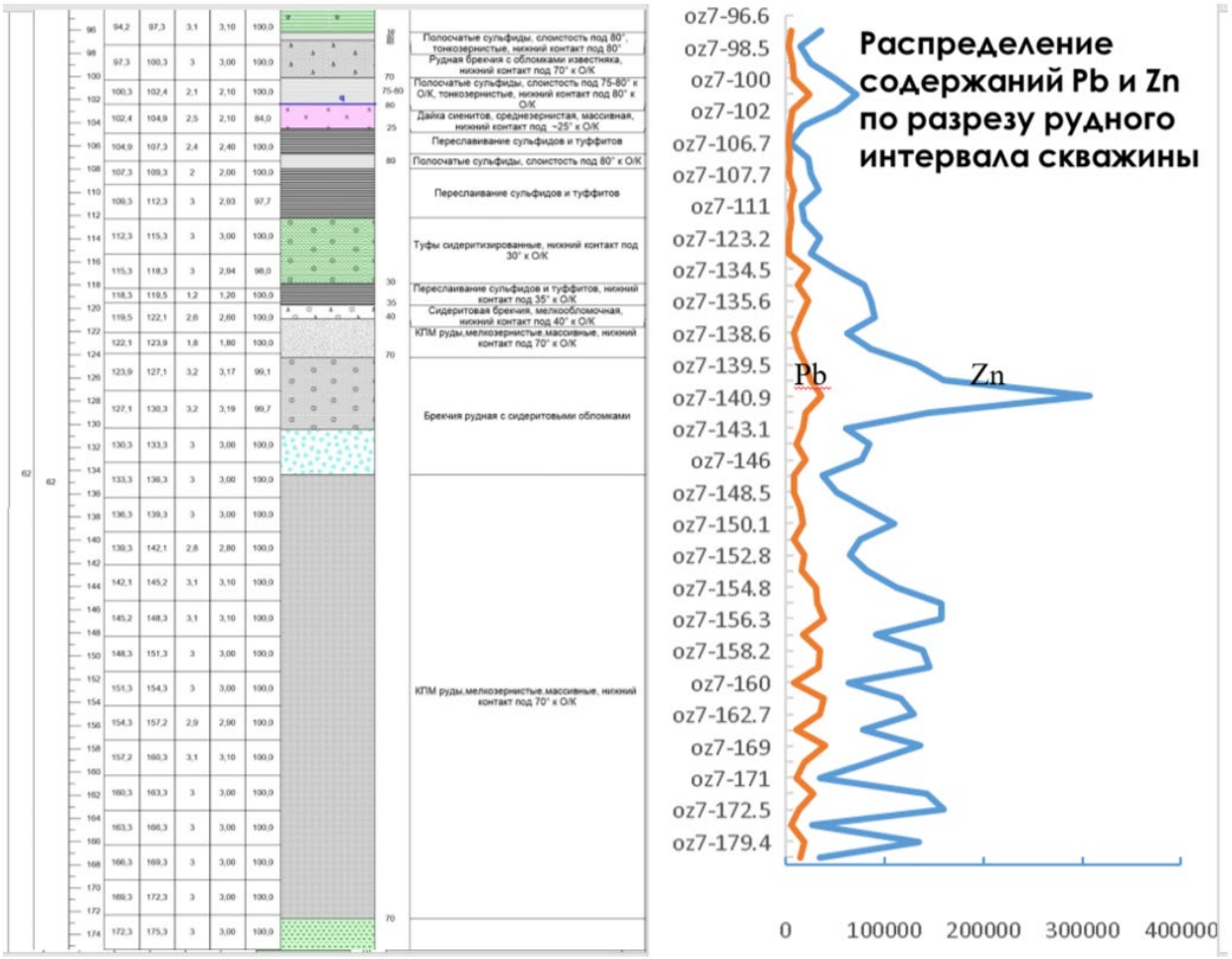


Рис.3. Степень изменения содержаний цинка и свинца на протяжении от + 96,6 м до + 180

Также изменение содержаний цинка и свинца фиксируется на протяжении от + 96,6 м до + 180 м, кривая роста постепенно возрастает. Концентрация полезных веществ резко увеличивается, начиная с рудного интервала 134 м, достигает пика на 140.1 м. Дальнейшие колебания свинца и цинка связаны с увеличением доли железа, кремния, что показывает неоднородность состава рудного слоя.

По данным исследований последних лет предполагается, что на Озерном месторождении последовательно реализованы две модели – гидротермально-осадочная и метасоматическая, когда первичные гидротермально-осадочные руды были переотложены более поздними гидротермальными растворами (Викентьев и др., 2023). Перекристаллизация руд относится к более позднему метаморфическому этапу (Дамдинова и др., 2024). Данные, полученные при исследовании состава минералов на сканирующем микроскопе на интервале 134,34 – 172,7 м позволили выявить особенности их химического состава и возможной зональности оруденения, свидетельствуют о том, что Озерное месторождение является стратиформным колчеданно-полиметаллическим месторождением. Формирование колчеданно-полиметаллических руд месторождения было связано с осадконакоплением и вулканической деятельностью в среднем палеозое, с последующей регенерацией сингенетических сульфидных скоплений гидротермальными растворами и метаморфическим преобразованием руд. Локализация месторождения контролируется Озёрной синклиналью асимметричного блокового строения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ, грант №22-17-00106. Участие в конференции реализовано при финансовой поддержке бюджетного проекта ГИН СО РАН- АААА-А21-121011390003-9.

1. Викентьев И.В., Дамдинов Б.Б., Минина О.Р. Спирина А.В., Дамдинова Л.Б. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS–SEDEX–MV-тип – пример гигантского Озерного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений. 2023. Том 65. № 3. С. 201–236.
2. Гордиенко И.В., Нефедьев М.А. Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2015. Том 57. № 2. С. 114–124.
3. Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б., Викентьев И.В., Реутский В.Н. Условия перекристаллизации руд Озерного полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2024. Том 66. № 2. С. 178-190.
4. Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Тарасова Р.С. Геологическое строение и генезис Озерного свинцовоцинкового колчеданного месторождения (Западное Забайкалье). Геология рудных месторождений, 1972. № 2. С. 3-22.
5. Минина О.Р., Гордиенко И.В., Дамдинов Б.Б, Ташлыков В.С., Гонегер Т.А., Скрипников М.С., Ланцева В.С., Хубанов В.Б., Кислов Е.В. Новые данные о возрасте рудовмещающих отложений Озерного полиметаллического месторождения // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 3. С. 1–16.
6. Минина О.Р., Ланцева В.С., Соболев И.Д., Викентьев И.В. Состав, возраст и обстановки седиментации рудовмещающей еравнинской серии Удино-Витимской зоны (Западное Забайкалье, Россия) // Литология и полезные ископаемые. 2024. № 1. С. 27–46.
7. Руженцев С.В., Минина О. Р., Некрасов Г. Е. Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. 2012. № 2. С. 3–28.
8. Царев Д.И. Генезис Озерного колчеданно-цинкового месторождения в Забайкалье // Изв. АН СССР. 1983. С. 97-107.

*Geochemistry of ores based on the ore deposit of the Ozernoye pyrite-polymetallic deposit

Badmazhapov B.B.[1], Damdinov B.B.[2], Damdinova L.B.[1], Vikentyev I.V.[3], Minina O.R.[1]
[1]GIN SB RAS, badmazapovbato@gmail.com; [2]TsNIGRI, damdinov@mail.ru; [3]IGEM RAS
vikentevilya@gmail.com

The Ozernoye lead-zinc deposit is located in the Yeravninsky district of the Republic of Buryatia (Russian Federation). It is located 60 kilometers from the administrative center of the district, the village of Sosnovo-Ozerskoye, and approximately 308 kilometers east of Ulan-Ude. The deposit belongs to the Ozerninsky ore cluster, which is part of the larger Yeravninsky ore region.

In tectonic terms, the Eravninsky ore district is part of the Uda-Vitim zone of the Paleozoides, which is a key structural element of the Baikal-Vitim folded system. The Uda-Vitim zone is characterized by a long-term development and includes complexes of the Caledonian (Є-S1), early Hercynian (S2-C1) and late Hercynian (C2-P1) structural floors that formed in certain geodynamic settings (Ruzhentsev et al., 2012, Minina et al., 2016, etc.). The successive formation and interaction of these complexes during the tectonomagmatic evolution of the region created fundamental prerequisites for the localization of ore objects, including the Ozernoye deposit. The Ozernoye deposit was discovered in 1963 as a result of a targeted test of a complex geophysical anomaly previously identified in the Sluchayny area. The key event preceding the discovery was the discovery in 1962 during mapping drilling of siderite ores lying under limonite (iron) "dumps" (oxidation zones and accumulations of iron hydroxides), which served as the first direct indication of the presence of sulfide mineralization. The deposit is localized within a large remnant of volcanogenic-sedimentary deposits attributed to the Lower Paleozoic volcanogenic-sedimentary Oldynda suite (Distanov et al., 1972; Tsarev, 1978; Gordienko, Nefedyev, 2015, etc.). The ore bodies are strictly confined to the eponymous synclinal structure (Ozernaya syncline, dimensions 2.5 x 1.5 km), characterized by an asymmetric block structure, which implies different slopes of the wings and the division of the structure into separate tectonic blocks. Manifestations of Paleozoic intrusive magmatism within the ore field are represented by a series of andesite porphyry, syenite porphyry and dolerite dikes. There is a debate in the scientific literature regarding their temporal connection with ore formation: one group of researchers interprets these dikes as pre-ore formations, potentially associated with the source of ore substance or preparing paths for hydrothermal solutions (Distanov et al., 1972, etc.), while another group considers them to be post-ore, cutting through already formed ore deposits (Tsarev, 1978, etc.). All rocks of the geological section of the Ozerny ore cluster contain sulfide mineralization to varying degrees with an absolute predominance of pyrite (FeS_2). In recent years, new data have been obtained indicating that the pyrite-polymetallic ores of the Ozerny, Ulzutuyskoye deposits and a number of occurrences of the Ozerny ore cluster are associated with sedimentation processes and volcanic activity in the Late Devonian - Early Carboniferous, and not in the Cambrian (Minina and others, 2023, 2024). The ore-bearing deposits are distinguished from the Oldynda suite and are assigned to the Eravninskaya series (Minina et al., 2025). The formation of the ores of the Ozernoye deposit and its analogues most likely has a polygenic and polychronous genesis - hydrothermal-sedimentary (syngenetic) and hydrothermal-metasomatic (epigenetic). In this case, both volcanogenic processes responsible for the introduction of ore material into the basin and its redistribution in weakly lithified sediments, and the processes of syndiagenesis and epigenesis occurring at the stages of its development are taken into account (Vikentyev et al., 2023; Minina et al., 2025). The main sulfide ore bodies (lead-zinc) form a series of sheet and sheet-like deposits conformable with the host strata and are confined to several stratigraphic levels of its stratigraphic section. The ore layers are separated by barren layers of sedimentary and volcaniclastic rocks, with a thickness of 5 to 30 meters. To identify the features of the geochemical zoning of the ore deposit, the

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

section of the OZGM-007 well of the Ozernoye deposit was studied. The section is represented by alternating calcareous and siliceous tuff-terrigenous rocks, tuffs and effusives of andesite, andesite-dacitic, dacitic and mixed compositions, horizons of banded and breccia ores. The thickness of the ore layers reaches 30 meters. The ores of the deposit are polymetallic, with the leading useful components being lead and zinc. The main ore minerals are sphalerite (ZnS) and galena (PbS). Pyrite (FeS_2) is widespread, often constituting a significant proportion of the sulfide mass. The deposit also contains bedded deposits of siderite ores and interlayers enriched in barite.

Minor and rare minerals may include chalcopyrite ($CuFeS_2$), pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$), arsenopyrite (FeAsS), and sulfosalts (fahlore). Secondary minerals are developed in the hypergenesis zone: limonite (a mixture of Fe_2O_3 nH_2O), cerussite ($PbCO_3$), and others. Studies of the chemical composition of ores and rocks of the deposit are based on data on the contents of the following impurity elements based on X-ray fluorescence analysis (XRF): Au, Ag and Te, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cd, Sb, As, Pb (see Fig. 1). The ores of the Ozernoye pyrite-polymetallic deposit are mainly sulfides and their sulfosalts and are characterized by uneven distribution and abnormal peaks in the concentration of useful elements such as Zn and Pb. In general, the ores of the Ozernoye deposit are distinguished by very high contents of the main chemical elements such as Zn, Pb, As, Cu, Cd, and also increased contents of Bi, Cr, Co, Rb, Sr, Zr Mn, Ag, Sb, Ba, Ti, Hg, Th, Cl and Sr, amounting to tens and hundreds of g/t. Based on the results of paired linear correlation of elements, the zonality coefficient was calculated to assess the level of erosion cut: K = As*Zn*Sb*Pb/W*Be*Sn*Cu. The zonality coefficient is taken as the ratio of the products of the geometric mean value of the elements, where the numerator contains elements concentrated in the supra-ore parts, and the denominator contains mainly the central and sub-ore parts of the primary aureole. The coefficient is calculated for the ore interval of the OZGM-007 well from 96.6 m to 179.4 meters.

$$\frac{As * Cr * Co * Sb}{Cu * Sc * Rb * Cd}$$

$$+ 107.7\text{-}96.6 \text{ м} \quad \frac{324 * 26 * 26 * 34}{77 * 12 * 14 * 71} = \frac{7446816}{852852} = 9$$

$$+ 138.6\text{-}109.8 \text{ м} \quad \frac{860 * 30 * 35 * 34}{184 * 11 * 21 * 9} = \frac{37926000}{3910368} = 10$$

$$+ 148.5\text{-}139.4 \text{ м} \quad \frac{1043 * 32 * 33 * 46}{161 * 7 * 11 * 135} = \frac{50664768}{1673595} = 30$$

$$+ 158.2\text{-}148.8 \text{ м} \quad \frac{432 * 31 * 37 * 51}{295 * 8 * 13 * 187} = \frac{25270704}{5737160} = 4$$

$$+ 179{,}4\text{-}160{,}6 \text{ м} \quad \frac{592 * 28 * 44 * 46}{199 * 8 * 11 * 137} = \frac{33549824}{2399144} = 14$$

Fig. 1. Calculation of the zoning coefficient based on well OZGM-0007

The zonality coefficient is taken as the ratio of the products of the geometric mean value of the elements, where the numerator contains elements concentrated in the supra-ore parts, and the denominator contains mainly the central and sub-ore parts of the primary aureole. The proposed coefficient was used to assess the level of erosion cut of the ore deposit. The proposed correspondence between the values of the zonality coefficient and the level of erosion cut are shown in Figure 2.

Величина коэффициента зональности	Уровень эрозионного среза
>40	верхнерудный
29-39	среднерудный 1
10-29	среднерудный 2
<10	нижнерудный

№	Горизонт, м	Величина показателей коэффициента зональности	Принятый уровень эрозионного среза
1	+ 107.7-96.6	9	нижнерудный
2	+ 138.6-109.8	10	среднерудный 2
3	+ 148.5-139.4	30	среднерудный 1
4	+ 158.2-148.8	4	нижнерудный
5	+ 179,4-160,6	14	среднерудный 2

Fig. 2. Values of the indicators of correspondence between the zonality coefficient and the level of erosion cut.

The conducted geochemical analysis showed that the studied zone is weakly eroded and is characterized by high values of the zonality coefficient. The value of the zonality coefficient from 107 m constantly increases, reaching its maximum at 148-139 m. This maximum corresponds to the average ore level of the erosion cut for the lead-zinc (Au-Ag-Bi-Cu-As-Co) geochemical association. At the upper horizons +160-179 m we see an increase in the zonality coefficient again. This increase is associated with the heterogeneity of the ores. The level of the erosion cut is defined as average ore. No regular change in the quantitative ratios of ore minerals (pyrite and sphalerite) along the section of the ore deposit (ore interlayer) is noted.

Also, the change in zinc and lead contents is recorded over the length from + 96.6 m to + 180 m, the growth curve gradually increases. The concentration of useful substances increases sharply, starting from the ore interval of 134 m, reaching a peak at 140.1 m. Further fluctuations in lead and zinc are associated with an increase in the proportion of iron and silicon, which shows the heterogeneity of the ore layer composition.

According to research data from recent years, it is assumed that two models have been consistently implemented at the Ozernoye deposit - hydrothermal-sedimentary and metasomatic, when the primary hydrothermal-sedimentary ores were redeposited by later hydrothermal solutions (Vikentyev et al., 2023). Recrystallization of ores refers to a later metamorphic stage (Damdinova et al., 2024). The data obtained during the study of the composition of minerals on a scanning microscope in the interval of 134.34 - 172.7 m allowed us to identify the features of their chemical composition and possible zonality of mineralization, indicating that the Ozernoye deposit is a stratiform pyrite-polymetallic deposit. The formation of pyrite-polymetallic ores of the deposit was associated with sedimentation and volcanic activity in the Middle Paleozoic, with subsequent regeneration of syngenetic sulfide accumulations by hydrothermal solutions and metamorphic transformation of ores. The localization of the deposit is controlled by the Ozernaya syncline of an asymmetric block structure.

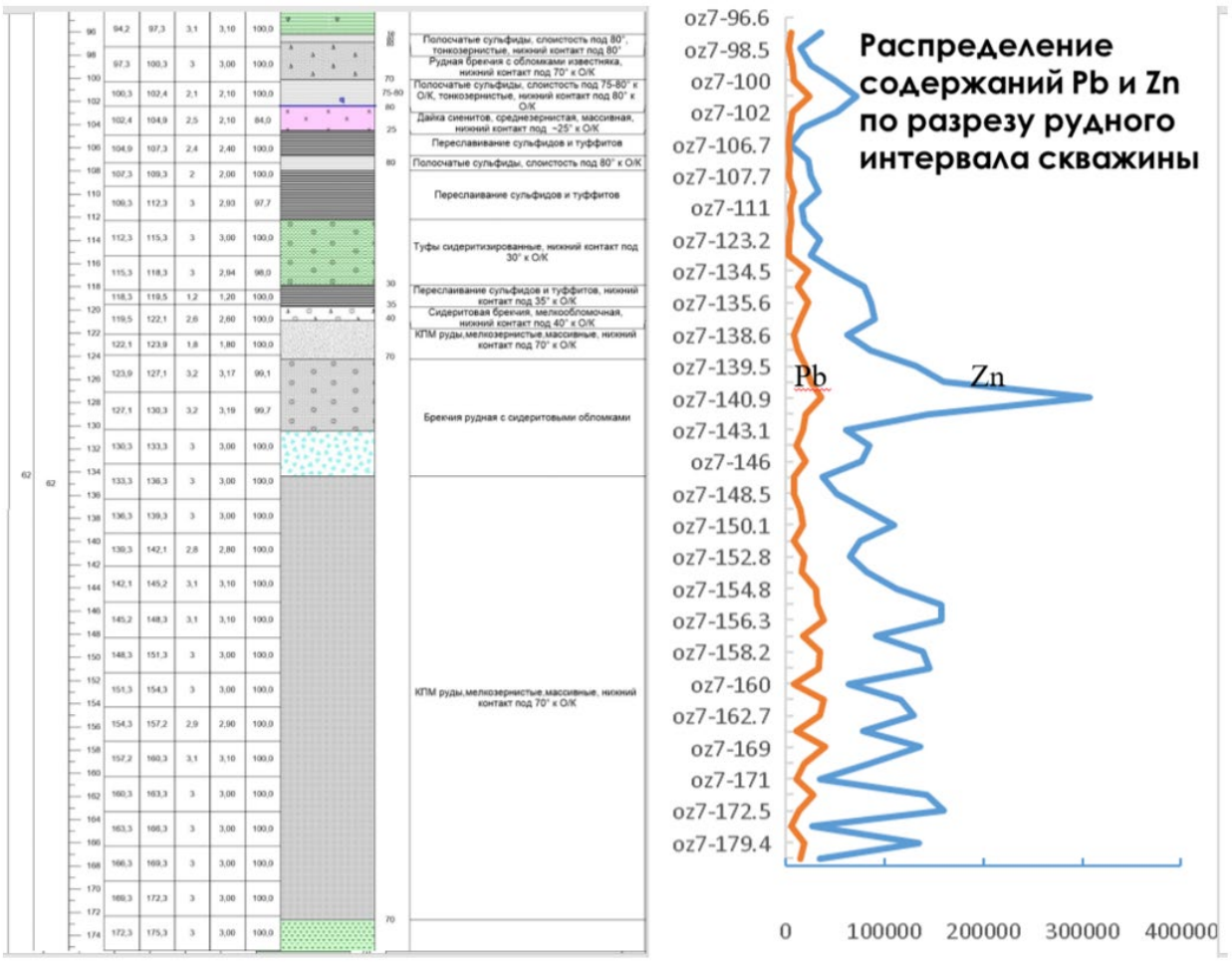


Fig. 3. The degree of change in zinc and lead contents over a distance from + 96.6 m to + 180

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 22-17-00106. Participation in the conference was implemented with the financial support of the budget project of the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences - AAAA-A21-121011390003-9.

1. Vikentyev I.V., Damdinov B.B., Minina O.R., Spirina A.V., Damdinova L.B. Classification of polymetallic ore formation processes and the transitional VMS–SEDEX–MV type – an example of the giant Ozernoye deposit in Transbaikalia, Russia // Geology of ore deposits. 2023. Vol. 65. No. 3. P. 201–236.
2. Gordienko I.V., Nefedyev M.A. Kurbino-Eravninsky ore region of Western Transbaikalia: geological and geophysical structure, types of ore deposits, forecast assessment and development prospects // Geology of ore deposits. 2015. Vol. 57. No. 2. P. 114–124.
3. Damdinova L.B., Damdinov B.B., Vikentyev I.V., Reutsky V.N. Recrystallization conditions of the Ozernoye polymetallic deposit ores (Western Transbaikalia, Russia) // Geology of ore deposits. 2024. Vol. 66. No. 2. P. 178-190.
4. Distanov E.G., Kovalev K.R., Tarasova R.S. Geological structure and genesis of the Ozernoye lead-zinc pyrite deposit (Western Transbaikalia). Geology of ore deposits, 1972. No. 2. P. 3-22.
5. Minina O.R., Gordienko I.V., Damdinov B.B., Tashlykov V.S., Goneger T.A., Skripnikov M.S., Lantseva V.S., Khubanov V.B., Kislov E.V. New data on the age of ore-bearing sediments of the Ozernoye polymetallic deposit // Lithology and mineral resources. 2023. No. 3. pp. 1–16.
6. Minina O.R., Lantseva V.S., Sobolev I.D., Vikentyev I.V. Composition, age and sedimentation settings of the ore-bearing Eravninskaya series of the Uda-Vitim zone (Western Transbaikalia, Russia) // Lithology and mineral resources. 2024. No. 1. pp. 27–46.

7. Ruzhentsev S.V., Minina O.R., Nekrasov G.E., Aristov V.A., Golionko B.G., Doronina N.A., Lykhin D.A. Baikal-Vitim folded system: structure and geodynamic evolution // Geotectonics. 2012. No. 2. P. 3-28.
8. Tsarev D.I. Genesis of the Ozernoye pyrite-zinc deposit in Transbaikalia // Izvestiya AN SSSR. 1983. P. 97-107.

Вопросы минерагении и геодинамической позиции интрузивных массивов, ширяевского типа мамонского комплекса (Хоперский блок)

Белых К.В.
ВГУ, k9803422271@yandex.ru

Интрузивные массивы ширяевского типа мамонского комплекса, локализованные в Хоперском блоке Воронежского кристаллического массива (ВКМ), остаются недостаточно изученными, несмотря на выявленную в их ассоциации сульфидную медно-никелевую минерализацию (Белых, 2022). В качестве ключевого объекта исследования выбран петротипический Ширяевский интрузив.

Детальное минералого-петрографическое и петрохимическое исследование разреза скважины №7169 (глубина 771 м) выявило ритмично-расслоенное строение массива, представленное последовательностью пород от ультраосновных (плагиоперидотиты) до основных (габбронориты, габбро). Преобладают габброиды (соотношение с ультрамафитами =14:1). Минеральный состав включает оливин (Fa=19-53), ортопироксен (Fs=23-42), клинопироксен, роговую обманку (f=37-52 мол.%) и плагиоклаз (An=35-65). Петрохимически породы относятся к нормально-щелочному ряду; вверх по разрезу и от ранних к поздним ритмам отмечается рост SiO_2, Al_2O_3, щелочности, железистости и снижение MgO.

Из построения температурной модели кристаллизации главных породообразующих минералов четко выделяется 4 ритма (мощности: 100,9 м, 21,3 м, 16,8 м, 128,1 м). Каждый ритм начинается меланократовыми разностями (повышенная температура кристаллизации) и завершается лейкократовыми (пониженная температура кристаллизации). Установлена умеренная магнезиальности ультрамафитов (MgO 17-25%), повышенная – габброноритов (MgO 7-15%), высокая железистость (FeO 10-14%), содержание TiO_2 (0,6-1,4%) и щелочей (Na_2O+K_2O 1,0-4,3%, $Na_2O > K_2O$) (Белых, 2022).

Минерагения массива характеризуется прогнозируемым сульфидным медно-никелевым оруденением, связанным с ультраосновными членами ритмов. Особенности расслоенности и петрохимической эволюции (накопление Fe, Ti, летучих компонентов в верхних частях ритмов), создают благоприятные условия для ликвации сульфидного расплава.

Геодинамическая обстановка Ширяевского массива, происходила в рамках становления позднепалеопротерозойских дунит-клинопироксенит-норитовых формаций ВКМ (Белых, 2022; Чернышов, 2004). Эти формации интерпретируются как производные мантийных плюмов или субдукционно-аккреционных процессов, сформировавших рудоносные магматические системы в условиях растяжения коры. Минерагения ширяевских массивов (Cu, Ni, PGE) отражает специфику металлоносности этих геодинамических обстановок.

Таким образом, изучение минерагении и строения Ширяевского массива – ключ к пониманию рудообразующих систем цветных металлов в расслоенных интрузивах ширяевского типа и оценке их перспектив в пределах Хоперского блока и аналогичных структур.

1. Белых К.В., Геология, петрология и минерагения дифференцированных массивов ширяевского типа мамонского комплекса (Хоперский блок) // Тезисы докладов научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Н.М. Чернышова. Воронеж, 2022, С. 54 – 55.
2. Чернышов Н.М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия). Воронеж: изд. Воронеж. гос. ун-т, 2004, 448 с.

*Minerageny and Geodynamic Position of the Shiryaev-Type Intrusive Massifs of the Mamonsky Complex (Khoper Block)

Belykh K.V.
Voronezh State University, k9803422271@yandex.ru

The Shiryaev-type intrusive massifs of the Mamonsky Complex, located within the Khoper Block of the Voronezh Crystalline Massif (VCM), remain insufficiently studied, despite the identification of sulfide copper–nickel mineralization in their association (Belykh, 2022). The petrological reference body selected for investigation is the Shiryaev intrusive massif.

Detailed mineralogical–petrographic and petrochemical studies of drill core section No. 7169 (depth ~771 m) have revealed a rhythmically layered structure of the massif, represented by a sequence of rocks ranging from ultramafic (plagioperidotites) to mafic (gabbronorites, gabbros). Gabbroids predominate (ultramafic to gabbroid ratio = 1:14). The mineral assemblage includes olivine (Fa = 19–53), orthopyroxene (Fs = 23–42), clinopyroxene, hornblende (f = 37–52 mol.%), and plagioclase (An = 35–65). Petrochemically, the rocks belong to the normal-alkaline series; upward through the section and from earlier to later rhythmic units, there is an increase in SiO_2, Al_2O_3, alkalinity, and iron content, with a decrease in MgO.

The thermal model of crystallization of the main rock-forming minerals clearly distinguishes four rhythmic units (thicknesses: 100.9 m, 21.3 m, 16.8 m, 128.1 m). Each rhythm begins with melanocratic varieties (indicative of higher crystallization temperatures) and ends with leucocratic varieties (lower crystallization temperatures). Moderate magnesian content is characteristic of the ultramafics (MgO 17–25%), elevated in gabbronorites (MgO 7–15%), with high iron content (FeO 10–14%), TiO_2 (0.6–1.4%), and total alkalinity ($Na_2O + K_2O$ = 1.0–4.3%, $Na_2O > K_2O$) (Belykh, 2022).

The minerageny of the massif is characterized by a predicted sulfide copper–nickel mineralization associated with the ultramafic members of the rhythmic units. The features of rhythmic layering and petrochemical evolution (accumulation of Fe, Ti, and volatile components in the upper parts of the rhythms) create favorable conditions for sulfide melt immiscibility.

The geodynamic setting of the Shiryaev massif is associated with the development of Late Paleoproterozoic dunite–clinopyroxenite–norite formations of the VCM (Belykh, 2022; Chernyshev, 2004). These formations are interpreted as derivatives of mantle plumes or subduction–accretion processes, which generated ore-bearing magmatic systems in extensional crustal environments. The minerageny of the Shiryaev massifs (Cu, Ni, PGE) reflects the metallogenic specificity of these geodynamic regimes.

Thus, the study of the minerageny and internal structure of the Shiryaev massif is key to understanding ore-forming systems of base metals in layered intrusions of the Shiryaev type and to assessing their potential within the Khoper Block and analogous structures.

1. Belykh K.V. Geology, Petrology, and Minerageny of Differentiated Massifs of the Shiryaev Type of the Mamonsky Complex (Khoper Block). Abstracts of the Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Corresponding Member of RAS N.M. Chernyshev. Voronezh, 2022. Pp. 54–55.
2. Chernyshev N.M. Platinum-Bearing Formations of the Kursk–Voronezh Region (Central Russia). Voronezh: Voronezh State University Press, 2004. 448 p.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Геолого-геохимические особенности месторождения рения и редких металлов в вулканических газах месторождения «Вулкан Кудрявый» (о. Итуруп, Курильский район Сахалинской области)

Вольфсон А.А.[1], Марченко А.Г.[2], Штейнберг М.Г.[3], Коробов М.Л.[4]
[1]ИГЕМ РАН, sanches27@list.ru; [2]ООО «Теллур Северо-Восток», a-marchenko@yandex.ru;
[3]ООО «ИвИГ», glider12@mail.ru; [4]ООО «Институт Вулканологии», korobovml@yandex.ru

Месторождение рения и редких металлов в вулканических газах «Вулкан Кудрявый» расположено в северо-восточной части о. Итуруп (Курильские острова) на полуострове Медвежий в кратерной части активного одноименного вулкана. Источником рения и сопутствующих редких, цветных и благородных металлов является высокотемпературный металлоносный вулканический газ, выходящий на поверхность в виде парогазовых струй (фумарол) в кратерной части вулкана Кудрявый (Штейнберг и др., 2001). Подсчитанный средний расход газов на фумарольных высокотемпературных площадках составляет 402,6 кг/с, или 34700 т/сутки (Штейнберг и др., 2002). Преимущественный состав газов, кроме пара H2O (более 90% об.), это H2, CO2, SO2, H2S, HCl, в примесных количествах присутствуют инертные газы, аэрозоли различных кислот (в т.ч. HF), растворы солей и гидратов различных металлов. Наибольшие содержания Re и сопутствующих Mo, In, Sn, Zn, Bi, Cd, Pb, Tl, Cs, Rb, Sb, Ge, Cu и др. наблюдаются, как правило, в наиболее горячих газах высокотемпературных фумарольных полей (Taran et al, 1995; Коржинский и др., 2002; Чаплыгин, 2009). Государственным балансом на месторождении «Вулкан Кудрявый» учтены динамические запасы рения в эмиссии вулканического газа (Протокол от 08.07.2002) по категории С2 в количестве 36,7 т/год (Штейнберг и др., 2002).

Стратовулкан Кудрявый представляет собой позднеплейстоцен – голоценовый конус, сложенный вулканогенными породами пятой пачки богатырского вулканического комплекса, которая представлена чередованием лав андезитов, андезибазальтов, базальтов с горизонтами туфов и тефры основного и среднего состава (Ермаков и др., 2001; Ковтунович и др., 2002). Поверхность кратерной части вулкана, которая находится на высотных отметках 900-986 м, представляет собой сложно построенную систему фумарольных полей, пространственное размещение которых контролируется системой кратеров, вытянутой в северо-восточном направлении вдоль зоны магмаподводящего разлома. С северо-востока на юго-запад выделяются кратер Тукап, контролирующий размещение высокотемпературных фумарольных полей (Главное, Купол, Молибденовое) с температурами восходящих газов около 700-9000С, кратер Рениевый, на склоне которого размещается среднетемпературное поле (500-6000С), и кратер Южный с низкотемпературными полями (120-2500С). Фумарольные поля овальной формы имеют площадь от 300 до 1500 м2 (общая площадь около 6000 м2), по краям окружены корками самородной серы. Их характерной особенностью является формирование в их пределах рудных кор, сложенных большим разнообразием минералов, представленных самородными элементами (Au и его сплавы с Cu, Sn, Ag), разнообразными сульфидами: пиритом, галенитом, халькопиритом, сфалеритом и др., некоторые из которых здесь были установлены впервые (кадмоиндит CdIn2S4, кудрявит (Cd,Pb)Bi2S4, абрамовит Pb2BiSnInS7, рениит ReS2), оксидами (кварц, магнетит, гематит, молибдит и др.), молибдатами (повеллит), вольфраматами (шеелит), перренатами (KReO4), сульфатами (ангидрит, англезит и др.), галогенидами (галит, сильвин, бисмоклит BiOCl и др.), силикатами (волластонит и др.) и алюмосиликатами (авгит, эгирин и др.) (Чаплыгин, 2009). По наблюдениям вулканологов, процесс эксгаляционного минералообразования на вулкане является динамическим, т.е. сопровождается возникновением и исчезновением вновь образовавшихся минералов в зависимости от условий рудоотложения, которые регулируются очень узким интервалом температуры и условий окружающей среды для отдельно взятого минерала (Чаплыгин, 2009). Так, например, в случае незначительного повышения температуры вулканического газа на 20-300С фронт рудоотложения перемещается в

воздушную среду над поверхностью фумарол, и минералообразования не происходит. И наоборот, в случае понижения температуры на 20-300С фронт рудоотложения смещается вниз под поверхность фумарол, и процесс минералообразования либо идет в приповерхностном слое вулканических отложений, либо минералы вообще не отлагаются из-за отсутствия окислительно-восстановительного барьера.

Согласно представлениям геологов и вулканологов, изучавших вулкан Кудрявый и его фумарольную деятельность в течение последних 25 лет, становление современного состояния вулканической активности произошло около 140 лет назад и было связано с последним магматическим извержением вулкана с 1779 по 1883 г., в результате которого излился андезито-базальтовый лавовый поток Черныш и произошло внедрение субвулканической интрузии андезитового состава, проекция которой на дневную поверхность совпадает с положением высокотемпературного поля Купол. Результаты мониторинговых наблюдений за температурой и составом газов за последние 25 лет показывают, что состав и температура газов находятся в квазистационарном состоянии с небольшими вариациями в течение года в зависимости от погодных условий, что говорит о стабильном режиме дегазации вулкана. Землетрясение магнитудой 5,7 балла, произошедшее 31 июля 2017 г. около 7 часов утра по местному времени на глубине 86 км с эпицентром примерно в 200 км к северу за о. Уруп, привело к активизации вулкана Кудрявый. В результате температура в поле Кратер значительно поднялась, образовались новые фумаролы, а остальные фумарольные поля на фоне менее значительного повышения температуры (примерно на 1000С) увеличились по площади. В течение трех суток после землетрясения активность вулкана снижалась, что выразилось в снижениии скорости потока вулканических газов, прекращении горения самородной серы на краях фумарольных полей и понижении температуры газов, т.е. газодинамическая система вулкана Кудрявый начала возвращаться в свое квазистационарное состояние (Хрол и др., 2017).

По данным сейсмических исследований (Жигулев, Аргентов, 2000; Жигулев, 2010; Чаплыгин, 2009) под конусом кратера Тукап сформировалась субвертикальная магматическая колонна диаметром несколько десятков метров, апикальная часть которой находится на глубине 300–600 м. Эта колонна связана с магматическим очагом, расположенным на глубине 4–8 км. Конвекция в магматической колонне, соединяющей область газоотделения и магматический очаг, является процессом, объясняющим стационарность фумарольных систем.

Для выяснения геохимической специализации отложений фумарольных полей как косвенного индикатора состава и металлоносности вулканического газа, получения тепловой картины фумарольных полей и установления взаимосвязей между температурой вулканического газа и его металлоносностью в 2015 г. были проведены литогеохимическая и тепловая съемки кратерной части вулкана Кудрявый в масштабе 1:2500 по сети 25х25 м (Марченко и др., 2020), а в 2016 г. – литогеохимическая и тепловая съемки фумарольного поля Молибденовое в масштабе 1:400 по сети 4х4 м (Хрол и др., 2017; Марченко и др., 2019).

По результатам литогеохимической и тепловой съемок было установлено, что в вулканогенных отложениях фумарольных полей происходит накопление Re, Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, In, Mo, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, W, Zn, в меньшей степени Ge, Rb, Cs. Выявлена прямая корреляция между температурой восходящих газов и геохимической специализацией фумарольных полей. Наблюдается латеральная зональность литогеохимических полей в направлении с северо-востока на юго-запад, от наиболее горячего поля Купол в сторону менее горячих полей, которая описывается следующим рядом: Re, Mo, W, Au, Cu, Ag, Zn, (Cs, Ge) $\rightarrow$ In $\rightarrow$ Bi, Cd, Pb, Sn, Tl $\rightarrow$ As, Sb, Se, Te, (Cu, Ag, Au), отражая зональность размещения эксгаляционной рудной минерализации от высокотемпературной к средне- и низкотемпературной. Статистическая обработка данных опробования фумарольных корок показала, что содержания элементов имеют значимые положительные коэффициенты корреляции с температурой, однако зависимость существенно отклоняется от линейной. Рудные элементы имеет температурные интервалы максимального отложения из

фумарольных газов: например, Ge 700–800oC, Re 550–650oC, In 500–600oC (Марченко и др., 2020). Если обоснованно предположить, что существует прямая пропорциональная зависимость между концентрацией компонента в фумарольном газе и отложениях фумарольных полей, то это означает, что промышленную добычу вулканического газа с получением из него редкометального концентрата следует в перспективе проводить на участках фумарольных полей, оконтуренных по изотерме не менее 450-5000С. С этой точки зрения, наиболее перспективными на промышленное извлечение Re, In, Ge и других редких металлов являются высокотемпературные фумарольные поля.

В результате проведенных исследований можно высказать предположение, что кратерная часть вулкана Кудрявый с системой фумарольных полей в ее пределах представляет собой верхний уровень современной активной порфирово-эпитермальной системы, которая, согласно модели (Sillitoe, 2010), находится на раннем этапе ее развития. При этом на глубине нескольких километров происходит формирование золото-молибден-медно-порфирового оруденения, в приповерхностных условиях – эпитермального оруденения, а в фумарольных полях на поверхности – эксгаляционного оруденения. Установленная геохимическая зональность в кратерной части вулкана Кудрявый отражает типичную зональность порфирово-эпитермальных систем.

Результаты определения микроэлементного состава фумарольных газов вулкана Кудрявый, включая определения Re, In, Ge и других металлов, полученные разными авторами с использованием различных методов отбора, химической подготовки и анализа газовых проб, существенно различаются, иногда на 2-3 порядка. Наиболее высокие содержания рения и его спутников в парогазовой смеси были получены методом с улавливанием металлов с помощью фильтров-сорбентов (работы «ИВиГ»). Можно полагать, что этим методом металлы улавливались не только и не столько из газообразной составляющей, сколько из потока твердых частиц пылеватой размерности, несомых потоками фумарольных газов.

Таким образом, вулканические газы вулкана Кудрявый являются потенциальным источником получения из них рения и других редких металлов. При этом экономическую ценность будут представлять не только рений, но и его спутники. Так, например, несмотря на более низкую стоимость германия (1,29 US$/g) и индия (0,23 US$/g) относительно рения (2,6 US$/g), экономический эффект от их добычи и переработки может значительно увеличить тот вклад, который вносит в экономику только рений. Таким образом, оценка содержаний индия, германия и других металлов в фумарольных газах, вместе с поиском и разработкой технологии их извлечения, является первоочередной задачей для геолого-экономической оценки месторождения и принятия решения о целесообразности его освоения.

Результатами технологических исследований, проведённых с 1994 по 2002 г., была доказана принципиальная возможность сорбционного или кристаллизационного извлечения рения из фумарольных газов с температурой 500-550°С на природном сорбенте (цеолите). В 2002 г. из насыщенного рением цеолита был получен товарный продукт – перренат аммония, при этом суммарное извлечение рения из цеолита в товарный продукт составило 88,6%.

В 2015 г. на месторождении «Вулкан Кудрявый» были проведены крупнообъемные технологические исследования по технологии сорбции и фильтрации, в процессе которых экспериментальная установка проработала в непрерывном режиме 120 часов и переработала 51 т вулканического газа. В результате был получен редкометальный концентрат общей массой 7,1 кг, который содержал 1% рения. Извлечения рения из вулканического газа, согласно расчетам технологов, составило не менее 70%. К сожалению, в полученном редкометальном концентрате оказался пока только рений. Уловить другие элементы использованным методом не удалось. Приоритетным направлением будущих исследований является поиск технологических решений для комплексного извлечения всех ценных компонентов в редкометально-благороднометальный концентрат, аддитивная стоимость всех полезных компонентов которого определит экономическую целесообразность их извлечения в промышленных масштабах.

В результате проведенных исследований и термодинамического моделирования было установлено, что редкие и благородные металлы в высокотемпературных вулканических газах переносятся как в форме заряженных частиц – катионов, так и в виде нейтральных соединений: сульфидов, оксидов, хлоридов и фторидов (Чураков и др., 2000). С целью комплексного извлечения из металлоносного вулканического газа соединений редких и благородных металлов планируется разработка и применение комбинированной технологии, которая будет включать в себя электрохимическое восстановление катионов редких и благородных металлов на катоде и улавливание содержащихся в газе твердых соединений редких металлов на фильтрах. Результаты технологических исследований 2002-2017 гг. свидетельствуют, что применение комбинированной технологии позволит достичь плановой производительности промышленной установки, которая в соответствии с условиями лицензионного соглашения должна составить 2,25 млн.т/год вулканического газа со средним содержанием рения 0,5-1,0 г/т. Для этого необходимо обеспечить сбор газа с площади около 600 м2, что позволит получать около 300 т редкометального концентрата в год, содержащего не менее 3 т рения.

Учитывая результаты технологических исследований, проведенных ООО «ИВиГ» и показавших принципиальную возможность извлечения ценных компонентов из высокотемпературного металлоносного вулканического газа, можно сделать вывод о том, что, по-видимому, мы стоим на пороге открытия нового промышленного газодинамического типа месторождений, который имеет признаки большеобъемных объектов с воспроизводимыми запасами стратегического минерального сырья. В перспективе открывается возможность достичь экономически выгодной технологии его переработки. Если это будет реализовано, это станет прорывом мирового уровня в области разведки и промышленного освоения месторождений полезных ископаемых. Откроется перспектива вовлечения в эксплуатацию других газодинамических месторождений Тихоокеанского вулканического пояса, который охватывает около 1/3 части суши Земли.

1. Ермаков В.А., Знаменский В.С., Штейнберг Г.С. Петрология вулкана-кальдеры Медвежья (Курильские острова). // Известия РАЕН, секция “Науки о Земле”, 2001, вып. 6. С. 97-118.
2. Марченко А.Г., Вольфсон А.А., Морозов М.В., Хрол Н.С., Штейнберг Г.С., Штейнберг М.Г. Геохимические особенности вулканогенных отложений и эксгаляционой минерализации в кратерной части активного вулкана Кудрявый (остров Итуруп Курильской гряды). // Геология рудных месторождений, 2020, Т. 62, № 2. С. 134-150.
3. Марченко А.Г., Морозов М.В., Хрол Н.С., Тарасов А.Б. Обработка, картографирование и интерпретация геохимических данных по Молибденовому фумарольному полю вулкана Кудрявый и участку Амёба (о. Итуруп, Курильский район Сахалинской области). Отчет по договору № 17-05-19 с ООО «ИВиГ». – СПб, ООО «Теллур С-В», 2019.
4. Хрол Н.С., Марченко А.Г., Кудряшов В.А. Предварительный отчет о проведении литогеохимической и тепловой съемки на месторождении рения и редких металлов в вулканических газах «Вулкан Кудрявый» по договору № 15-05-17-2. – СПб, ООО «Теллур СЗ», 2017.
5. Чаплыгин И.В. Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана «Кудрявый» (о. Итуруп, Курильские о-ва). Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва. 2009. 186 с.
6. Штейнберг Г.С., Шадерман Ф.И., Ермаков В.А. и др. Поисково-оценочные работы по оценке запасов рения на рудопроявлении вулкана Кудрявый (о.Итуруп). Отчет о работах по госконтракту № 17-98. Фонды СТГФ, Южно-Сахалинск, 2001. 264 с.
7. Штейнберг Г.С., Шадерман Ф.И., Соловьёв А.В., Штейнберг М.Г. Подсчёт запасов редких металлов в фумарольных газах (по результатам опробования рудопроявления «Вулкан Кудрявый» на о. Итуруп, Курильские острова в 1995-2002 гг.). – М., Институт вулканологии и геодинамики, 2002. 30 с.

8. Чураков С.В., Ткаченко С.И., Коржинский М.А., Бочарников Р.Е., Шмулович К.И. Термодинамическое моделирование эволюции состава высокотемпературных фумарольных газов вулкана Кудрявый, о. Итуруп, Курильские о-ва // Геохимия. − 2000. − № 5. − С. 485-501.

*Geological and Geochemical Features of the Rhenium and Rare Metal Deposit in Volcanic Gases of the “Kudryavy Volcano” Deposit (Iturup Island, Kuril Region, Sakhalin Oblast)

Volfson A.A.[1], Marchenko A.G.[2], Steinberg M.G.[3], Korobov M.L.[4]
[1]IGEM RAS, sanches27@list.ru; [2]Tellur Severovostok LLC, a-marchenko@yandex.ru; [3]IvIG LLC, glider12@mail.ru; [4]Institute of Volcanology LLC, korobovml@yandex.ru

The rhenium and rare metal deposit in volcanic gases of the “Kudryavy Volcano” is located in the northeastern part of Iturup Island (Kuril Islands) on the Medvezhy Peninsula, within the crater of the active volcano of the same name. The source of rhenium and associated rare, base, and precious metals is a high-temperature metal-bearing volcanic gas discharged at the surface in the form of steam–gas jets (fumaroles) within the crater area of Kudryavy Volcano (Steinberg et al., 2001). The average gas discharge at high-temperature fumarolic sites has been estimated at 402.6 kg/s or 34,700 tons/day (Steinberg et al., 2002).

The predominant composition of the gases, besides water vapor (over 90% vol.), includes H_2, CO_2, SO_2, H_2S, and HCl; minor components include inert gases, aerosols of various acids (including HF), and salt and hydrate solutions of various metals. The highest concentrations of Re and associated Mo, In, Sn, Zn, Bi, Cd, Pb, Tl, Cs, Rb, Sb, Ge, Cu, and others are typically observed in the hottest gases from the high-temperature fumarolic fields (Taran et al., 1995; Korzhinsky et al., 2002; Chaplygin, 2009).

According to the state reserve balance, the dynamic reserves of rhenium in the volcanic gas emissions at the “Kudryavy Volcano” deposit were officially accounted in 2002 under category C2, amounting to 36.7 t/year (Protocol dated 08.07.2002; Steinberg et al., 2002).

Kudryavy is a stratovolcano of Late Neopleistocene–Holocene age, composed of volcanic rocks from the fifth unit of the Bogatyr Volcanic Complex, which consists of alternating andesite, andesibasalt, and basalt lava flows interbedded with tuff and tephra layers of basic to intermediate composition (Ermakov et al., 2001; Kovtunovich et al., 2002). The crater area of the volcano, located at elevations between 900 and 986 m, forms a structurally complex fumarolic field system. The spatial distribution of the fields is controlled by a crater chain aligned in a northeast direction along the zone of a magma-feeding fault.

From northeast to southwest, the following craters can be distinguished: the Tukap Crater, which controls the location of high-temperature fumarolic fields (Glavnoye, Kupol, Molybdenum) with ascending gas temperatures of approximately 700–900 °C; the Rhenium Crater, on whose slope the medium-temperature field (500–600 °C) is located; and the Southern Crater with low-temperature fields (120–250 °C). The fumarolic fields are oval in shape, ranging from 300 to 1500 m² in area (total area about 6000 m²), and are bordered by crusts of native sulfur. A characteristic feature of these fields is the formation of ore crusts composed of a wide variety of minerals, including native elements (Au and its alloys with Cu, Sn, Ag), various sulfides (pyrite, galena, chalcopyrite, sphalerite, etc.), some of which were identified here for the first time—such as cadmoindite ($CdIn_2S_4$), kudryavite ($(Cd,Pb)Bi_2S_4$), abramovite ($Pb_2BiSnInS_7$), and rheniite (ReS_2).

Also identified were oxides (quartz, magnetite, hematite, molybdite), molybdates (powellite), tungstates (scheelite), perrhenates ($KReO_4$), sulfates (anhydrite, anglesite), halides (halite, sylvite, bismoclite—BiOCl), silicates (wollastonite), and aluminosilicates (augite, aegirine) (Chaplygin, 2009). According to volcanologists, the process of exhalative mineral formation at the volcano is dynamic, i.e., accompanied by the appearance and disappearance of newly formed minerals depending on the ore deposition conditions, which are regulated by a very narrow range of temperature and environmental conditions for each individual mineral (Chaplygin, 2009).

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

For example, a slight increase in volcanic gas temperature by 20–30 °C can shift the deposition front into the air above the fumarole surface, halting mineral formation. Conversely, a temperature decrease of 20–30 °C can move the deposition front beneath the fumarole surface, resulting in mineral formation within the near-surface volcanic deposits—or, in the absence of a redox barrier, no mineral precipitation at all.

According to geologists and volcanologists who have studied Kudryavy Volcano and its fumarolic activity over the past 25 years, the establishment of its current state of volcanic activity occurred approximately 140 years ago and was associated with the last magmatic eruption of the volcano between 1779 and 1883. This event produced the andesibasaltic lava flow “Chernysh” and resulted in the emplacement of a subvolcanic intrusion of andesitic composition, whose surface projection coincides with the location of the high-temperature Kupol field.

Monitoring data on the temperature and chemical composition of the gases over the past 25 years show that both remain in a quasi-stationary state, with only minor seasonal variations due to weather conditions—indicating a stable degassing regime for the volcano.

An earthquake of magnitude 5.7, which occurred on July 31, 2017, at around 7 a.m. local time at a depth of 86 km and with an epicenter approximately 200 km north of Urup Island, led to an intensification of activity at Kudryavy Volcano. As a result, temperatures in the Krater field significantly increased, new fumaroles formed, and other fumarolic fields expanded in area, with a temperature rise of about 100 °C. Over the next three days, volcanic activity decreased, expressed by reduced gas flow rates, cessation of native sulfur combustion on the field margins, and gas temperature decline—indicating that the volcano’s gas-dynamic system was returning to its quasi-stationary state (Khrol et al., 2017).

Seismic studies (Zhigulev, Argentov, 2000; Zhigulev, 2010; Chaplygin, 2009) have revealed the formation of a subvertical magmatic column beneath the Tukap crater cone, with a diameter of several tens of meters. Its apical part lies at a depth of 300–600 m and is connected to a magma chamber located at a depth of 4–8 km. Convection within this magmatic column—linking the degassing zone and the magma chamber—is the key process explaining the stability of the fumarolic systems.

To determine the geochemical specialization of fumarolic field deposits as an indirect indicator of the composition and metal-bearing potential of volcanic gases, as well as to obtain a thermal map of the fumarolic fields and establish correlations between gas temperature and metal content, lithogeochemical and thermal surveys were conducted. In 2015, a survey of the crater area of Kudryavy Volcano was carried out at a scale of 1:2500 with a 25×25 m sampling grid (Marchenko et al., 2020), and in 2016, a more detailed survey of the Molybdenum fumarolic field was conducted at a scale of 1:400 using a 4×4 m grid (Khrol et al., 2017; Marchenko et al., 2019).

Based on the results of these surveys, it was established that volcanic deposits of the fumarolic fields accumulate Re, Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, In, Mo, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, W, and Zn, with lesser amounts of Ge, Rb, and Cs. A direct correlation was identified between the temperature of the ascending gases and the geochemical specialization of the fumarolic fields.

A lateral geochemical zoning was observed across the fumarolic fields from northeast to southwest, starting from the hottest Kupol field toward cooler fields. This zoning is described by the following elemental sequence:

Re, Mo, W, Au, Cu, Ag, Zn, (Cs, Ge) → In → Bi, Cd, Pb, Sn, Tl → As, Sb, Se, Te, (Cu, Ag, Au),

reflecting the zoning of exhalative ore mineralization from high- to medium- and low-temperature zones.

Statistical analysis of elemental concentrations in fumarolic crust samples revealed significant positive correlations with gas temperature, although the relationship deviates substantially from linearity. Each ore element has a specific temperature range for maximum deposition from fumarolic gases: for example, Ge precipitates most abundantly at 700–800 °C, Re at 550–650 °C, and In at 500–600 °C (Marchenko et al., 2020).

Assuming a direct proportional relationship between the concentration of an element in the volcanic gas and in the fumarolic deposits, it follows that industrial-scale gas extraction for rare metal concentrate production should target areas of the fumarolic fields outlined by isotherms of at least 450–500 °C. From this perspective, the high-temperature fumarolic fields are the most promising for commercial extraction of Re, In, Ge, and other rare metals.

The conducted research suggests that the crater area of Kudryavy Volcano, with its fumarolic field system, represents the upper level of an active porphyry–epithermal system that, according to the model proposed by Sillitoe (2010), is currently at an early stage of development. At depths of several kilometers, a gold–molybdenum–copper porphyry mineralization is forming, while epithermal mineralization develops in near-surface settings, and exhalative mineralization is observed at the surface within the fumarolic fields. The identified geochemical zoning in the crater area of Kudryavy Volcano reflects the typical vertical zoning pattern of porphyry–epithermal systems.

Results of microelement composition analysis of Kudryavy fumarolic gases, including Re, In, Ge, and other metals, obtained by various authors using different sampling, chemical preparation, and analytical techniques, vary considerably—sometimes by 2–3 orders of magnitude. The highest concentrations of rhenium and its satellite elements in steam–gas mixtures were recorded using the sorbent-filter method developed by IvIG. It is assumed that this method captured metals not only from the gas phase but also from fine solid particles carried by the fumarolic gas flow.

Thus, the volcanic gases of Kudryavy Volcano are a potential source for the extraction of rhenium and other rare metals. Moreover, the economic value lies not only in rhenium itself but also in its associated elements. For instance, although germanium (1.29 US$/g) and indium (0.23 US$/g) are less valuable than rhenium (2.6 US$/g), the economic benefit from their joint extraction could significantly exceed that of rhenium alone. Therefore, the assessment of indium, germanium, and other metals in fumarolic gases, along with the development of extraction technologies, is a priority for the geological–economic evaluation of the deposit and determining the feasibility of its commercial development.

Technological studies conducted from 1994 to 2002 demonstrated the fundamental possibility of extracting rhenium from fumarolic gases at temperatures of 500–550 °C via sorption or crystallization onto a natural sorbent (zeolite). In 2002, a commercial product—ammonium perrhenate—was obtained from rhenium-saturated zeolite, with an overall rhenium recovery rate from zeolite to the final product reaching 88.6%.

In 2015, large-scale technological tests were conducted at the “Kudryavy Volcano” deposit using sorption and filtration methods. During this process, the experimental installation operated in continuous mode for 120 hours and processed 51 tons of volcanic gas. As a result, a rare-metal concentrate weighing 7.1 kg was obtained, containing 1% rhenium. According to process engineers, the rhenium recovery from the volcanic gas was at least 70%. Unfortunately, only rhenium was captured in the resulting concentrate; the method used failed to retain other elements. Therefore, a top priority for future research is the development of technologies for comprehensive recovery of all valuable components into a rare- and precious-metal concentrate. The total additive value of these components will ultimately determine the economic feasibility of full-scale commercial extraction.

Thermodynamic modeling and experimental studies have shown that rare and precious metals in high-temperature volcanic gases are transported both as charged species (cations) and as neutral compounds—sulfides, oxides, chlorides, and fluorides (Churakov et al., 2000). To enable comprehensive recovery of rare and precious metal compounds from metal-bearing volcanic gas, a combined technological approach is planned. This includes electrochemical reduction of metal cations at the cathode, along with the capture of solid rare-metal particles in the gas phase using filters.

Technological research carried out from 2002 to 2017 indicates that such a combined technology could achieve the target processing capacity of an industrial installation, which under the license agreement terms should reach 2.25 million tons of volcanic gas annually, with an average rhenium content of 0.5–1.0 g/t. To meet this goal, it is necessary to collect gas over an area of about

600 m², which would enable the production of approximately 300 tons of rare-metal concentrate per year containing no less than 3 tons of rhenium.

Given the technological results obtained by IvIG LLC, which have confirmed the fundamental feasibility of extracting valuable components from high-temperature metal-bearing volcanic gases, it may be concluded that we are likely on the threshold of discovering a new industrial gas-dynamic deposit type. This new type is characterized by large-scale resources of renewable strategic mineral raw materials. In the future, this may lead to the development of economically viable processing technologies. If realized, this would represent a world-class breakthrough in the field of exploration and industrial development of mineral deposits. It would also open the possibility of exploiting other gas-dynamic deposits along the Pacific volcanic belt, which encompasses approximately one-third of the Earth's land surface.

1. Ermakov V.A., Znamensky V.S., Steinberg G.S. Petrology of the Medvezhya Volcano–Caldera (Kuril Islands). Proceedings of the Russian Academy of Natural Sciences, Section "Earth Sciences". 2001. Issue 6. Pp. 97–118.
2. Marchenko A.G., Volfson A.A., Morozov M.V., Khrol N.S., Steinberg G.S., Steinberg M.G. Geochemical Features of Volcanogenic Deposits and Exhalative Mineralization in the Crater Area of the Active Kudryavy Volcano (Iturup Island, Kuril Island Arc). Geology of Ore Deposits. 2020. Vol. 62. No. 2. Pp. 134–150.
3. Marchenko A.G., Morozov M.V., Khrol N.S., Tarasov A.B. Processing, Mapping, and Interpretation of Geochemical Data for the Molybdenum Fumarolic Field of Kudryavy Volcano and the Amoeba Area (Iturup Island, Kuril Region, Sakhalin Oblast). Report under contract No. 17-05-19 with IvIG LLC. St. Petersburg, Tellur North-East LLC, 2019.
4. Khrol N.S., Marchenko A.G., Kudryashov V.A. Preliminary Report on Lithogeochemical and Thermal Surveys at the "Kudryavy Volcano" Rhenium and Rare Metal Deposit. Contract No. 15-05-17-2. St. Petersburg, Tellur North-West LLC, 2017.
5. Chaplygin I.V. Ore Mineralization of High-Temperature Fumaroles of the "Kudryavy" Volcano (Iturup Island, Kuril Islands). PhD Thesis (Geology and Mineralogy). Moscow, 2009. 186 p.
6. Steinberg G.S., Shaderman F.I., Ermakov V.A. et al. Prospecting and Evaluation Works for Rhenium Resources at the Kudryavy Volcano Ore Occurrence (Iturup Island). Report on State Contract No. 17-98. STGF Archives, Yuzhno-Sakhalinsk, 2001. 264 p.
7. Steinberg G.S., Shaderman F.I., Solovyov A.V., Steinberg M.G. Calculation of Rare Metal Reserves in Fumarolic Gases (Based on Sampling of the "Kudryavy Volcano" Ore Occurrence, Iturup Island, Kuril Islands, 1995–2002). Moscow, Institute of Volcanology and Geodynamics, 2002. 30 p.
8. Churakov S.V., Tkachenko S.I., Korzhinsky M.A., Bozharnikov R.E., Shmulovich K.I. Thermodynamic Modeling of the Evolution of High-Temperature Fumarolic Gas Composition at Kudryavy Volcano, Iturup Island, Kuril Islands. Geochemistry. 2000. No. 5. Pp. 485–501.

Научно-методические основы экологической оценки территорий геологического риска

Вольфсон И.Ф.
ФГБУ «ИМГРЭ», rosgeo@yandex.ru

Предприятия горной отрасли и сопутствующие им технологические процессы и их производные несут на себе черты сходства с явлениями и продуктами вулканизма, сейсмичности, тектоно-магматической активизации и современной флюидной активности, характеризующиеся в том и другом случаях масштабными загрязнением компонентов окружающей среды химическими элементами и соединениями.

Например, в процессе катастрофического извержения филиппинского вулкана Пинатубо в 1991 г. в природные среды было привнесено порядка 10 млрд. тонн магмы, содержавшей огромные концентрации SO2, Zn, Cd, Ni, Cu, As, Cr, Hg, изменившие геохимический фон на значительной по масштабу территории планеты (Essentials 2005). Масштабы деятельности вулканов Камчатки, влияние продуктов извержений на окружающую среду и здоровье населения детально изучались и отражены в работах (Федотов и др., 1987; Кулаков и др., 2005; Викулин и др., 2016; Вольфсон, 2022).

В то же самое время, масса рассеянной в радиусе 15-20 км в природных средах и атмосфере техногенной пыли от одного лишь Нерюнгринского угольного месторождения Якутии оценивалась в 46 тысяч тонн. Ежегодно на один км кв. территории месторождения выпадает 5,2 т пыли, в которой содержится более 20 химических элементов - кальций, магний, сера, титан, марганец, галлий, кобальт, цинк, медь, фосфор в токсических концентрациях представляющих угрозу окружающей среде (Вольфсон и др., 2013). Добыча угля приводит к вскрытию продуктивных пластов, их интенсивному окислению, вплоть до возникновения угольных пожаров и, соответственно, миграции химических элементов в углях, включая высокотоксичные ртуть и таллий. Возникающие техногенные геохимические потоки элементов трансформируют ранее существовавшие природные геохимические поля, изменяя сложившийся баланс в системе «био и гео», создавая опасные медико-экологические обстановки при осуществлении профессиональной деятельности и в среде проживания человека.

При сегодняшних масштабах антропогенной деятельности, сравнимой с геологическими планетарными процессами и откликами на них странового, регионального и локального масштабов, становится все труднее разделить естественные и техногенные потоки вещества в объектах окружающей среды. Происходящие в окружающей среде процессы отражаются в изменении уровней накопления химических элементов в живом веществе, и, в том числе в органах и тканях организма человека, функционирующего в той или иной природной или техногенной обстановке (Рихванов и др., 2013). Значительный интерес в этой связи вызывают результаты медико-экологических исследований, проведенных учеными и практиками Университета Азорских островов. Ими изучался химический состав волос мужского населения различных возрастных групп, постоянно проживающих в районах активной термальной деятельности на Азорских островах, высокоразрешающим методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). В пробах волос были установлены высокие содержания таких элементов, как Cd (до 96.9 ppb), Cu (до 16.2 ppm), Pb (до 3417.6 ppb), Rb (до 216.3 ppb) и Zn (до 242.8 ppm), и низкие Se (469.6 ppb), что доказывает получение населением, проживающим в условиях постоянного воздействия продуктов активных геодинамических процессов, значительных доз тяжелых металлов – кадмия, свинца, цинка, меди и др. при низких компенсаторных концентрациях важного для жизнедеятельности человека ультамикроэлемента селена (Amaral et al. 2008). Такого рода естественно природная эколого-геохимическая обстановка и ее количественные геохимические параметры, согласно выводам авторов, сопоставимы с поступлением химических элементов в токсичных концентрациях в окружающую среду от деятельности металлургических предприятий,

сопровождаемым тяжелыми медицинскими последствиями для населения, вплоть до развития онкологических заболеваний.

На основании анализа опубликованных результатов ряда эколого-геохимических исследований, автором была выдвинута гипотеза об аналогичных обстановках и последствиях воздействия продуктов производственных процессов на население горнодобывающих территорий. Для подтверждения выдвинутой гипотезы в начале 2010-х гг. им в составе временного трудового коллектива Российского геологического общества было осуществлено медико-социальное анкетирование населения Читинской обл., подтвердившее, с высокой долей вероятности, воздействие геологических факторов на здоровье населения, которое проявилось в распространении гипертонической болезни, сердечно-сосудистых заболеваний и болезней верхних дыхательных путей у более, чем трети респондентов, проживавших вблизи горнодобывающих предприятий. Полученные данные оказались сопоставимыми с таковыми, установленными по результатам анкетирования населения пос. Усть-Камчатск (Камчатский край), проведенного в середине 2000-х гг., где медико-экологические проблемы еще более отчетливо проявились на фоне природно-климатических, геоэкологических (два действующих вулкана в радиусе менее 100 км от поселка) и социальных условий проживания населения (табл.1) (Кулаков и др., 2005). (По итогам более поздних оценок на фоне возросшей активности вулканов Шивелуч и Сопка Ключевская повысился риск легочных заболеваний в когорте населения 14-17 лет).

Таблица 1. Общие показатели состояние здоровья жителей Усть-Камчатского района (по Кулакову и др., 2005)

Состояние здоровья населения Усть-Камчатского р-на	Взрослые, %	Лица до 18 лет, %
Здоровы	25,8	38,9
Нуждаются в диспансерном наблюдении узких специалистов	36,8	32,6
Нуждаются в обследовании в стационаре	21,2	17,6
Нуждаются в лечении в больнице	16,2	10,9

Таким образом, приводимые примеры исследований и их результаты свидетельствуют о схожих проблемах загрязнения окружающей среды и их влияния на здоровье населения, проживающего в границах областей природных (вулканические области: Азорские острова, Камчатка и др.) и техногенных геоэкологических рисков (горнодобывающие предприятия Якутии и Забайкалья и др.), выражающиеся в развитии сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний и обострении хронических болезней на фоне неблагоприятных геоэкологических обстановок, влияющих на условия труда и проживания в закритичных природно-климатических обстановках. Преодоление сложившихся и предотвращение развития неблагоприятных тенденций в будущем, по мнению автора, возможно путем создания комплексной методологии оценки экологической опасности, основанной на принципах «раннего обнаружения» и моделирования обстановок воздействия на компоненты окружающей природно-геологической среды и их последствий для здоровья человека (далее «Методология») (Вольфсон, 2014). Создание Методологии, во все большей степени,

увязывается с результатами исследований в области перспективных направлений пограничья естественнонаучных дисциплин, в частности медицинской геологии – актуального направления наук о Земле, являющегося частью экологической геологии, призванного изучать состояние здоровья человека и других представителей биоты, находящихся под постоянным воздействием геологических объектов, процессов и явлений естественно-природного и техногенного происхождения. Достижения китайских коллег в части оценки и изучения механизмов возникновения и развития эндемических и экологозависимых заболеваний хорошо известны. Например, в приграничных с российским Дальним Востоком районах Китайской Народной Республики установлены ареалы распространения тяжелых эндемических заболеваний, таких как «болезнь Кашина-Бека» (Уровская болезнь) и «Болезнь провинции Кешан» (Кешанская болезнь), связанных с дефицитом селена в жизнеобеспечивающих средах. Проблемная территория простирается от границы с Россией на северо-востоке Китая и имеет продолжение в юго-западном направлении на тысячи километров, вплоть до южной провинции КНР - Гуйчжоу.

Очевидно, что вытянутый линейный характер неблагополучной в плане распространения тяжелых эндемических заболеваний населения территории может быть связан с серией региональных структур, чьи металлогенические и геолого-геохимические характеристики и их возможное продолжение на территории России вызывают повышенный интерес. Трансграничная территория потенциального экологического риска может стать объектом совместного с китайскими коллегами проекта НИР по выявлению и оконтуриванию неблагополучных в медико-геологическом аспекте территорий и в России. Важность такого рода совместных исследований заключается в том, что приграничные территории российского Дальнего Востока известны самыми разнообразными месторождениями полезных ископаемых, находящимися в отработке, а также многочисленными территориями, перспективными на обнаружение новых золоторудных объектов и проявлений и месторождений руд полиметаллов, входящих в границы потенциального развития эндемических заболеваний. Проживание и осуществление профессиональной деятельности в таких районах может иметь негативный синергетический медико-экологический эффект для населения, так или иначе вовлеченного в производственные процессы, которое может оказаться под воздействием избыточных токсичных концентраций химических элементов-продуктов производственных процессов при одновременном дефиците в пищевых цепях важного ультрамикроэлемента - селена, ответственного за защиту иммунной системы человека, компенсирующего токсический эффект тяжелых металлов и металлоидов - кадмия, ртути и мышьяка.

Подытоживая сказанное, автор предлагает рассмотреть некоторые рекомендации, которые могут стать основой создания Методологии экологической оценки территорий геоэкологического риска.

В частности, предлагается:

1. Осуществлять планирование поисковых и геологоразведочных работ, проектирование и строительство новых объектов горнопромышленного комплекса, минерально-сырьевых центров экономического развития с учетом знаний, опыта и навыков медицинской геологии, с использованием результатов акцентированного изучения природно-климатических, минералого-геохимических и геологических особенностей территорий работ, которые могут влиять на здоровье профессионалов-геологов, работников предприятий горно-геологической отрасли и населения.

2. Проводить регулярный мониторинг состояния окружающей среды и здоровья работников предприятий отрасли и населения, основанный на данных медико-экологического и социально-экономического анкетирования населения вовлеченного в производственные процессы, проживающего на территориях геологического риска.

3. Проверенные годами результаты изучения геологических и минералого-геохимических особенностей территорий, должны стать научно-методической основой современных подходов прогнозирования и выявления ресурсов недр, оценки факторов

экологических рисков в целях безопасного и продуктивного использования геологической среды, устойчивого экономического развития регионов с одновременным обеспечением высокого уровня условий проживания и безопасного осуществления профессиональной деятельности населения.

4. Применять инновационные подходы и решения в оценке геологических и медико-экологических рисков перспективных территорий геологоразведочных работ и строительства горнодобывающих предприятий на основе результатов, получаемых при обработке больших баз данных результатов геохимических работ с применением ГИС и искусственного интеллекта.

В процессе работы по созданию методологии экологической оценки территорий геоэкологического риска необходимо осуществить поворот геологии к нуждам людей путем активного участия работников геологической и горной отраслей в разработке социальных, экономических и экологических проектов освоения перспективных территорий. При этом должно произойти существенное повышение общественного статуса геологической науки и практики и престижа профессии геолога.

1. Викулин А.В., Вольфсон И.Ф, Грачев Л.А., Долгая А.А. Геология, медицина и социум // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2015. № 1(25). С. 41-55.
2. Вольфсон И.Ф. Научно-методические основы медико-экологической безопасности территорий минерально-сырьевых центров экономического развития // На перекрестке Севера и Востока (методологии и практики регионального развития) : материалы IV Международной научно-практической конференции, Магадан, 17–18 ноября 2022 года / Северо-Восточный государственный университет. – Красноярск: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-инновационный центр", 2023. С. 62-75. DOI 10.12731/978-5-907608-10-8-art9. – EDN EAWGLQ.
3. Вольфсон И.Ф. О некоторых моделях формирования геохимических аномалий и их значении в решении задач прикладной геоэкологии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. №2. С. 55-61.
4. Вольфсон И.Ф., Дасаева Л.А., Матюхина Е.Б., Фаррахов Е.Г. Климатогеографические, социальные и экологические проблемы здоровья населения Якутии // Жизнь без опасностей. №1 2013. С. 80-83.
5. Кулаков В.Н., Голованов А.В., Высоцкий В.В. Влияние экстремальных природно-климатических условий на состояние здоровья населения региона // Проблемы возникновения донозологических и патологических состояний в условиях мегаполисов: материалы первой международной научной конференции «Донозология 2005». Под общей редакцией профессора Захарченко М.П., профессора Редько А.А. СПб. 2005. 272 с. С. 246-247.
6. Рихванов Л.П., Барановская Н. В., Судыко А. Ф. Химические элементы в организме человека как основа для реализации идей медицинской геологии // Горный журнал. 2013. №3. С. 37-42.
7. Федотов С.А., Хренов А.П., Жаринов Н.А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932-1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3-16.
8. Amaral, A.F.S., Arruda, M., Cabral, S. and Rodrigues A.S. (2008). Essential and non-essential trace metals in scalp hair of men chronically exposed to volcanogenic metals in the Azores, Portugal. Environment International, 34, 1104–1108.
9. Essentials of Medical Geology. Impacts of the Natural Environment on Public Health / Selinus O., Lindh U., Fuge R., Centeno J., Alloway B., Smedley P., Finkelman R. (Eds.) Elsevier Academic Press, printed in China, 2005, P 812.

*Scientific and Methodological Foundations of Environmental Assessment of Geological risk areas

Volfson I.F.
Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, rosgeo@yandex.ru

Mining industry enterprises, their technological processes, and resulting products often exhibit striking similarities with phenomena and products of volcanism, seismicity, tectono-magmatic activation, and modern fluid activity—both characterized by large-scale environmental contamination by chemical elements and compounds.

For instance, during the catastrophic eruption of Mount Pinatubo in the Philippines in 1991, approximately 10 billion tons of magma containing enormous concentrations of SO_2, Zn, Cd, Ni, Cu, As, Cr, and Hg were introduced into natural environments, altering the geochemical background over vast areas of the planet (Essentials, 2005). The scale of volcanic activity in Kamchatka and the environmental and public health impacts of eruption products have been extensively studied and documented (Fedotov et al., 1987; Kulakov et al., 2005; Vikulin et al., 2016; Volfson, 2022).

At the same time, the amount of technogenic dust dispersed within a 15–20 km radius around just the Neryungri coal deposit in Yakutia has been estimated at 46,000 tons. Each year, about 5.2 tons of dust per km² settles on the territory, containing over 20 chemical elements—such as calcium, magnesium, sulfur, titanium, manganese, gallium, cobalt, zinc, copper, and phosphorus—in toxic concentrations that pose a threat to the environment (Volfson et al., 2013). Coal mining leads to the exposure and intense oxidation of productive seams, up to the onset of coal fires, thereby inducing the migration of chemical elements—including highly toxic mercury and thallium. These technogenic geochemical flows transform pre-existing natural geochemical fields, disrupt the established "bio–geo" balance, and create hazardous medical–environmental conditions affecting occupational settings and residential areas.

Given the current scale of anthropogenic activity—comparable to planetary geological processes and their impacts at national, regional, and local levels—it becomes increasingly difficult to distinguish between natural and technogenic material flows within environmental objects. These processes are reflected in altered accumulation levels of chemical elements within living organisms, including in human organs and tissues, depending on the natural or technogenic environment in which the person functions (Rikhvanov et al., 2013).

Of particular interest are the results of medical–environmental studies conducted by researchers and practitioners from the University of the Azores. They examined the chemical composition of hair samples from male residents of various age groups permanently living in areas of active thermal activity on the Azores Islands, using high-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The hair samples revealed elevated levels of elements such as Cd (up to 96.9 ppb), Cu (up to 16.2 ppm), Pb (up to 3417.6 ppb), Rb (up to 216.3 ppb), and Zn (up to 242.8 ppm), and low Se (469.6 ppb). These findings indicate that the population living under continuous exposure to products of active geodynamic processes receives significant doses of heavy metals—cadmium, lead, zinc, copper, etc.—while experiencing selenium deficiency, an essential ultratrace element critical for human health (Amaral et al., 2008).

According to the authors, such naturally occurring environmental–geochemical conditions and their quantitative parameters are comparable to chemical element influxes into the environment in toxic concentrations resulting from metallurgical activities, which are known to cause serious public health consequences, including oncological diseases.

Based on an analysis of published eco-geochemical studies, the author proposed a hypothesis suggesting that similar environmental conditions and consequences of exposure to industrial

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

emissions may affect populations in mining regions. To test this hypothesis, in the early 2010s, the author—within a temporary working group of the Russian Geological Society—conducted medical–social surveys in the Chita region. The results confirmed, with a high degree of probability, that geological factors significantly affect public health, with over one-third of respondents living near mining enterprises reporting hypertension, cardiovascular diseases, and upper respiratory tract conditions.

These results were comparable to those of a similar population survey conducted in the mid-2000s in the settlement of Ust-Kamchatsk (Kamchatka Krai), where medical–environmental problems were even more pronounced due to harsh natural–climatic and geoecological conditions (including two active volcanoes within 100 km of the settlement) and socioeconomic factors (Kulakov et al., 2005).

Table 1. General Health Indicators of the Population of Ust-Kamchatsky District (after Kulakov et al., 2005)

Health status	Adults,%	Under 18, %
Healthy	25,8	38,9
Require outpatient follow-up by specialists	36,8	32,6
Require inpatient examination	21,2	17,6
Require hospitalization	16,2	10,9

These research examples and their results clearly point to shared environmental contamination problems and their effects on human health in both natural (e.g., volcanic regions such as the Azores, Kamchatka) and anthropogenic geologically hazardous areas (e.g., mining operations in Yakutia and Transbaikalia). These impacts manifest as increased rates of cardiovascular and respiratory diseases, and aggravation of chronic illnesses under unfavorable geoenvironmental conditions, affecting both occupational and residential environments, particularly in climatically extreme regions.

To address and prevent the escalation of such adverse trends, the author proposes the development of a comprehensive methodology for environmental hazard assessment. This methodology should be based on the principles of “early detection” and modeling of the effects of environmental factors on geological components and human health (hereinafter “the Methodology”) (Volfson, 2014).

The development of such a Methodology increasingly relies on findings from frontier disciplines, particularly medical geology—an emerging field within Earth sciences and a branch of environmental geology—dedicated to studying the health of humans and other biota under the influence of natural and anthropogenic geological processes and phenomena.

Significant advances have been made by Chinese researchers in assessing and studying the mechanisms of endemic and environmentally dependent diseases. For example, in regions of the People's Republic of China bordering the Russian Far East, endemic zones have been identified for severe diseases such as Kashin–Beck disease (Urov disease) and Keshan disease—both associated with selenium deficiency in the essential life-supporting environment.

The affected area extends in a linear belt from the Russian border in northeastern China southwestward for thousands of kilometers, reaching as far as the province of Guizhou. The elongated, linear nature of this high-risk territory in terms of endemic disease distribution may be associated with a series of regional geological structures, whose metallogenic and geochemical characteristics—and their possible continuation into Russian territory—warrant increased interest.

This transboundary area of potential environmental risk may serve as the basis for a collaborative scientific project with Chinese colleagues aimed at identifying and delineating medical–geologically adverse zones in Russia. The importance of such joint research lies in the fact that the Russian Far East contains a great variety of mineral deposits currently under development, as well as many promising areas for the discovery of new gold ore occurrences and polymetallic deposits—territories that fall within zones of potential endemic disease development.

Living and working in such regions may pose a negative synergistic medical–ecological effect for populations engaged in industrial activity. These people could be simultaneously exposed to excess toxic concentrations of chemical elements (byproducts of industrial processes) and experience a deficiency of selenium in the food chain. Selenium is a vital ultratrace element responsible for supporting the human immune system and mitigating the toxic effects of heavy metals and metalloids such as cadmium, mercury, and arsenic.

In conclusion, the author offers a set of recommendations that may serve as the foundation for developing a Methodology for the environmental assessment of geologically hazardous territories:

1. When planning prospecting and exploration, designing, and constructing new mining enterprises or mineral resource development centers, it is necessary to incorporate knowledge, experience, and skills from the field of medical geology. This should involve detailed studies of the natural–climatic, mineralogical–geochemical, and geological characteristics of the areas, which may affect the health of geologists, mining industry workers, and local populations.

2. Conduct regular environmental and health monitoring of workers and local populations in geologically risky areas. This monitoring should be based on data from medical–ecological and socio-economic surveys of those involved in production processes or residing in affected territories.

3. Long-standing geological and mineralogical–geochemical research results should serve as the scientific–methodological foundation for modern approaches to predicting and identifying subsurface resources, evaluating environmental risk factors, ensuring the safe and productive use of geological environments, and promoting sustainable economic development while guaranteeing a high quality of life and occupational safety for the population.

4. Apply innovative approaches to the assessment of geological and medical–ecological risks in prospective exploration areas and during the construction of mining enterprises. These should include processing large geochemical datasets using GIS technologies and artificial intelligence tools.

In developing the methodology for environmental assessment of geologically hazardous territories, geology must shift its focus toward human needs. This requires active participation of geologists and mining specialists in the design of social, economic, and environmental development projects in prospective regions. Such involvement will elevate the public status of geological science and practice and enhance the prestige of the geological profession.

1. Vikulin A.V., Volfson I.F., Grachev L.A., Dolgaya A.A. Geology, Medicine, and Society. Bulletin of the Kamchatka Regional Association, Educational and Scientific Center. Series: Earth Sciences. 2015. No. 1(25). Pp. 41–55.
2. Volfson I.F. Scientific and Methodological Foundations for Medical–Environmental Safety of Mineral Resource-Based Economic Development Territories. In: At the Crossroads of North and East (Methodologies and Practices of Regional Development): Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, Magadan, Nov. 17–18, 2022. North-Eastern State University. Krasnoyarsk: Scientific-Innovation Center, 2023. Pp. 62–75. DOI: 10.12731/978-5-907608-10-8-art9. EDN EAWGLQ.
3. Volfson I.F. On Several Models of Geochemical Anomaly Formation and Their Role in Applied Geoecology. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka. 2014. No. 2. Pp. 55–61.
4. Volfson I.F., Dasaeva L.A., Matyukhina E.B., Farrahov E.G. Climatic, Social, and Environmental Problems of Public Health in Yakutia. Life Without Hazards. 2013. No. 1. Pp. 80–83.

5. Kulakov V.N., Golovanov A.V., Vysotsky V.V. Impact of Extreme Natural–Climatic Conditions on Public Health in the Region. In: Problems of Pre-Clinical and Pathological States in Megacities. Proceedings of the 1st International Scientific Conference “Donozology 2005”. Eds. Zakharchenko M.P., Redko A.A. St. Petersburg, 2005. 272 p. Pp. 246–247.
6. Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. Chemical Elements in the Human Body as a Basis for Implementing the Ideas of Medical Geology. Mining Journal. 2013. No. 3. Pp. 37–42.
7. Fedotov S.A., Khrenov A.P., Zharinov N.A. Klyuchevskoy Volcano: Activity from 1932 to 1986 and Potential Development. Volcanology and Seismology. 1987. No. 4. Pp. 3–16.
8. Amaral A.F.S., Arruda M., Cabral S., Rodrigues A.S. Essential and Non-Essential Trace Metals in Scalp Hair of Men Chronically Exposed to Volcanogenic Metals in the Azores, Portugal. Environment International. 2008. Vol. 34. Pp. 1104–1108.
9. Essentials of Medical Geology. Impacts of the Natural Environment on Public Health. Eds. Selinus O., Lindh U., Fuge R., Centeno J., Alloway B., Smedley P., Finkelman R. Elsevier Academic Press, China, 2005. 812 p.

Презентация Путеводителя «Месторождения севера Забайкальского края»

Гонгальский Б.И.[1], Криволуцкая Н.А.[2]
[1] ИГЕМ РАН, Москва, brgon@mail.ru; [2]ГЕОХИ РАН, Москва, nakriv@mail.ru

Северное Забайкалье является одной из крупнейших металлогенических провинций в России. Здесь, в пределах Удоканского прогиба, сосредоточены уникальные месторождения меди (Удоканское, более 25 млн.т Cu), ванадия и титана (Чинейское, прогнозные ресурсы 30 миллиардов тонн руды), тантала и ниобия (Катугинское) (Архангельская и др., 2004), а также месторождения других полезных ископаемых (платиновых металлов, серебра, золота, урана и др.) (рис.1) Первым в этом ряду было открыто Чинейское месторождения титаномагнетитовых руд М.Н. Петрусевичем и Л.И. Казик при трассировании Байкало-Амурской магистрали в 1938 г. (Петрусевич, 1946). Позже при поисках радиоактивного сырья на севере Забайкалья Е.И. Буровой в 1949 г было обнаружено Удоканское месторождение меди. Эти находки вызвали активизацию поисков, в результате которых найдены многочисленные месторождения, относимых к аналогам Удокана: Ункур, Правоингамакитское, Саку, Красное, Бурпала. В ходе последующих исследований обнаружены и другие полезные ископаемые - месторождения железистых кварцитов (в частности, Сулуматское), каменных углей (Апсатское, Читкандинское), редкометальных руд (Катугинского месторождение, предсказанное В.В. Архангельской), сыннырита (Голевское).

В данной работе мы представляем подготовленный к печати путеводитель по месторождениям этого района, в первую очередь, медным. Месторождения меди и сопутствующих благородных металлов представлены различными генетическими типами: магматическими рудами в расслоенных массивах – Чинейском (Рудное, Верхнечинейское, Сквозное, Контактовое, Магнитное, Этырко), Майлавском, Луктурском, удаленными от контактов интрузивов сульфидными рудами с признаками осадочно-гидротермального происхождения (Удоканское месторождение) и гидротермальными жилами (Правоингамакитское, Сакинское, Ункурское и др.). Кроме того, в последние годы в расслоенных массивах и в их ближайшем обрамлении выявлены месторождения новых генетических типов: золото-платино-медного (Гонгальский, 2015) и редкоземельно-уранового (Макарьев и др., 2010).

Месторождения в осадочных породах:

Уникальное Удоканское Fe-Ag-Cu месторождение является частью крупного Намингинский рудного узла, к которому также относятся Правоингамакитское, Ункур и Сакинское. Возраст осадочных пород удоканской супергруппы (читкандинская свита чинейской серии), в которых локализованы месторождения, равен 2180±50 Ma (Бережная и др., 1988). По титаниту в кварцевых прожилках из карьера участка Медный Удоканского месторождения получен возраст 1896,2 ± 6,2 Ma (Perelló et al., 2017). На Удоканском месторождении основной горизонт медистых песчаников приурочен к верхней подсвите сакуканской свиты (PR_1). В его пределах выделяются крупные линзовидные и пластовые тела, имеющие халькозин-борнитовый (67,5 %), халькопиритовый (6,5 %) и малахит-брошантитовый (26,0 %) состав (Архангельская и др., 2004; Птицын и др., 2003).

Общая мощность меденосного горизонта Удоканского месторождения колеблется от нескольких метров до 300 м, он прослеживается на 14 км. В его пределах выделяются участки (с запада на восток), на которых можно изучать массивные и вкрапленные руды (точки наблюдения указаны как т.У): Медный (т.У-1) , Блуждающий, Секущий, Скользкий (т. У-2), Шумный-Крутой, Левый борт Наминги (т.У-4), Висячий, Восточный-1, Восточный-2, Левая Наминга, Озерный, Заозерный и Снежный. Минеральный состав руд характеризуется исключительным постоянством – халькозин+борнит. В нижних горизонтах присутствуют халькопиритовые руды.



Рис. 1. Геологическая карта Удоканского прогиба с местоположениями месторождений

Во многих рудных телах наряду с сульфидными минералами присутствуют окислы железа, из которых преобладает магнетит. Нередко его содержание во вкрапленных и массивных халькозин-борнитовых рудах достигает 50% объема породы, а в среднем его

содержания составляют 10-15 объемных %. В кварц-карбонатных прожилках были установлены аномальные концентрации урана, свинца и золота (Гонгальский, 2015) и высказано предположение об их гидротермальном происхождении. В стенках карьера по плоскостям трещин обилие вторичных медных минералов. Опорный разрез верхней части подрудной, рудной и нижней части надрудной толщи по ключу Секущему западного крыла (т.У-5).

Магматические месторождения:

Главные месторождения этого типа связаны с базитовым Чинейским массивом, по отчетливой расслоенности и ритмичности являющимся уникальным объектом на территории России. Он сопоставим по масштабам со Скаергаардским интрузивом, а по петрографическому составу – с Верхней зоной Бушвельда. Несмотря на значительно меньшие размеры по сравнению с последним, он содержит огромные запасы ванадия (крупнейшие в России), сосредоточенные в титаномагнетитовых рудах двух месторождений - Магнитного и Этырко. В экзоконтакте интрузива локализованы никелево-медные руды с платиноидами. Массив изучался долгие годы как научными (ИГЕМ – А. П. Лебедев, О.А. Богатиков; МГРИ – Н.Б. Белова; ИГГ СО АН СССР – Н.Д. Толстых, А.Э. Изох; ЧИПР – Б.И. Гонгальский, Н.А. Криволуцкая), так и производственными коллективами (Удоканская экспедиция - В.С. Чечеткин, В.К. Голев, К.С. Казанов, М.Н. Дэви, Н.Г. Голев, Л.В. Сосновских и др.). Возраст габброидов чинейского комплекса, полученный на основании изучения U-Pb системы в цирконах, составляет 1867 ± 3 Ма (Попов и др., 2009).

В плане Чинейский интрузив имеет близкую к овальной форму. Площадь его выхода на дневную поверхность составляет около 120 км^2. Массив вытянут в субширотном направлении на 18 км, максимальная ширина его около 11 км. Массив имеет лополитообразную форму, его максимальная мощность оценивается в 2,5-3,0 км. На юго-западе массив прорван позднепалеозойскими гранитами, а на севере он Ингамакитским разломом отделяется от Удоканского месторождения (т.Ч-1). Массив сложен в основном габброидами. Авторами на основании геологического строения, различий в составе и текстурно-структурных особенностей, выделены группы пород, сформированные в результате четырехкратного внедрения расплавов: 1) грубозернистые анортозиты и монцодиориты; 2) высокотитанистые габброиды; 3) низкотитанистые габброиды; 4) лампрофиры и флюидно-магматические брекчии (Gongalsky, Krivolutskaya, 2019).

Высоко- и низкотитанистые габброиды (вторая и третья группы пород) слагают основной объем Чинейского массива (90%) и характеризуются отчетливо выраженной расслоенностью. Они включают различные по составу габбро (от лейко- до мелагаббро), габбронориты, анортозиты, пироксениты, габбро с повышенными содержаниями титаномагнетита (т.Ч-2). В большинстве случаев элементы залегания пород обеих групп совпадают, но имеются и многочисленные секущие взаимоотношения (т.Ч-3). Медные руды с благородными металлами, представленные жильным и вкрапленным типами, обнажаются на поверхности в западной и восточной частях массива, на месторождениях и Контактовое (т.Ч-4) и Рудное (т.Ч-5) соответственно. Массивные и вкрапленные титаномагнетитовые руды разобщены в пространстве и локализованы на месторождениях Магнитное (т.Ч-6) и Этырко (т.Ч-7). На последние нередко наложено редкоземельно-урановое оруденение (альбититы, т.Ч-8).

Медно-никелевые и титаномагнетитовые рудопроявления в габброноритах Луктурского массива приурочены к его верхней части, сложенной крупнозернистыми габброноритами и норитами. Сульфидная минерализация, вкрапленная и прожилково-вкрапленная, наблюдаются в скважинах (т.Ч-9). Количество сульфидных минералов может достигать 30%. От Чинейских руд Луктурская минерализация отличается повышенным содержанием никеля по сравнению с медью. В экзоконтакте Луктурского габброноритового массива среди песчаников талаканской свиты (кеменская серия удоканского комплекса) обнаружуно Ункурское месторождение медистых песчаников (т.Ч-10).

Рудопроявления медно-никелевых руд в габброидах Майлавского массива обнаружены впервые в левом притоке р. Ингамакит, к западу от Удоканского месторождения в верховьях руч. Скалистого и по руч. Солокит (приток р. Чукчуду) среди палеозойских гранитоидов обнажаются габброиды чинейского комплекса (т.Ч-11), содержащие как титаномагнетитовую, так и сульфидную минерализацию. Разрозненные выходы габброидов по периферии Лурбунского гранитного массива (Pz) и в глубоких врезах рек внутри него, впервые объединены Б.И. Гонгальским и названы Майлавским массивом (Гонгальский, 2015). Последний отчетливо выражается на картах гравитационного и магнитного полей.

Другие месторождения района

Крупное Катугинское редкометально-редкоземельное месторождение расположено в Кадаро-Удоканском рудном районе и приурочено к зоне приразломных щелочных метасоматитов, образовавшихся в контактовой зоне массива рапакивиподобных гранитов, прорывающего сланцы и гнейсы раннего протерозоя. Рудоносные кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты слагают крутопадающую пластообразную залежь, выходящую на поверхность на площади более 5 кв.км и прослеженную до глубины 800 м. Граниты катугинского комплекса имеют возраст 2066 ± 6 млн. лет (Ларин и др., 2002).

Голевское месторождение сынныритов расположено в Каларском районе Забайкальского края, в 20 км от трассы БАМ и в 25 км от станции Хани (железная дорога).

Чарская группа месторождений железистых кварцитов включает Сулуматское, Нижнесакуканское и Сакуканнырское месторождения и расположена в юго-восточной части хребта Кодар, в южной части Чаро-Токкинской железорудной полосы. Южная граница рудных полей проходит по северному борту Чарской впадины.

Работа выполнена в рамках госзаданий ИГЕМ РАН и ГЕОХИ РАН.

1. Архангельская В.В., Быков Ю.В., Володин Р.Н. и др. Удоканское медное и Катугинское редкометальное месторождения Читинской области России. Чита. 2004. 607 с.
2. Бережная Н.Г., Бибикова Е.В., Сочава А.В. Изотопный возраст чинейской подсерии удоканской серии // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, No 5. С. 1209-1212.
3. Гонгальский Б.И. Месторождения уникальной металлогенической провинции Северного Забайкалья. М.: ВИМС. 2015. 248 с.
4. Ларин А. М., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Коваленко В. И., Ковач В. П., Яковлева С., Иванов, В. Э. О возрасте Катугинского Ta-Nb месторождения (Алдано-Становой щит): к проблеме выделения новой глобальной редкометальной металлогенической эпохи // Доклады Академии наук. 2002. Том 383. № 6. С. 807-811.
5. Макарьев, Л. Б., Миронов, Ю. Б., Вояковский, С. К. О перспективах выявления новых типов промышленных комплексных урановых месторождений в Кодаро-Удоканской зоне (Забайкальский край, Россия) // Геология рудных месторождений. 2010. Том 52. № 5. С. 427-438.
6. Петрусевич М.Н. Чинейское титаномагнетитовое месторождение // Советская геология. 1946. № 10. С. 91-94.
7. Попов, Н. В., Котов, А. Б., Постников, А. А., Сальникова, Е. Б., Шапорина, М. Н., Ларин, А. М., Федосеенко, А. М. (2009). Возраст и тектоническое положение Чинейского расслоенного массива (Алданский щит).
8. Птицын А.Б., Замана Л.В., Юргенсон Г.А. Удокан: геология, рудогенез, условия освоения. Новосибирск, Наука, 2003. 160 с.
9. Gongalsky B., Krivolutskaya N. World-Class Mineral Deposits of Northeastern Transbaikalia, Siberia, Russia. Springer. 2019. 321 p.
10. Perelló, J., Sillitoe, R. H., Yakubchuk, A. S., Valencia, V. A., Cornejo, P. Age and tectonic setting of the Udokan sediment-hosted copper-silver deposit, Transbaikalia, Russia // Ore Geology Reviews. V. 86. P. 856-866.

*Presentation of the Guidebook “Mineral Deposits of Northern Transbaikalia”

Gongalsky B.I.[1], Krivolutskaya N.A.[2]
[1]IGEM RAS, Moscow, brgon@mail.ru; [2] Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, nakriv@mail.ru

Northern Transbaikalia is one of the largest metallogenic provinces in Russia. Located within the Udokan Trough, it hosts unique mineral deposits including copper (Udokan, with over 25 million tonnes of Cu), vanadium and titanium (Chiney, with estimated resources of 30 billion tonnes of ore), tantalum and niobium (Katugin) (Arkhangelskaya et al., 2004), as well as other mineral resources such as platinum group elements, silver, gold, uranium, and more (Fig. 1).

The first among these discoveries was the Chiney deposit of titanomagnetite ores, found by M.N. Petrusevich and L.I. Kazik in 1938 during the tracing of the Baikal–Amur Mainline (Petrusevich, 1946). Later, in 1949, during the search for radioactive raw materials in northern Transbaikalia, E.I. Burova discovered the Udokan copper deposit. These discoveries spurred exploration, resulting in the identification of numerous Udokan-type deposits: Unkur, Pravoingamakit, Saku, Krasnoye, and Burpala.

Subsequent studies revealed additional types of mineralization, including iron quartzites (e.g., Sulumat), coal (Apsat and Chitkanda), rare-metal ores (Katugin, as predicted by V.V. Arkhangelskaya), and synnyrite-type deposits (Golevskoye).

This presentation introduces a guidebook prepared for publication, dedicated primarily to the copper deposits of this region. These copper and associated precious metal deposits represent a variety of genetic types: magmatic ores in layered intrusions—such as Chiney (including Rudnoye, Verkhnechineyskoye, Skvoznoe, Kontaktovoe, Magnitnoe, and Etyrko), Mailavsky, and Luktur; sulfide ores with features of sedimentary–hydrothermal origin located away from intrusive contacts (e.g., Udokan); and hydrothermal veins (e.g., Pravoingamakit, Sakin, Unkur, and others).

In recent years, new genetic types of deposits have been identified in layered intrusions and their host rocks: gold–platinum–copper (Gongalsky, 2015) and rare earth–uranium (Makaryev et al., 2010) types.

Sedimentary-Hosted Deposits:

The unique Udokan Fe–Ag–Cu deposit is part of the large Naminga ore cluster, which also includes the Pravoingamakit, Unkur, and Sakin deposits. The host sedimentary rocks belong to the Udokan Supergroup (Chitkanda Suite of the Chiney Series) and are dated at 2180 ± 50 Ma (Bereznaya et al., 1988). Titanite from quartz veins in the Medny pit of the Udokan deposit yielded an age of 1896.2 ± 6.2 Ma (Perelló et al., 2017).

At the Udokan deposit, the principal copper-bearing horizon is confined to the upper subformation of the Sakukan Formation (PR_1). It includes large lenticular and stratiform ore bodies composed predominantly of chalcocite–bornite (67.5%), chalcopyrite (6.5%), and malachite–brochantite (26.0%) assemblages (Arkhangelskaya et al., 2004; Ptitsyn et al., 2003).

The total thickness of the copper-bearing horizon varies from a few meters to 300 m and can be traced for 14 km. Along this zone, several study sites (marked as t.U) provide access to massive and disseminated ores. From west to east, these include: Medny (t.U-1), Bluzhdayushchiy, Sekushchiy, Skolzkiy (t.U-2), Shumny–Krutoy, Left Flank of Naminga (t.U-4), Hanging Wall, Eastern-1, Eastern-2, Left Naminga, Ozyorny, Zaozerny, and Snezhnoy.

The mineral composition of the ores is exceptionally consistent—primarily chalcocite + bornite. In the lower horizons, chalcopyrite ores are also present.

In many ore bodies, iron oxides—predominantly magnetite—accompany the sulfide minerals. In some massive and disseminated chalcocite–bornite ores, magnetite content reaches 50 vol.%, with

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

average contents of 10–15 vol.%. Quartz–carbonate veins have shown anomalous concentrations of uranium, lead, and gold (Gongalsky, 2015), suggesting a possible hydrothermal origin. The quarry walls show abundant secondary copper minerals along fracture planes. A reference section through the upper footwall, ore zone, and lower hanging wall is located at the Sekushchiy key site on the western flank (t.U-5).

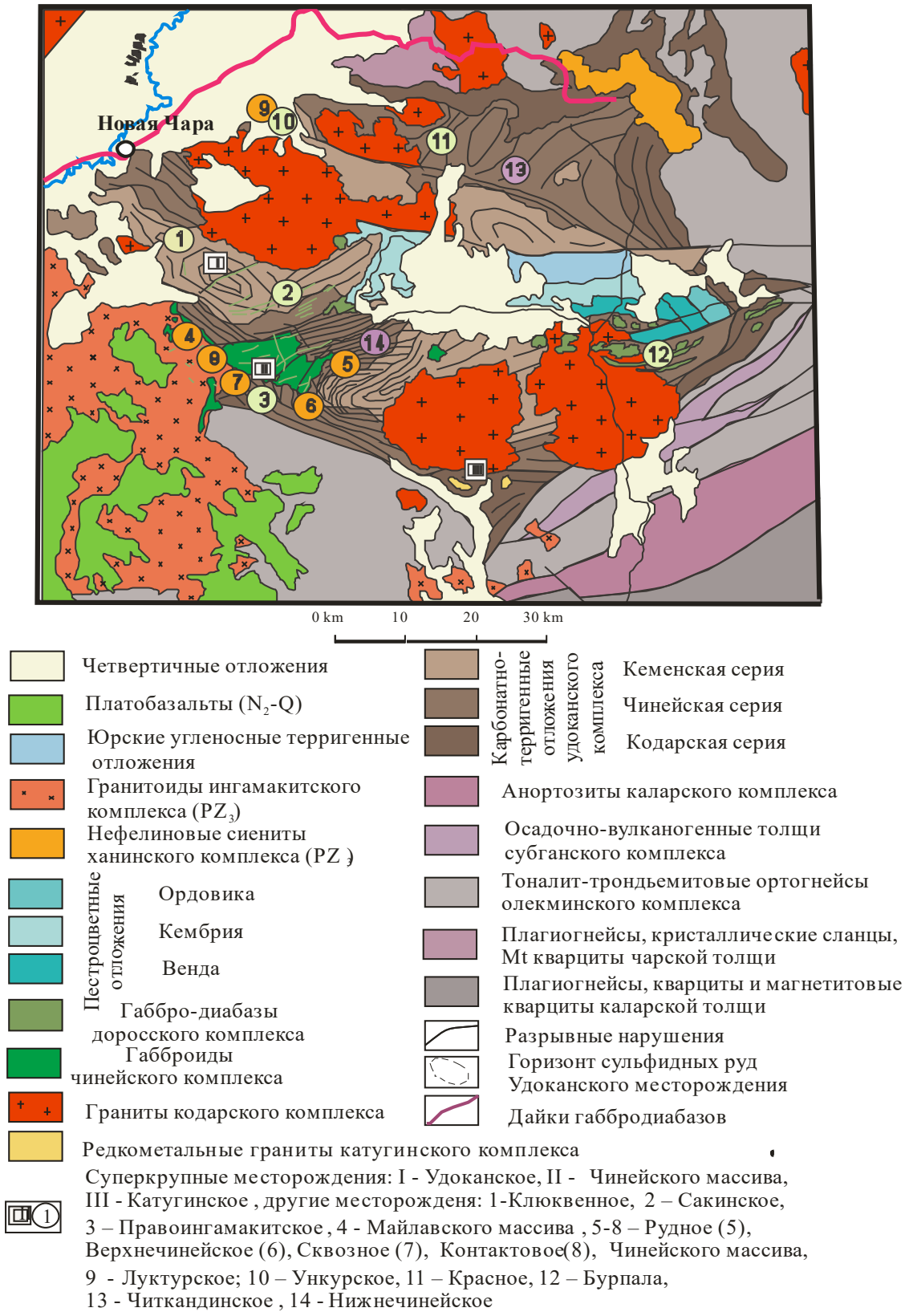


Fig. 1. Geological map of the Udokan Trough showing the locations of major deposits

Magmatic Deposits:

The principal deposits of this type are associated with the Chiney mafic intrusion, a uniquely layered and rhythmically structured body within Russian territory. It is comparable in scale to the Skaergaard intrusion and, in terms of petrography, to the Upper Zone of the Bushveld Complex. Although significantly smaller than the latter, the Chiney intrusion hosts enormous vanadium reserves (the largest in Russia), concentrated in titanomagnetite ores at the Magnetitnoye and Etyrko deposits.

Nickel–copper–platinum group element (PGE) ores are localized in the exocontact zone of the intrusion. The massif has been studied for decades by both academic institutions (IGEM – A.P. Lebedev, O.A. Bogatikov; MGRI – N.B. Belova; Institute of Geology and Geophysics SB RAS – N.D. Tolstykh, A.E. Izokh; CHIPR – B.I. Gongalsky, N.A. Krivolutskaya) and industrial teams (Udokan Expedition – V.S. Chechetkin, V.K. Golev, K.S. Kazanov, M.N. Devi, N.G. Golev, L.V. Sosnovskikh, and others). The U–Pb zircon age of the gabbroids from the Chiney Complex is 1867 ± 3 Ma (Popov et al., 2009).

The Chiney intrusion is suboval in plan view, with a surface exposure area of about 120 km². It extends in a sublatitudinal direction for 18 km, with a maximum width of about 11 km. The massif has a lopolith-like shape and an estimated maximum thickness of 2.5–3.0 km. To the southwest, it is intruded by Late Paleozoic granites, and to the north, it is bounded by the Ingamakit Fault, separating it from the Udokan deposit (t.Ch-1). The intrusion is mainly composed of gabbroids. Based on geological structure, composition, and textural–structural features, the authors distinguish four groups of rocks formed by four successive magma injections: 1. Coarse-grained anorthosites and monzodiorites; 2. High-Ti gabbroids; 3. Low-Ti gabbroids; 4. Lamprophyres and fluid–magmatic breccias (Gongalsky & Krivolutskaya, 2019).

The high- and low-Ti gabbroids (groups 2 and 3) constitute the bulk of the massif (about 90%) and exhibit pronounced layering. They include a range of compositions from leuco- to melagabbros, gabbronorites, anorthosites, pyroxenites, and gabbros with elevated titanomagnetite content (t.Ch-2). Although the structural attitudes of the two groups mostly coincide, numerous cross-cutting relationships are observed (t.Ch-3).

Copper ores with precious metals, represented by vein and disseminated types, are exposed on the surface in the western and eastern parts of the intrusion, at the Kontaktovoye (t.Ch-4) and Rudnoye (t.Ch-5) deposits, respectively. Massive and disseminated titanomagnetite ores are spatially separate and occur at the Magnetitnoye (t.Ch-6) and Etyrko (t.Ch-7) deposits. Rare earth element–uranium mineralization (in albite rocks) is often superimposed on these deposits (t.Ch-8).

Copper–nickel and titanomagnetite occurrences within the gabbronorites of the Luktur Massif are concentrated in its upper part, composed of coarse-grained gabbronorites and norites. Sulfide mineralization, both disseminated and vein–disseminated, has been observed in drill cores (t.Ch-9), with sulfide contents reaching up to 30%. Compared to the Chiney ores, the Luktur mineralization is characterized by a higher nickel content relative to copper.

In the exocontact zone of the Luktur gabbronorite massif, among sandstones of the Talakan Formation (Kemen Series of the Udokan Complex), the Unkur sediment-hosted copper deposit was discovered (t.Ch-10).

Copper–nickel ore occurrences in the gabbro of the Mailav Massif were first identified in the left tributary of the Ingamakit River, west of the Udokan deposit, in the upper reaches of the Skalisty stream and along the Solokit stream (a tributary of the Chukchudu River), where Paleozoic granitoids are intruded by gabbro of the Chiney Complex (t.Ch-11). These rocks contain both titanomagnetite and sulfide mineralization. Scattered outcrops of gabbroids along the periphery of the Lurbun Granite Massif (Pz), and in deep river incisions within it, were first unified by B.I. Gongalsky into the Mailav Massif (Gongalsky, 2015). This body is clearly expressed on gravity and magnetic maps.

Other Deposits of the Region

The large Katugin rare-metal–rare-earth deposit is located in the Kadara–Udokan ore district and is associated with a fault-related zone of alkaline metasomatites formed in the contact zone of a rapakivi-like granite massif that intrudes Early Proterozoic schists and gneisses. The ore-bearing quartz–albite–microcline metasomatites form a steeply dipping, lens-shaped body that crops out over

an area of more than 5 km² and is traced to depths of up to 800 m. The granites of the Katugin Complex have an age of 2066 ± 6 Ma (Larin et al., 2002).

The Golevskoye synnyrite deposit is situated in the Kalarsky District of Zabaykalsky Krai, 20 km from the Baikal–Amur Mainline and 25 km from Khani Station (railroad).

The Chara group of iron quartzite deposits includes Sulumat, Nizhnesakukan, and Sakukanyr deposits, and is located in the southeastern Kodar Range, within the southern part of the Chara–Tokkinskaya iron ore belt. The southern boundary of the ore fields lies along the northern margin of the Chara Basin.

This work was carried out under state assignments of IGEM RAS and GEOKHI RAS.

1. Arkhangelskaya V.V., Bykov Yu.V., Volodin R.N., et al. The Udokan Copper and Katugin Rare-Metal Deposits, Chita Region, Russia. Chita, 2004. 607 p.
2. Berezhnaya N.G., Bibikova E.V., Sochava A.V. Isotopic Age of the Chiney Subseries of the Udokan Series. Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1988. Vol. 302. No. 5. Pp. 1209–1212.
3. Gongalsky B.I. Deposits of the Unique Metallogenic Province of Northern Transbaikalia. Moscow: VIMS, 2015. 248 p.
4. Larin A.M., Kotov A.B., Salnikova E.B., Kovalenko V.I., Kovach V.P., Yakovleva S., Ivanov V.E. Age of the Katugin Ta–Nb Deposit (Aldan–Stanovoy Shield): Toward the Recognition of a New Global Rare-Metal Metallogenic Epoch. Doklady Earth Sciences. 2002. Vol. 383. No. 6. Pp. 807–811.
5. Makaryev L.B., Mironov Yu.B., Voyakovsky S.K. On the Potential for Discovering New Types of Industrial Complex Uranium Deposits in the Kodar–Udokan Zone (Zabaykalsky Krai, Russia). Geology of Ore Deposits. 2010. Vol. 52. No. 5. Pp. 427–438.
6. Petrusevich M.N. The Chiney Titanomagnetite Deposit. Sovetskaya Geologiya. 1946. No. 10. Pp. 91–94.
7. Popov N.V., Kotov A.B., Postnikov A.A., Salnikova E.B., Shaporina M.N., Larin A.M., Fedosenko A.M. Age and Tectonic Setting of the Chiney Layered Intrusion (Aldan Shield). 2009.
8. Ptitsyn A.B., Zamana L.V., Yurgenson G.A. Udokan: Geology, Ore Genesis, and Development Conditions. Novosibirsk: Nauka, 2003. 160 p.
9. Gongalsky B., Krivolutskaya N. World-Class Mineral Deposits of Northeastern Transbaikalia, Siberia, Russia. Springer, 2019. 321 p.
10. Perelló J., Sillitoe R.H., Yakubchuk A.S., Valencia V.A., Cornejo P. Age and Tectonic Setting of the Udokan Sediment-Hosted Copper–Silver Deposit, Transbaikalia, Russia. Ore Geology Reviews. Vol. 86. Pp. 856–866.

Прогноз и методика поисков скрытых месторождений урана в Стрельцовской кальдере (Забайкальский край)

Гребенкин Н.А., Тубольцев И.С., Мельников С.И., Несмеянова А.И., Сорокин А.Г., Масло М.Ю., Машнин Д.М.
Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 31, grebenkin@vims-geo.ru

Стрельцовское рудное поле (СРП), расположенное в Краснокаменском районе Забайкальского края, включает 19 молибден-урановых жильно-штокверковых месторождений с общими остаточными запасами урана около 140 тыс. тонн и в настоящее время является основным поставщиком урана для обеспечения нужд атомной промышленности страны.

По данным АО «РОСАТОМ НЕДРА» (Состояние и перспективы…, 2025) в ближайшие несколько лет уровень добычи руды на СРП упадет вдвое. Введение в эксплуатацию нескольких, еще не отрабатываемых месторождений, Широндукуй и Аргунское позволит исправить данную ситуацию лишь на ближайшие 15 лет. В связи с этим проблема восполнения ресурсов СРП, как объекта с налаженной инфраструктурой и полным производственным циклом от добываемой руды до конечного продукта (концентрата), приобретает особую актуальность.

Схема Стрельцовского рудного поля (СРП)



Схематический геологический разрез. Стрельцовское рудное поле

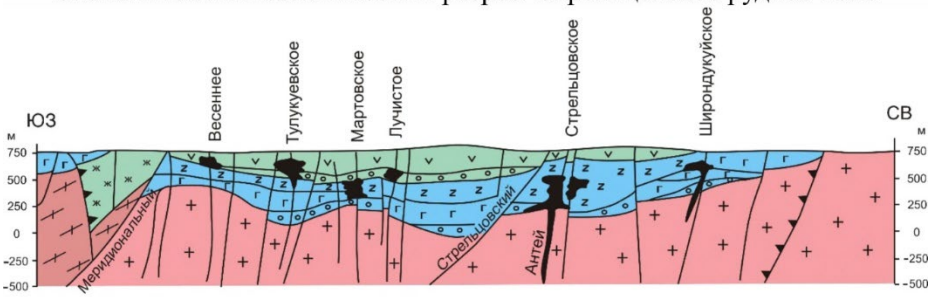


Рис. 1 Обзорная схема Стрельцовской вулканотектонической структуры и ее схематический разрез

Последние 20 лет поисковые геологоразведочные работы в основном проводились на достаточно удаленных от рудного поля площадях (Шумилин, 2007). Они не принесли

значимых результатов, так как не было выявлено ни одного промышленно значимого месторождения урана жильно-штокверкового типа.

Новые поисковые открытия необходимо связывать исключительно со скрытыми и перекрытыми объектами.

В то же время по современным представлениям и по данным проведенных геолого-геофизических работ четкие границы СРП не определены до сих пор (Шумилин, 2007). Изученность всей площади в полном разрезе до кристаллического фундамента остается исключительно слабой. Потенциал кальдеры по выявлению новых объектов скрытого типа остается не исчерпанным.

В геологическом строении СРП принимают участие породы гранит-метаморфического фундамента (PR2-PZ) и вулканогенно-осадочного чехла (J-K) (Рис. 1).

Изначально суммарные запасы урана около 300 тыс. т с первоначальными его содержаниями в рудах 0,26%. Все месторождения сосредоточены в пределах Аргунской тектонически ослабленной зоны в Восточном и Западном блоках и лишь небольшие запасы металла локализованы в Северном блоке в зоне Меридионального разлома. Рудные залежи обнаружены как в осадочно-вулканогенных породах верхнего структурного этажа, так и в породах нижнего структурного этажа в фундаменте кальдеры (Ищукова, 2007).

Оруденение представлено тремя морфологическими типами – штокверковым, жильным и пластовым. Его сопровождают широкие зоны аргиллизитов, охватывающие весь комплекс пород фундамента и вулканогенно-осадочного чехла. Все месторождения являются скрытыми.

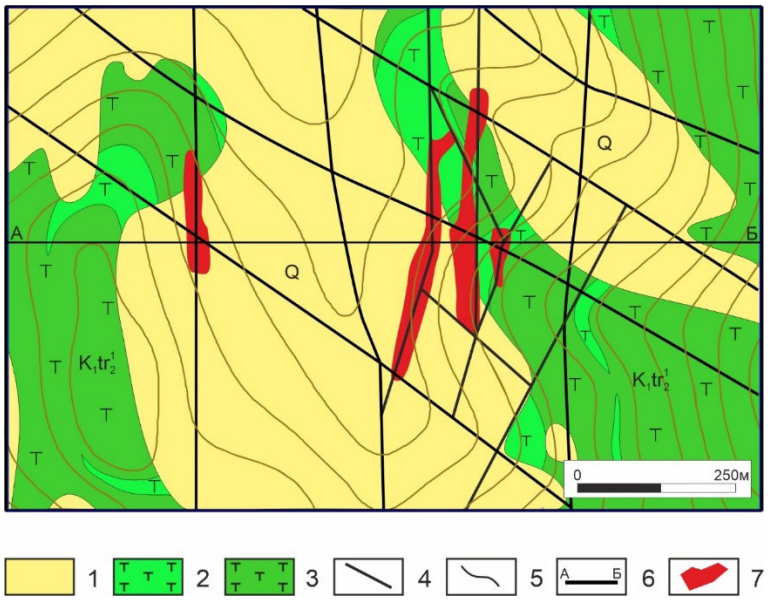


Рис. 2 Схема геологического строения месторождения Южно-Широндукуйское

1 – четвертичные отложения; 2 – андезиты черные; 3 – андезиты; 4 – тектонические нарушения; 5 – геологические границы; 6 – линия разреза; 7 – проекции рудных залежей на дневную поверхность; 7 – тектонические нарушения.

Основываясь на буровой изученности, а также учитывая благоприятное пространственное сочетание структурных, литологических, геохимических и геофизических критериев и признаков, характерных для данного типа оруденения, был определен оптимальный перспективный участок в южной части Стрельцовской кальдеры.

Изучение участка должно проходить согласно общепринятому принципу последовательного приближения. В первую очередь он должен быть покрыт аэрогеофизической съемкой по результатам которой определяются участки наземных работ.

Ставя такую непростую задачу как выявление скрытых залежей, слабо проявленных на дневной поверхности необходимо определить наиболее оптимальный и продуктивный комплекс наземных исследований.

Развитие и внедрение новых поисковых методов и методик посредством проведения опытно-методических работ может позволить повысить информативность, достоверность и экономическую эффективность проводимых геологоразведочных работ.

Наиболее целесообразно проводить опытные исследования на эталонных месторождениях определенных геолого-промышленных типов, имеющих незначительную техногенную нагрузку. Одним из таких объектов жильно-штокверкового типа было выбрано одно из месторождений СРП, Южно-Широндукуйское, в пределах которого на детальном участке был проведен комплекс геолого-геофизических исследований.

Месторождение Южно-Широндукуйское является типичным для восточной части кальдеры. Оно имеет двухъярусное строение, гранитный фундамент (PR2-PZ) и вулканогенно-осадочный чехол (J-K) (Рис. 2, Рис. 3). Рудные тела здесь представлены крутопадающими жилами и штокверками, залегающими на глубине от 90 до 250 м от дневной поверхности.

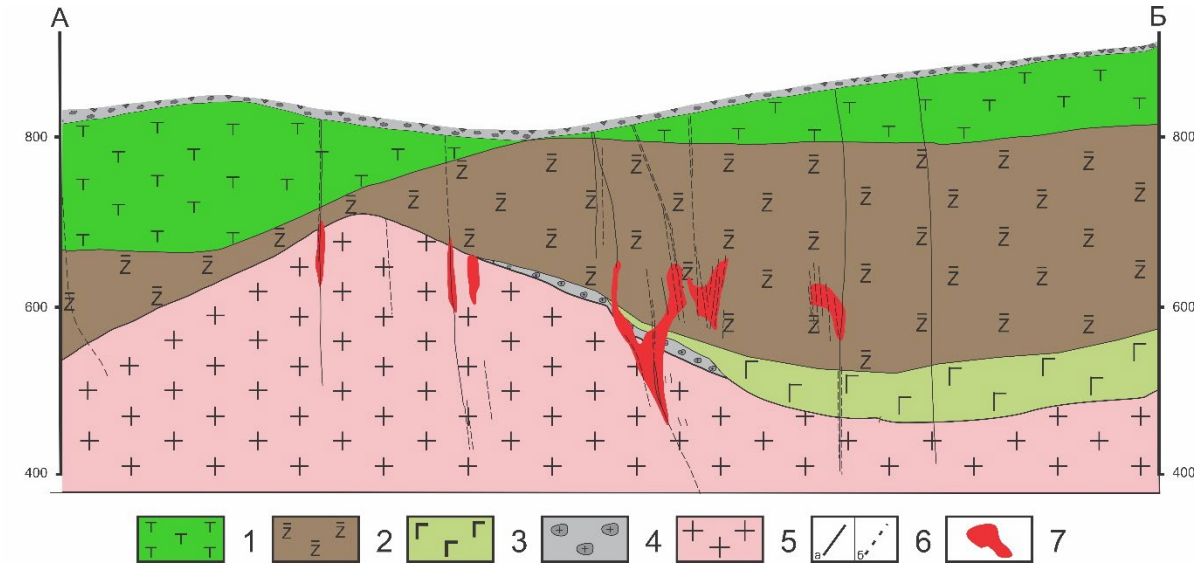


Рис. 3 Геологический разрез по линии А-Б

1 – андезиты; 2 –трахидациты полосчато-флюидальные; 3 – андезито-базальты, базальты и миндалекаменные с горизонтами конгломератов; 4 – базальные валунные конгломераты и конглобрекчии, гравелиты, песчаники с обуглившимися растительными остатками; 5 – граниты средне- и крупнозернистые порфировидные лейкократовые и биотитовые; 6 – тектонические нарушения: достоверные (а), предполагаемые (б); 7 – рудные тела.

На участке в 1 км^2 был проведен комплекс методов с применением современного геолого-геофизического оборудования, включающий в себя:

- Наземную гравиразведку;
- Беспилотную гамма-спектрометрию и магниторазведку
- Геохимическое опробования по методике картирования сорбционно-солевых ореолов (КСО) и изотопно почвенному методу (ИПМ);

По результатам исследования удалось отразить особенности геологического строения участка, а также с высокой степенью точности зафиксировать аномалиями уже известное рудное тело (Рис.4). Все это позволяет локализовать участки для проведения последующих горно-буровых работ и свести их объемы к минимуму.

В рамках изучения керна скважин предлагается применять метод исследования ИК-спектросметрию, который позволяет оперативно, в полевых условиях, картировать глинисто-слюдистые минералы, карбонаты, которые, как правило на месторождениях в вулканотектонических структурах имеют околорудное значение.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Выявление новых залежей в непосредственной близости от развитой инфраструктурной сети позволит обеспечить градообразующее предприятие более дешевым сырьем.
2. Новые поисковые открытия месторождений жильно-штокверкового типа необходимо связывать исключительно со скрытыми и перекрытыми месторождениями в южной части СРП.
3. Применение современного оборудования (БПЛА, портативная ИК-спектрометрия), позволяет проводить исследования в большем объеме и оперативно корректировать направление работ непосредственно в полевых условиях.
4. Проведение опытно-методических работ позволяет сформировать наиболее эффективный комплекс методов для выявления месторождений определенного геолого-промышленного типа.
5.

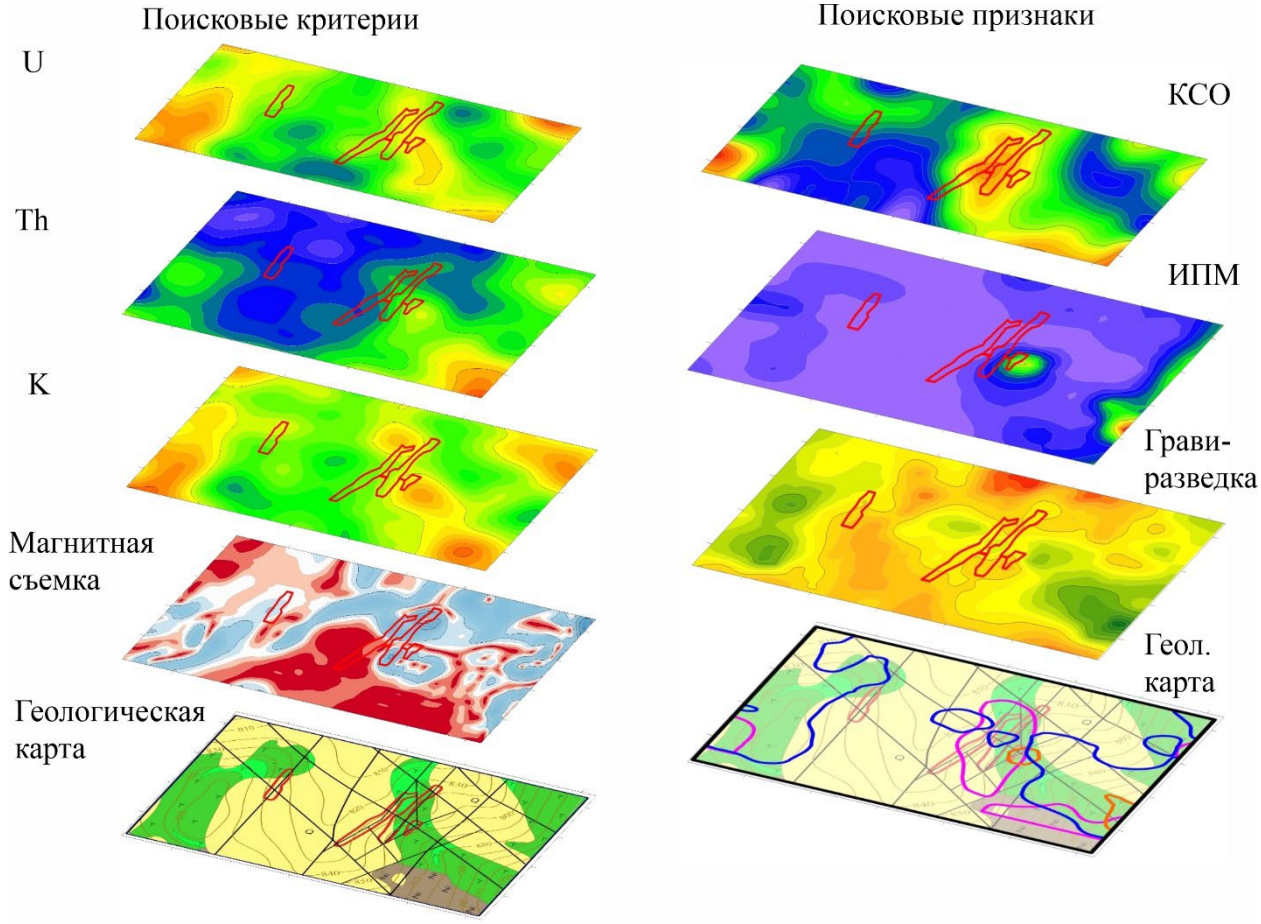


Рис.4 Поисковые критерии и признаки скрытого уранового оруденения на примере месторождения Южно-Широндукуйское

1. Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В. и др. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Геологоразведка, 2007. 260 с.
2. Шумилин М.В. О возможности новых крупных открытий в Стрельцовском рудном поле // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 5. С. 471-473.
3. https://vims-geo.ru/media/documents/02_Состояние_и_перспективы_развития_уранодобывающей_отрасли_Российской_Святецкий_В.С..pdf

***Forecast and Methodology for the Exploration of Hidden Uranium Deposits in the Streltsovka Caldera (Zabaykalsky Krai)**

Grebenkin N.A., Tuboltsev I.S., Melnikov S.I., Nesmeyanova A.I., Sorokin A.G., Maslo M.Yu., Mashnin D.M.
All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky (VIMS), 31 Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia, grebenkin@vims-geo.ru

The Streltsovka ore field (SOF), located in the Krasnokamensk district of Zabaykalsky Krai, hosts 19 vein–stockwork-type molybdenum–uranium deposits with total remaining uranium reserves of approximately 140,000 tonnes. It currently serves as the country's primary source of uranium for the nuclear industry.

According to JSC Rosatom Nedra (State and Prospects…, 2025), uranium ore production at SOF is projected to decrease by half in the coming years. Bringing several currently undeveloped deposits—Shirondokuy and Argun—into operation will only help sustain current production levels for the next 15 years. In this context, the problem of resource replenishment at SOF—an area with fully developed infrastructure and a complete production cycle from ore mining to concentrate production—becomes particularly urgent.

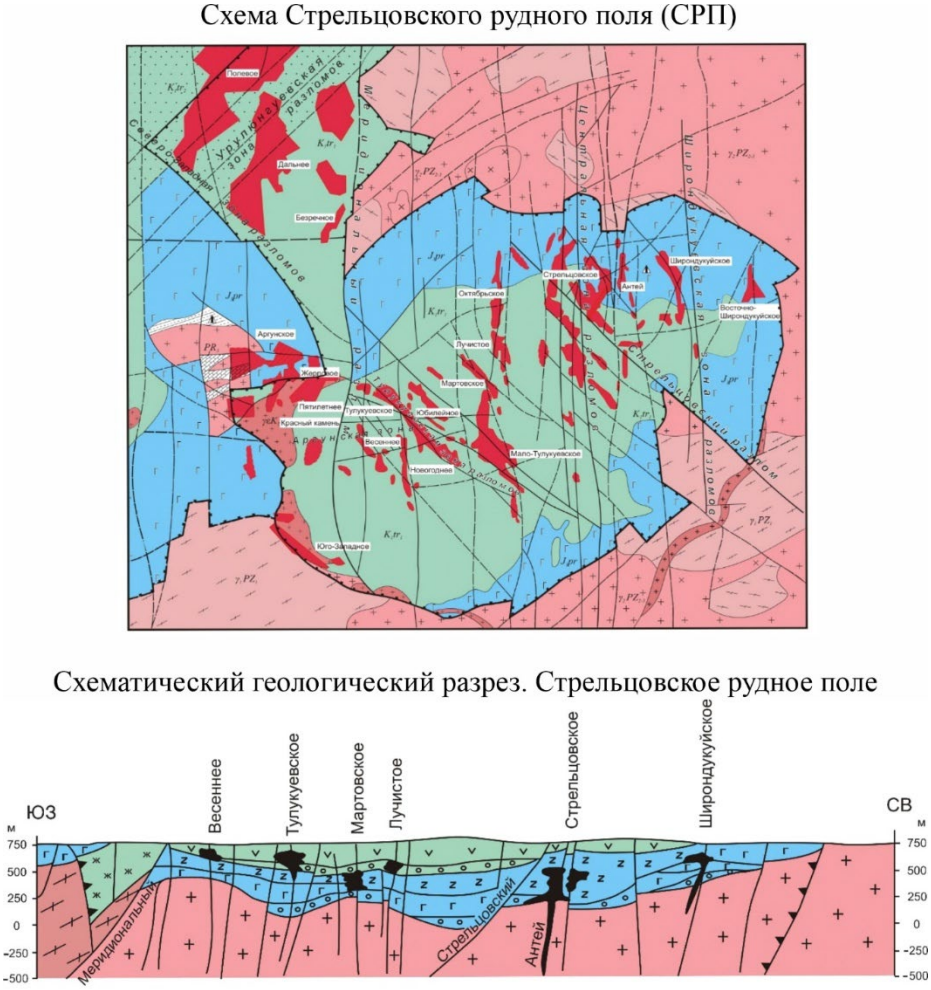


Fig. 1. Overview map of the Streltsovka volcano–tectonic structure and its schematic cross-section.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Over the past 20 years, exploration activities have mainly targeted areas located some distance from the ore field (Shumilin, 2007), but these efforts have not resulted in the discovery of any economically significant vein–stockwork uranium deposits.

Therefore, future discoveries should focus exclusively on concealed and buried targets.

At the same time, according to current geological models and the results of geophysical surveys, the boundaries of the Streltsovka ore field are still not clearly defined (Shumilin, 2007). The geological structure of the area down to the crystalline basement remains poorly studied. Hence, the exploration potential of the caldera for discovering new concealed deposits is far from exhausted.

The geological structure of the SOF includes rocks of the granite–metamorphic basement (PR2–PZ) and the volcano–sedimentary cover (J–K) (Fig. 1).

Initially, the total uranium reserves amounted to approximately 300,000 tonnes, with average ore grades of 0.26%. All known deposits are concentrated within the Argun tectonic weakening zone, in the Eastern and Western blocks. Only a small portion of metal reserves is localized in the Northern block, within the Meridian fault zone. Ore bodies have been found both in the upper structural level (volcano–sedimentary cover) and in the lower structural level (caldera basement) (Ishchukova, 2007).

Mineralization occurs in three morphological forms: stockwork, vein, and stratiform. It is accompanied by extensive argillic alteration zones, which affect the entire sequence of basement and cover rocks. All the deposits are concealed.

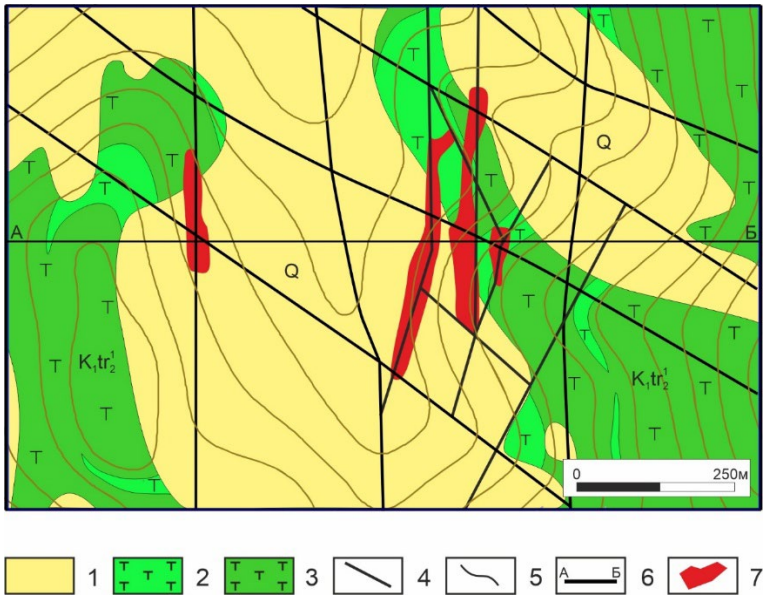


Fig. 2. Geological map of the Yuzhno-Shirondokuy deposit

1 – Quaternary deposits; 2 – black andesites; 3 – andesites; 4 – tectonic faults; 5 – geological boundaries; 6 – cross-section line; 7 – surface projection of ore bodies; 8 – tectonic disturbances.

Based on existing drilling data and a favorable spatial combination of structural, lithological, geochemical, and geophysical indicators characteristic of this ore type, a promising area was delineated in the southern part of the Streltsovka Caldera.

The investigation of this area should follow the generally accepted principle of sequential approximation. The first step involves airborne geophysical surveying, the results of which will determine the targets for ground-based exploration.

Given the challenge of identifying concealed ore bodies that have little to no surface expression, it is essential to define the most effective and efficient combination of surface exploration methods.

The development and implementation of new exploration techniques through pilot methodological studies can significantly improve the informativeness, reliability, and economic efficiency of geological investigations.

It is most appropriate to conduct such pilot studies at type deposits of known geological–industrial classes that are subject to minimal anthropogenic disturbance. One such object of the vein–

stockwork type chosen for investigation was the Yuzhno-Shirondokuy deposit within the SOF, where a comprehensive set of geological and geophysical studies was carried out on a detailed test site.

The Yuzhno-Shirondokuy deposit is typical for the eastern part of the caldera. It features a two-tiered structure consisting of a granitic basement (PR2–PZ) and a volcano–sedimentary cover (J–K) (Figs. 2, 3). The ore bodies here are represented by steeply dipping veins and stockworks occurring at depths of 90 to 250 meters below the surface.

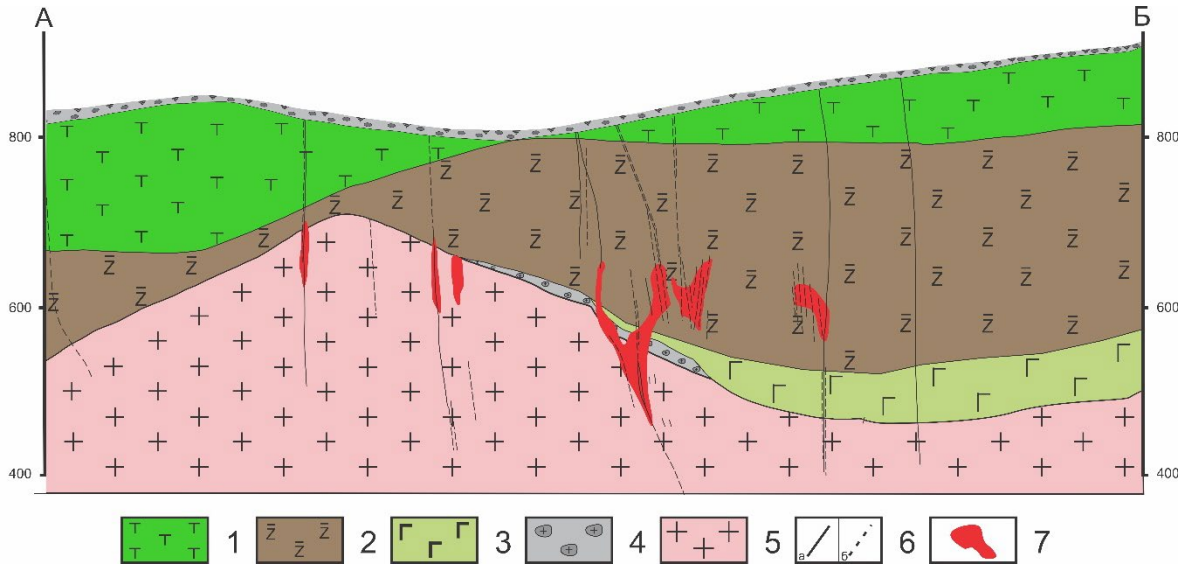


Fig. 3. Geological cross-section along line A–B

1 – andesites; 2 – banded fluidal trachydacites; 3 – andesibasalts, basalts, and amygdaloidal rocks with conglomerate horizons; 4 – basal boulder conglomerates and conglomeratic breccias, gravelites, sandstones with carbonized plant remains; 5 – medium- and coarse-grained porphyritic leucocratic and biotite granites; 6 – tectonic faults: confirmed (a), inferred (b); 7 – ore bodies.

A comprehensive geophysical survey was conducted over a 1 km² area using modern equipment and included:

-Ground-based gravimetry;

-Unmanned aerial gamma spectrometry and magnetometry;

-Geochemical sampling using the Sorption–Salt Halo Mapping (SSH) technique and the Isotopic Soil Method (ISM).

The results of the survey allowed for the detailed characterization of the geological structure of the site and, with high accuracy, confirmed the presence of anomalies corresponding to a known ore body (Fig. 4). These results enable more precise targeting for future drilling and minimize the volume of such work.

As part of core drilling studies, the use of infrared spectroscopy is recommended. This method allows for rapid field-based mapping of clay–mica minerals and carbonates, which typically have ore-related significance in deposits within volcano–tectonic structures.

Conclusions:

1. The identification of new uranium ore bodies in close proximity to existing infrastructure would allow the operating mining enterprise to be supplied with more cost-effective raw materials.

2. Future discoveries of vein–stockwork-type uranium deposits should focus exclusively on concealed and buried targets in the southern part of the Streltsovka ore field.

3. The use of modern equipment—including UAVs and portable infrared spectrometers—enables expanded fieldwork capabilities and rapid adjustment of survey strategies in real-time during field campaigns.

4. Pilot methodological studies make it possible to define the most effective combination of methods for detecting deposits of a specific geological–industrial type.

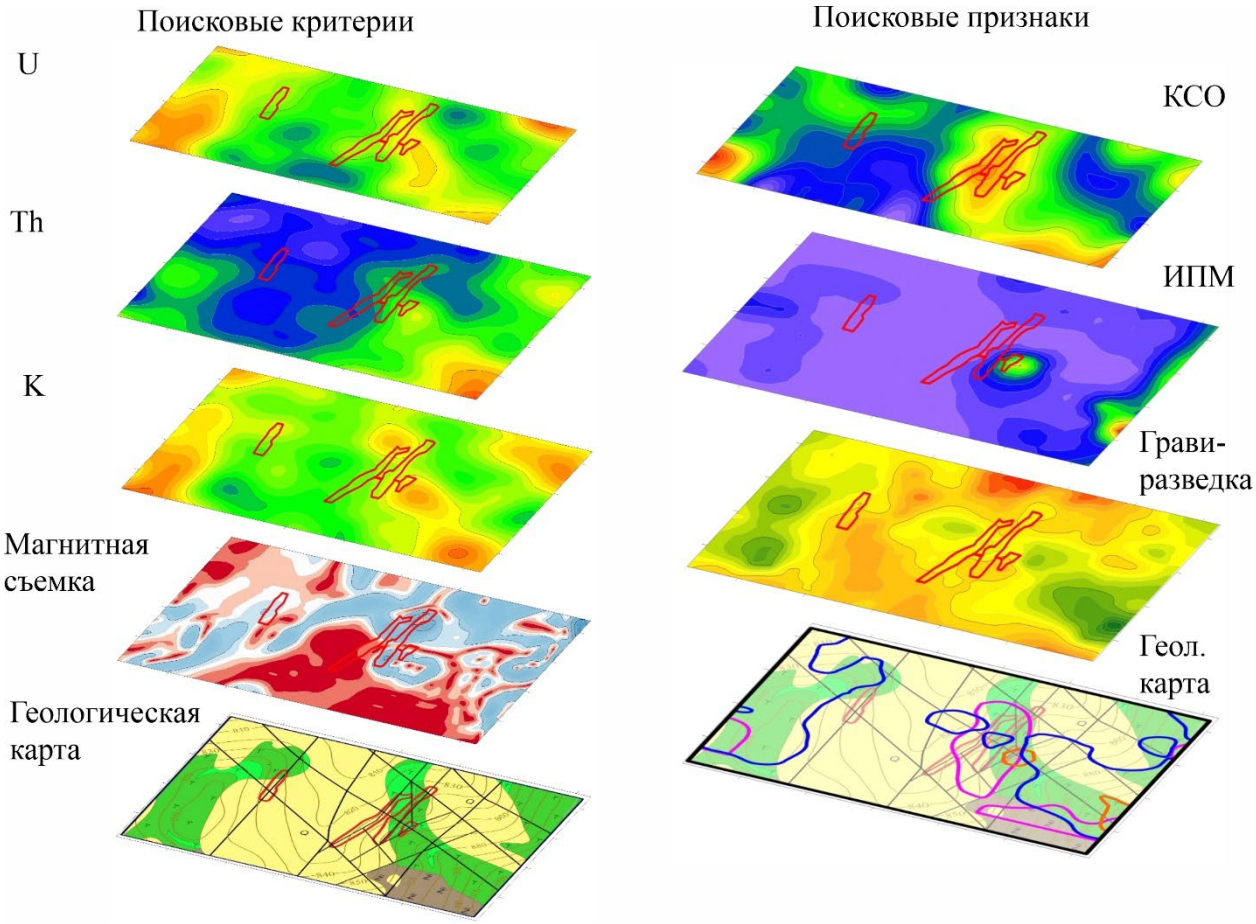


Fig. 4. Exploration criteria and indicators of concealed uranium mineralization, based on the Yuzhno-Shirondokuy deposit.

1. Ishchukova L.P., Modnikov I.S., Sychev I.V., et al. Uranium Deposits of the Streltsovka Ore Field in Transbaikalia. Irkutsk: Geologorazvedka, 2007. 260 p.
2. Shumilin M.V. On the Potential for Major New Discoveries in the Streltsovka Ore Field. Geology of Ore Deposits. 2007. Vol. 49. No. 5. Pp. 471–473.
3. https://vimsgeo.ru/media/documents/02_Состояние_и_перспективы_развития_уранодобывающей_отрасли_Российской_Святецкий_В.С..pdf

Трансграничная корреляция редкометалльного магматизма Коктогайского рудного района (Китай) и Алахинского рудного узла (Россия)

Гусев Н.И[1], Коваленко Е.В.[2], Скублов С.Г[2]
[1]Институт Карпинского, nikolay_gusev@vsegei.ru, [2]ИГГД РАН, skublov@yandex.ru

Алтайская редкометалльная провинция имеет протяженность около 800 км и прослеживается из России и Казахстана через Китай в Монголию. В Казахстане и Китае месторождения представлены редкометальными пегматитами, в России и Монголии – редкометалльными гранитами. В России и Китае наиболее важные месторождения расположена в Монголо-Алтайском террейне и имеют триас-юрский возраст 220-180 млн лет. Наиболее крупные пегматитовые месторождения установлены в Китайском Алтае, где известно более 100 000 пегматитовых жил. Однако для большинства редкометалльных пегматитов (таких как Коктокай, Калуан и др.) родоначальные граниты были неизвестны. Только недавно были установлены редкометалльные сильно фракционированные лейкограниты на месторождении Коктокай (Shen et al., 2022). U-Pb возраст лейкогранитов 224–220 млн лет хорошо согласуется с U-Pb возрастом 220 ± 1-3 млн лет пегматита № 3. Ar-Ar возраст мусковита из тех же образцов лейкогранита дает диапазон возрастов 182–177 млн лет, что указывает на новое раннеюрское гидротермальное событие. В связи с этим определенный интерес представляют данные по редкометалльным гранитам (без пегматитов) близкого возраста в Российском Алтае. Здесь широко распространены грейзеновые вольфрамовые месторождения и рудопроявления. Однако, Li минерализация установлена только на Калгутинском (онгониты) и Алахинском (сподуменовые порфиры) месторождениях и в дайке сподуменовых аплитов в Кунгурджаринском интрузиве (Анникова и др., 2016).

Калгутинский гранитный батолит вмещает одноименное Mo-W грейзеновое и Mo-порфировое месторождения. Продолжительность формирования батолита превышает 30 млн лет (215 – 181 млн лет, Гусев, 2011). В восточной части батолита размещен пояс из 125 порфировых даек (204±2 – 201±1 млн лет), протяженностью 17 км и шириной 5 км. Редкометалльные онгониты слагают 10 даек (Li 0.1 – 0.27 мас.%, Cs 0.07-0.18 мас.%, P_2O_5 0.5-1.0 мас.%). Литиевый минерал амблигонит (монтебразит, 8-9 мас.% Li_2O) образует включения в калиевом полевом шпате. По результатам изотопного датирования в Калгутинской рудно-магматической системе выделяется 5 стадий магматизма, однако Li оруденение проявлено только на III и IV стадиях формирования онгонитов с возрастом 202±5 и 195±1 млн лет (Мурзинцев и др., 2019.

Алахинское сподумен-порфировое месторождение представлено двумя штоками, один 1000 × 650 м, второй 400 × 250 м, внедренными в раннедевонские (413 млн лет) тоналиты. Алахинские штоки сложены Mus-Spd-Kfsp-Ab-гранит-порфирами, апикальная часть – альбититами. Сподуменовые гранит-порфиры содержат Li_2O – 0.24–1.46 мас. %, среднее – 0.98, Ta_2O_5 – 70–180 ppm, среднее – 114 ppm (Анникова и др., 2016). Прогнозный потенциал Алахинских сподуменовых гранит-порфиров оцениваются в 68 млн т руды со средним содержанием сподумена 5 %, то есть около 3.4 млн т сподуменового концентрата или 448 тыс. т Li_2O.

Считается, что Алахинские штоки раннеюрские и сформировались в результате кристаллизации литиевой кремнекислой магмы. U-Pb-изотопный возраст по навеске циркона показал значения 183 и 188 млн лет (Ильин и др.,1994), по Rb-Sr изохроне получены значения 195±3 (Ильин и др.,1994) и 198.6±1.1 млн лет (Kostitsyn et. al., 1998). Приведенные датировки неточны, потому что циркон высоко-урановый (1609-31140 ppm), метамиктный и дает сильную дискордантность (25-1575%) значений возраста (рис. 1). Обычно это идиоморфные кристаллы с пятнистым внутренним строением (рис. 2) и зональные в краевых частях. Центральные зоны большинства кристаллов сильноизмененные с многочисленными почковидными микропорами, типичные для гидротермально-измененного циркона и с включениями породообразующих и урановых минералов. Отличается лишь один кристалл

(зерно с точкой 10.1 на рис. 2), изменение и перекристаллизация которого не затронули. Это зерно по содержанию (ppm): U 544, Th 293 и отношению Th/U = 0.56 подобно магматическому циркону. Оно имеет величину возраста по отношению $^{206}Pb/^{238}U$ 325 млн лет, но дискордантность составляет 184%.

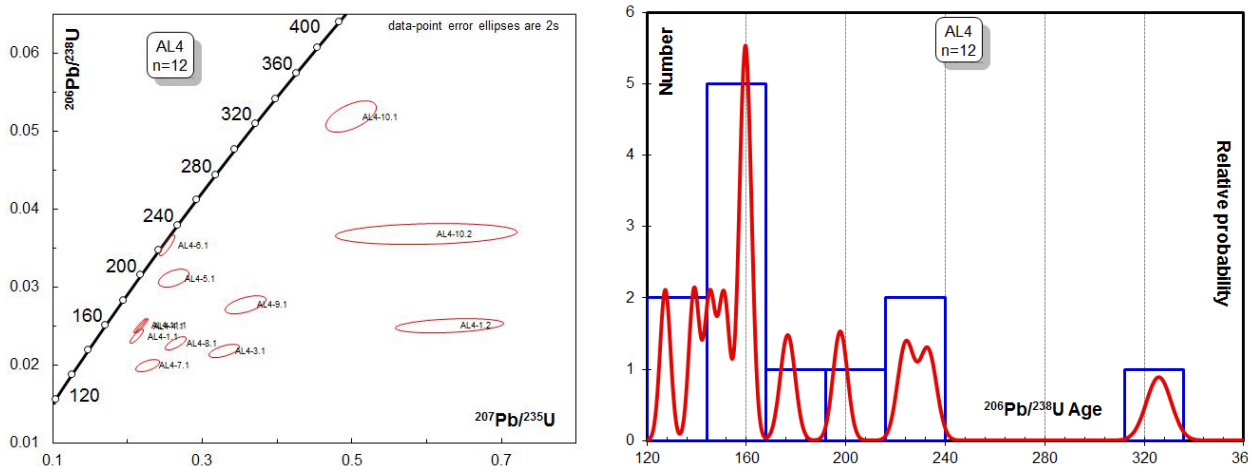


Рис. 1. Результаты датирования (SHRIMP II) циркона из лейкогранит-порфиров Алахинского штока (пр. AL4)

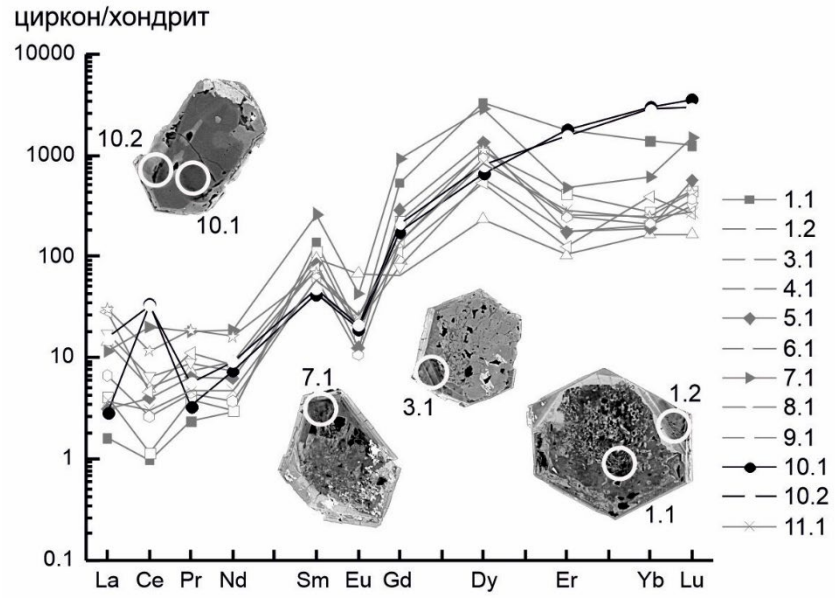


Рис. 2. BSE изображения циркона из лейкогранит-порфиров пр. AL4 Алахинского штока (диаметр кратеров составляет 20 мкм). Спектры распределения REE нормированы на хондрит CI

Для светлых в BSE кайм характерно содержание HfO_2 до 18.2 мас.% (по данным EPMA), а также повышенное содержание P_2O_5, FeO, в меньшей степени CaO, Nb_2O_5. По данным SIMS циркон насыщен редкими и другими неформульными элементами. Геохимические характеристики циркона преимущественно отвечают составу гидротермально-измененных и гидротермальных типов. Спектры распределения REE слабо дифференцированы, имеют плоский, выположенный характер, выраженную отрицательную Eu-аномалию (рис. 2). Ce-аномалия меняет свой знак от отрицательного до положительного (Ce/Ce* от 0.26 до 11.10), при этом преимущественно имеет отрицательный характер. Среднее содержание неформульных элементов в цирконах с отсутствующей или отрицательной Ce-аномалией составляет (ppm): P – 9500, Ca – 8400, Nb – 4400, Y – 2400, Ti – 940, REE и Sr – 540, Ba – 440,

Li – 167. Для зерна циркона с анализом 10.1 с признаками отсутствия изменения и типичной для магматического циркона положительной Ce-аномалией, содержание неформульных элементов на порядок ниже.

Величина тетрадного эффекта в цирконе для первой тетрады (TE_1: La-Ce-Pr-Nd) в точках с отсутствующей или крайне незначительной Ce-аномалией находится в диапазоне 0.18-0.54, что по конфигурации отвечает редко встречаемому в геологических объектах тетрадному эффекту W-типа. Проявление тетрадного эффекта W-типа имеют единичные находки, которые были установлены для флюорита, криолита (Monecke et al., 2002; Minuzzi et al., 2008; Monecke et al., 2011) и в расплавных включениях в кварце (Peretyazhko, Savina, 2010). При этом в апатите из пегматитов и мусковитового гранита Коктогай (Китай) было обнаружено проявление тетрадного эффекта M-типа ($TE_{1,3}$ = 0.99-1.66, Cao et al., 2013), которое было обусловлено разделением исходного расплава на две несмешивающиеся жидкие фазы: на фторидную и силикатную.

Изотопный состав кислорода демонстрирует вариабельные значения $\delta^{18}O$, они изменяются от 3.85 до 15.64‰. При этом доминирующая часть цирконов имеет значение, превышающее мантийное (около 5.3‰, Valley et al. 1998) и соответствующая средним значениям (6-8‰), установленным для циркона из гранитоидов фанерозойского возраста (Valley et al., 2005). Однако более высокие значения $\delta^{18}O$ (8-15‰) объясняются кристаллизацией циркона из расплавов со значительным вкладом коровой компоненты, а в измененных зонах цирконов, как правило, свидетельствуют о их кристаллизации в неравновесных условиях в присутствии флюида с высокими значениями $\delta^{18}O$, возможно, взаимодействовавшего с осадочными породами.

Исходный магматический расплав для Алахинского штока был флюидонасыщенный с высокими начальными концентрациями летучих и легких элементов. По данным (Анникова и др., 2016) флюидная фаза, отделившаяся во время кристаллизации гранит-порфиров, была, главным образом, водной, и насыщенной натрием и фтором, что способствовало образованию рудных минералов. Циркон имеет признаки растворения и перекристаллизации, геохимические характеристики, свойственные для циркона гидротермально-метасоматического типа (Hoskin, 2005), что также свидетельствует о присутствии в системе флюидов, насыщенным летучими компонентами (Li, F, B, и др.).

Проявление тетрадного эффекта в распределении REE в цирконах связывается с воздействием на них рудообразующего Li-F-содержащего флюида. Обособление флюидной фазы из исходного флюидонысыщенного расплава происходило с возникновением жидкостной несмесимости и привело к разделению расплава на силикатную и фторидную фазу, что в свою очередь способствовало перераспределению REE. Как правило, в высокодифференцированных гранитах в таких случаях наблюдается тетрадный эффект M-типа. В то время как обратный ему тетрадный эффект W-типа с большей вероятностью может быть обнаружен в минералах, образованных из фторидных комплексов, что объясняется (Sastri et al., 2003) сорбцией ряда элементов REE (La, Nd, Gd, Ho, Er, Lu), которые большей легкостью образуют фторидные соединения.

Выводы**.** 1. На циркон из лейкогранит-порфиров Алахинского штока воздействовал флюид, насыщенный летучими компонентами (H_2O, F, B, и др.), литием и тяжелым изотопом кислорода. Возникновение тетрадного эффекта W-типа в распределении REE в цирконе вызвано жидкостной несмесимостью под воздействием рудообразующего Li-F-содержащего флюида и перекристаллизаций циркона за счет фторидной фазы.

2. Почти синхронное образование месторождений лития и редких металлов в разных частях Алтайского редкометалльного пояса дает основание для совместных исследований российских и китайских геологов с целью корреляции петрологических особенностей рудопродуктивного магматизма по разной глубине становления редкометалльных рудно-магматических систем. Представляется, что становление сильно фракционированных магм, родоначальных для пегматитов в Китайском Алтае, происходило на значительной глубине, в то время как порфировые редкометальные магмы в Российском Алтае кристаллизовались на

малой глубине. В связи с этим, возможно, что территории с редкометалльно-порфировыми интрузиями на глубине будут перспективными на редкометалльные пегматиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 23-77-01014, https://rscf.ru/project/23-77-01014/.

1. Анникова И.Ю. Владимиров А.Г., Смирнов С.З. Гаврюшкина О.А. Геология и минералогия Алахинского месторождения сподуменовых гранит-порфиров (Горный Алтай, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 5. С. 451-475.
2. Гусев Н.И. Хронология магматизма (SHRIMP II) Калгутинской редкометально-вольфрам-молибденовой рудно-магматической системы (Горный Алтай) // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53. № 3. С. 280-296.
3. Ильин В.А., Халилов В.А., Козлов М.С. и др. О возрасте Алахинского штока Горного Алтая по данным U–Pb и Rb–Sr датирования // Геология и геофизика. 1994. №1. С. 79–81.
4. Мурзинцев Н. Г., Анникова И. Ю., Травин А. В. и др. Термохронология и математическое моделирование динамики формирования редкометалльно-гранитных месторождений Алтайской коллизионной системы // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Том 10 (2). С. 375-404.
5. Cao M.J., Zhou Q.F., Qin K.Z. et a. The tetrad effect and geochemistry of apatite from the Altay Koktokay No. 3 pegmatite, Xinjiang, China: implications for pegmatite petrogenesis // Mineralogy and Petrology. 2013. V. 107. P. 985-1005.
6. Hoskin P.W. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 637-648.
7. Kostitsyn Y.A., Vystavnoy S.A., Vladimirov A.G. Age and genesis of the spodumene-bearing granites of the SW Altai (Russia): an isotopic and geochemical study // Acta Universitatis Caroline. Geologica. 1998. V. 42(1). P. 60–63.
8. Monecke T., Kempe U., Monecke J., Sala M., Wolf D. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66. P. 1185-1196.
9. Monecke T., Kempe U., Trinkler M. et al. Unusual rare earth element fractionation in a tin-bearing magmatic-hydrothermal system // Geology. 2011. V. 39. P. 295-298.
10. Minuzzi O.R., Bastos Neto A.C., Formoso M.L. et al. Rare earth element and yttrium geochemistry applied to the genetic study of cryolite ore at the Pitinga Mine (Amazon, Brazil) // An. Da Acad. Bras. De Ciências. 2008. V. 80. P. 719-733.
11. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Tetrad effects in the rare earth element patterns of granitoid rocks as an indicator of fluoride-silicate liquid immiscibility in magmatic systems // Petrology. 2010. V. 18. P. 514-543.
12. Valley J.W., Kinney P.D., Schulze D.J., Spicuzza M.J. Zircon megacrysts from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. V. 133. P. 1-11.
1. Valley J.W., Lackey J.S., Cavosie A.J. et al. 4.4 billion years of crustal maturation: Oxygen isotope ratios of magmatic zircon. Contrib. Mineral. Petrol. 2005. V. 150. P. 561-580.
13. Sastri V.S., Bünzli J.C., Perumareddi J.R. et al. Modern Aspects of Rare Earths and Their Complexes. Elsevier: Amsterdam, Netherlands. 2003. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51010-5.X5014-7
14. Shen P., Pan H.-D., Li C.-H. et al. Newly-recognized Triassic highly fractionated leucogranite in the Koktokay deposit (Altai, China): Rare-metal fertility and connection with the No. 3 pegmatite // Gondwana Research. 2022. 112. P. 24–51

*Transboundary correlation of rare metal magmatism of the Koktokay ore district (China) and the Alakha ore cluster (Russia) in the Greater Altai

Gusev N.I.[1], Kovalenko E.V.[2], Skublov S.G.[2]
[1]Karpinsky Russian Geological Institute, nikolay_gusev@vsegei.ru; [2]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), skublov@yandex.ru

The Altai rare-metal province extends approximately 800 km and can be traced from Russia and Kazakhstan through China into Mongolia. Deposits in Kazakhstan and China are predominantly represented by rare-metal pegmatites, whereas those in Russia and Mongolia are composed mainly of rare-metal granites. The most significant deposits in Russia and China are located within the Mongol–Altai terrane and have Triassic–Jurassic ages ranging from 220 to 180 Ma. The largest pegmatite deposits have been discovered in the Chinese Altai, where more than 100,000 pegmatite veins are known. However, the parental granites of most rare-metal pegmatites (such as Koktokay, Kaluan, etc.) remained unidentified until recently. Only recently, highly fractionated rare-metal leucogranites were identified at the Koktokay deposit (Shen et al., 2022). The U–Pb age of the leucogranites (224–220 Ma) agrees well with the U–Pb age of pegmatite No. 3 (220 ± 1–3 Ma). Ar–Ar dating of muscovite from the same leucogranite samples yields ages of 182–177 Ma, indicating a new Early Jurassic hydrothermal event.

In this context, rare-metal granites (without pegmatites) of similar age in the Russian Altai are of particular interest. Greisen-type tungsten deposits and occurrences are widespread in this region. However, lithium mineralization has been established only at the Kalgutinskoye (ongonites) and Alakhinskoye (spodumene porphyries) deposits, and in a spodumene aplite dike within the Kungurdzharin intrusive (Annikova et al., 2016).

The Kalgutinsk granite batholith hosts the eponymous Mo–W greisen and Mo-porphyry deposits. The formation of the batholith lasted for over 30 million years (215–181 Ma; Gusev, 2011). A belt of 125 porphyry dikes (204 ± 2 – 201 ± 1 Ma) is located in the eastern part of the batholith, extending 17 km in length and 5 km in width. Rare-metal ongonites make up 10 dikes (Li 0.1–0.27 wt%, Cs 0.07–0.18 wt%, P_2O_5 0.5–1.0 wt%). The lithium mineral amblygonite (montebrasite, 8–9 wt% Li_2O) occurs as inclusions in potassium feldspar. Isotopic dating results for the Kalgutinsk ore–magmatic system reveal five stages of magmatism, though Li mineralization is observed only in stages III and IV, with ongonites dated at 202 ± 5 and 195 ± 1 Ma (Murzintsev et al., 2019).

The Alakhinskoye spodumene-porphyry deposit comprises two stocks (1000 × 650 m and 400 × 250 m), emplaced into Early Devonian (413 Ma) tonalites. These stocks consist of Mus-Spd-Kfsp-Ab granite porphyries, with an apical zone of albitites. The spodumene granite porphyries contain Li_2O ranging from 0.24–1.46 wt% (average: 0.98 wt%), and Ta_2O_5 ranging from 70–180 ppm (average: 114 ppm) (Annikova et al., 2016). The forecasted potential of the Alakhinskoye spodumene granite porphyries is estimated at 68 million tonnes of ore with an average spodumene content of 5%, equivalent to approximately 3.4 million tonnes of spodumene concentrate or 448,000 tonnes of Li_2O.

The Alakhinsk stocks are considered to be Early Jurassic in age, formed by the crystallization of lithium-rich felsic magma. U–Pb zircon dating yielded ages of 183 and 188 Ma (Ilyin et al., 1994), while Rb–Sr isochron dates were 195 ± 3 Ma (Ilyin et al., 1994) and 198.6 ± 1.1 Ma (Kostitsyn et al., 1998). These dates are imprecise due to high-U zircon (1609–31140 ppm), metamictization, and high discordance (25–1575%) (Fig. 1). Most zircon grains are idiomorphic, with patchy internal structures and zoned rims (Fig. 2). The central zones of most crystals are highly altered, featuring bud-shaped micropores typical of hydrothermally altered zircon and inclusions of rock-forming and uranium minerals. Only one crystal (spot 10.1 in Fig. 2) remained unaffected by alteration and

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

recrystallization. This grain has U = 544 ppm, Th = 293 ppm, Th/U = 0.56, resembling magmatic zircon. Its $^{206}Pb/^{238}U$ age is 325 Ma, with a discordance of 184%.

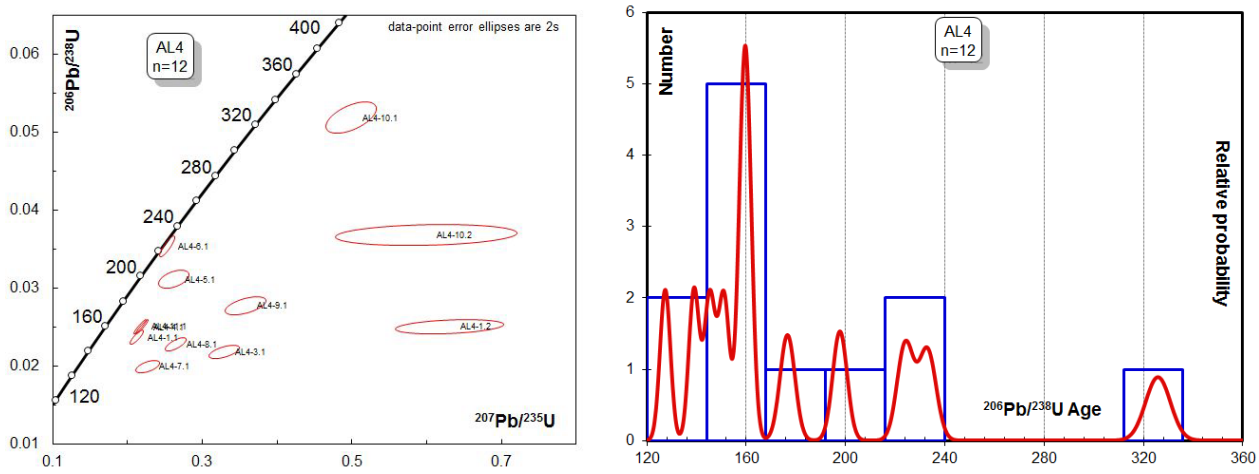


Fig. 1. SHRIMP II zircon dating results from the Alakhinsky leucogranite porphyry stock (sample AL4)

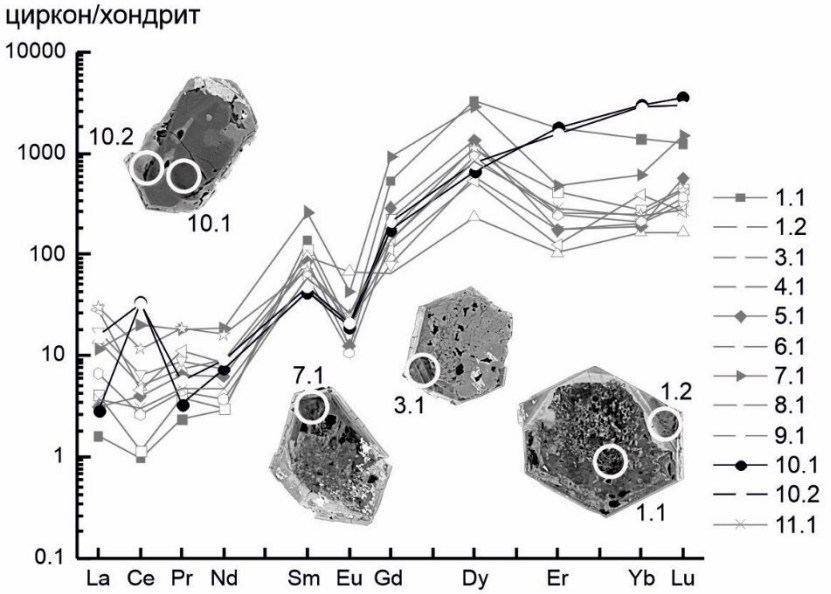


Fig. 2. BSE images of zircon from AL4 leucogranite porphyries of the Alakhin stock (crater diameter = 20 μm). REE distribution spectra normalized to CI chondrite

The light BSE rims contain up to 18.2 wt% HfO_2 (EPMA data), along with elevated P_2O_5, FeO, and to a lesser extent CaO and Nb_2O_5. SIMS data reveal zircon saturated in rare and non-formula elements. The geochemical characteristics mostly correspond to hydrothermally altered or hydrothermal zircon. The REE spectra are weakly fractionated, showing flat patterns and a pronounced negative Eu anomaly (Fig. 2). Ce anomaly ranges from negative to positive (Ce/Ce* = 0.26–11.10), predominantly negative. The average concentrations of non-formula elements in zircons lacking Ce anomaly or with negative Ce anomaly are (ppm): P – 9500, Ca – 8400, Nb – 4400, Y – 2400, Ti – 940, REE + Sr – 540, Ba – 440, Li – 167. For grain 10.1, which lacks alteration and has a positive Ce anomaly typical of magmatic zircon, concentrations of these elements are an order of magnitude lower.

The tetrad effect magnitude in zircon for the first tetrad (TE1: La–Ce–Pr–Nd) in spots with minimal or absent Ce anomaly ranges from 0.18 to 0.54, corresponding to the rare W-type tetrad effect. W-type tetrads have been reported in fluorite, cryolite (Monecke et al., 2002; Minuzzi et al.,

2008; Monecke et al., 2011), and in melt inclusions in quartz (Peretyazhko & Savina, 2010). In contrast, apatite from Koktokay (China) pegmatites and muscovite granite exhibits M-type tetrads (TE1,3 = 0.99–1.66, Cao et al., 2013), attributed to melt separation into immiscible fluoride and silicate phases.

Zircon oxygen isotopic composition shows variable $\delta^{18}O$ values from 3.85 to 15.64‰. Most zircons exceed the mantle value (~5.3‰, Valley et al., 1998), aligning with average values for zircons from Phanerozoic granitoids (6–8‰, Valley et al., 2005). Higher $\delta^{18}O$ values (8–15‰) are attributed to crystallization from melts with a significant crustal component; in altered zones, these values suggest disequilibrium crystallization in the presence of a high-$\delta^{18}O$ fluid, possibly interacting with sedimentary rocks.

The parental melt of the Alakhin stock was fluid-saturated and enriched in volatiles and light elements. According to Annikova et al. (2016), the exsolved fluid phase was primarily aqueous, rich in Na and F, promoting ore mineral formation. Zircon exhibits dissolution and recrystallization features and has geochemical characteristics typical of hydrothermal–metasomatic zircon (Hoskin, 2005), supporting the presence of F- and Li-rich volatile phases.

The observed tetrad effect in REE distributions in zircon is attributed to interaction with an ore-forming Li–F-bearing fluid. Liquid immiscibility in the parental melt led to the separation of silicate and fluoride phases, redistributing REE. In highly differentiated granites, M-type tetrads are typical. In contrast, W-type tetrads, observed here, are more likely in minerals crystallized from fluoride-rich fluids, due to preferential sorption of REE (La, Nd, Gd, Ho, Er, Lu) that easily form fluoride complexes (Sastri et al., 2003).

Conclusions:

1. Zircon from the Alakhin leucogranite porphyry was affected by a fluid rich in volatiles (H_2O, F, B), lithium, and heavy oxygen isotopes. The observed W-type tetrad effect in zircon REE distributions was caused by liquid immiscibility due to the ore-forming Li–F-bearing fluid and recrystallization from the fluoride phase.
2. The nearly synchronous formation of lithium and rare-metal deposits in different parts of the Altai rare-metal belt suggests the need for collaborative research between Russian and Chinese geologists to correlate the petrological features of ore-bearing magmatism at different crustal levels. Highly fractionated magmas parental to pegmatites in the Chinese Altai likely formed at greater depths, whereas porphyritic rare-metal magmas in the Russian Altai crystallized at shallow depths. Therefore, areas with deep-seated rare-metal porphyry intrusions may be prospective for rare-metal pegmatites.

The research was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-77-01014, https://rscf.ru/project/23-77-01014/.

1. Annikova I.Yu., Vladimirov A.G., Smirnov S.Z., Gavryushkina O.A. Geology and mineralogy of the Alakhin spodumene granite-porphyry deposit (Gorny Altai, Russia) // Geology of Ore Deposits. 2016. Vol. 58, No. 5. P. 451–475.
2. Gusev N.I. Chronology of magmatism (SHRIMP II) of the Kalgutin rare-metal–W–Mo ore–magmatic system (Gorny Altai) // Geology of Ore Deposits. 2011. Vol. 53, No. 3. P. 280–296.
3. Ilyin V.A., Khalilov V.A., Kozlov M.S. et al. On the age of the Alakhin stock (Gorny Altai) based on U–Pb and Rb–Sr data // Geology and Geophysics. 1994. No. 1. P. 79–81.
4. Murzintsev N.G., Annikova I.Yu., Travin A.V. et al. Thermochronology and mathematical modeling of rare-metal granite deposit formation in the Altai collisional system // Geodynamics & Tectonophysics. 2019. Vol. 10 (2). P. 375–404.
5. Cao M.J., Zhou Q.F., Qin K.Z. et al. Tetrad effect and geochemistry of apatite from the Altay Koktokay No. 3 pegmatite, Xinjiang, China: implications for pegmatite petrogenesis // Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 107. P. 985–1005.
6. Hoskin P.W. Trace-element composition of hydrothermal zircon and alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. Vol. 69. P. 637–648.

7. Kostitsyn Y.A., Vystavnoy S.A., Vladimirov A.G. Age and genesis of the spodumene-bearing granites of the SW Altai (Russia): an isotopic and geochemical study // Acta Univ. Carol. Geol. 1998. Vol. 42(1). P. 60–63.
8. Monecke T., Kempe U., Monecke J., Sala M., Wolf D. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. Vol. 66. P. 1185–1196.
9. Monecke T., Kempe U., Trinkler M. et al. Unusual rare earth element fractionation in a tin-bearing magmatic-hydrothermal system // Geology. 2011. Vol. 39. P. 295–298.
10. Minuzzi O.R., Bastos Neto A.C., Formoso M.L. et al. REE and Y geochemistry applied to the genesis of cryolite ore at the Pitinga Mine (Amazon, Brazil) // An. Acad. Bras. Ciências. 2008. Vol. 80. P. 719–733.
11. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Tetrad effects in REE patterns of granitoid rocks as indicators of fluoride–silicate melt immiscibility // Petrology. 2010. Vol. 18. P. 514–543.
12. Valley J.W., Kinney P.D., Schulze D.J., Spicuzza M.J. Zircon megacrysts from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. Vol. 133. P. 1–11.
13. Valley J.W., Lackey J.S., Cavosie A.J. et al. 4.4 billion years of crustal maturation: Oxygen isotope ratios of magmatic zircon // Contrib. Mineral. Petrol. 2005. Vol. 150. P. 561–580.
14. Sastri V.S., Bünzli J.C., Perumareddi J.R. et al. Modern Aspects of Rare Earths and Their Complexes. Elsevier, Amsterdam. 2003. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51010-5.X5014-7
15. Shen P., Pan H.-D., Li C.-H. et al. Newly-recognized Triassic highly fractionated leucogranite in the Koktokay deposit (Altai, China): Rare-metal fertility and connection with the No. 3 pegmatite // Gondwana Research. 2022. Vol. 112. P. 24–51.

Метасоматическая зональность как фактор прогноза золото-медно-молибденового оруденения в пределах Шахтаминского рудного узла

Груздев Р.В., Юргенсон Г.А.
ИПРЭК СО РАН, г. Чита, Россия, rogruzdev@mail.ru

Месторождения медно-молибден-порфировой формации являются основными источниками меди и молибдена, а также ассоциирующими с ними золота, серебра, рения, висмута и других химических элементов. Согласно данным сайта http://www.mineral.ru/ эти месторождения заключают в себе примерно 60 % мировых подтвержденных запасов меди и молибдена.

Шахтаминский рудный узел является составной частью одноимённого свинец-вольфрам-золото-молибденового рудного района. В геолого-структурном плане расположен в центральной части Борзя-Газимурской синклинали, являющейся частью структуры, сформировавшейся в коллизионной обстановке в результате закрытия палеозойского Монголо-Охотского океанического бассейна и коллизии Северо-Азиатского и Сино-Корейского кратонов. Особенности структурной позиции рудного узла определяются его приуроченностью к области сопряжения северо-восточной Борзя-Газимурской, субширотной Шахтамино-Золинской, северо-западной Шахтамино-Донинской тектонических зон. Последние выполняют роль магмоподводящих каналов для рудоносных гранитоидов высококалиевой известково-щелочной серии шахтаминского и нерчинскозаводского (?) комплексов и определяют положение локальных рудолокализующих структур с жильно-штокверковым оруденением. Наиболее значимой геологической единицей в пределах рудного узла выступает Шахтаминское рудное поле, где известен единственный промышленный объект (не считая крупных россыпей золота) – Шахтаминское жильное месторождение молибдена, открытое в 1936 г. Месторождение, эксплуатировалось с 1941 г. по 1997 г. шахтным способом. Запасы Mo по категориям $A+B+C_1$ при содержании 0,51% составляли 4,046 тыс. т, по категории C_2 – 2,379 тыс. т. Кроме Mo в рудных телах присутствовали Pb – до 26,1%, Zn – до 8,2%, Cu – до 3,1%, Bi – до 0,59%, Ag – до 331 г/т, Au – до 17 г/т, а также Re, Se, Te. Не смотря на комплексный состав жильных руд, при переработке извлекался только молибденит. К 1997 году числившиеся промышленные запасы отработаны, незначительные остатки их списаны с Госбаланса.

Рудный узел практически полностью локализован в гранитоидах средней-поздней юры слабоэродированного, одноимённого, многофазного, зонального массива площадью до 140 кв. км, прорывающего батолитовые гранитоиды ундинского комплекса и образования морской терригенной молассы нижней юры. По обширному гравитационному и магнитному минимумам устанавливается принадлежность массива гранитоидному плутону с площадью в проекции на дневную поверхность свыше 500 кв. км (Юргенсон и др., 2023).

Шахтаминское месторождение молибдена приурочено к центральной части Шахтаминского рудного узла (рис. 1). Дайки и штоки в совокупности трассируют надапикальную часть невскрытого на уровне современного эрозионного среза массива рудогенерирующих гранитов третьей фазы шахтаминского комплекса (?). Особое положение в структуре площади занимают эксплозивные брекчии трубок взрыва, располагающиеся в непосредственной близости от субвулканических штоков гранит-порфиров и вместе с ними образующие локальные флюидно-эксплозивные структуры. Проявленные здесь гидротермально-метасоматические процессы связаны со становлением рудоносного порфирового комплекса, площадь их развития с учетом периферии составляет более 20 кв. км. Морфология гидротермально-метасоматической зоны напоминает ассиметричный эллипс, вытянутый в северо-западном направлении (рис. 2).

Процессы метасоматических изменений в пределах Шахтаминского месторождения в принципе известны (Берзина и др., 2013, Петровская, 1973; Сотников и др., 1995). Однако зоны околорудноизмененных горных пород за пределами собственно Шахтаминского

месторождения выявлены лишь в последнее время в результате геологоразведочных работ «Востокгеология» (Юргенсон, Груздев, 2024).

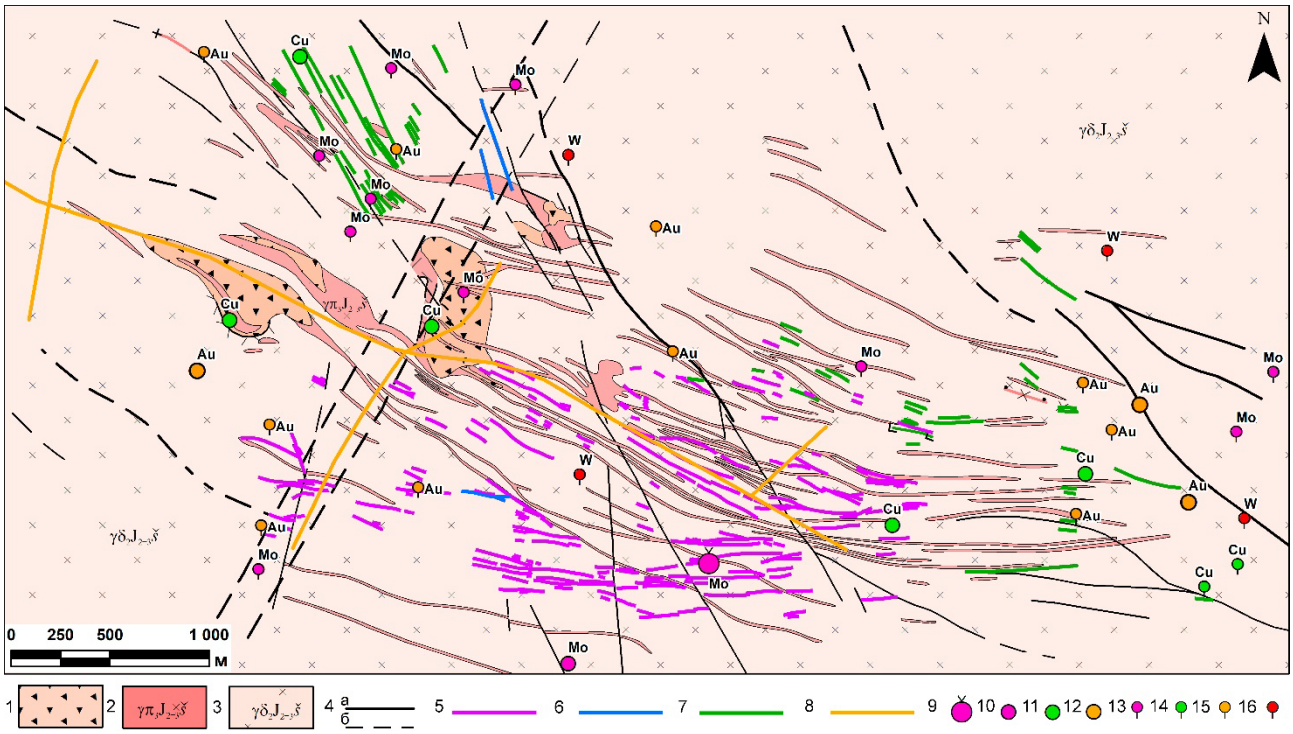


Рис.1. Схема геологического строения центральной части Шахтаминского рудного узла

1 – эксплозивно-гидротермальные брекчии; 2 – гранит-порфиры (третья фаза, шахтаминский комплекс); 3 – гранодиориты (вторая фаза, шахтаминский комплекс); 4 – разрывные нарушения (а – достоверные; б – предполагаемые); 5 – молибденит-кварцевые жилы; 6 – жилообразные зоны с молибденитовой и полиметаллической минерализацией; 7 – жилообразные зоны с молибденитовой и халькопиритовой минерализацией; 8 – россыпи золота; 9 – месторождение молибдена (Шахтаминское); 10 – проявление молибдена; 11 – проявление меди; 12 – проявление золота; 13 – пункт минерализации молибдена; 14 – пункт минерализации меди; 15 – пункт минерализации золота; 16 – пункт минерализации вольфрама.

В центральной части рудного поля в гранодиоритах второй фазы преобладают метасоматиты кварц-калишпатового состава, вмещающие жильное и прожилково-вкрапленное молибденовое оруденение, представляющее своеобразное молибденит-кварцевое «ядро». К полям развития молибденит-кварцевых жил приурочено Шахтаминское месторождение молибдена (см. рис. 1). В обрамлении зоны кварцевых калишпатитов с молибденовой минерализацией выделяется зона биотитовых калишпатитов с молибденит-халькопиритовой минерализацией. Биотитовые калишпатиты слагают внешние зоны и других гидротермально-метасоматических формаций (филлизитов, березитов), развитых по тектоническим нарушениям и зонам дробления. Рудная минерализация в них представлена преимущественно халькопиритом, пиритом и блёклой рудой. Содержания меди в зонах биотитовой калишпатизации обычно невысокие – до 0,2 %, редко 0,3 %.

В обрамлении штока гранодиорит-порфиров третьей фазы шахтаминского комплекса картируются тела эксплозивно-гидротермальных брекчий, процессы образования которых обсуждались ранее (Кепежинскас, Кепежинскас, 1964; Сотников и др., 1995; Берзина и др., 2013). Согласно нашим данным эксплозивные брекчии состоят из различных по составу обломков, заключенных в сложный цемент. В цементе и в обломках эксплозивно-гидротермальных брекчий наблюдается борнит-халькопирит-пиритовая золотосодержащая вкрапленная и прожилково-вкрапленная минерализация, в которой также развиты магнетит,

молибденит и шеелит. Содержания меди в эксплозивно-гидротермальных брекчиях порядка 0,2-0,7 %.

Среди биотитовых калишпатитов с халькопиритовой и молибденитовой минерализацией по тектоническим зонам встречаются кварц-серицитовые метасоматиты с пирит-халькопиритовым оруденением (зона филлизитов). Зоны филлизитов развиты по маломощным тектоническим зонам в гранодиоритах второй фазы шахтаминского комплекса гипсометрически выше выхода эксплозивных брекчий. Плагиоклаз в них замещен серицитом, биотит – агрегатом мусковита, кварца и карбоната. Рудные минералы представлены пиритом и халькопиритом, содержания меди в филлизитах достигают 0,24 %.

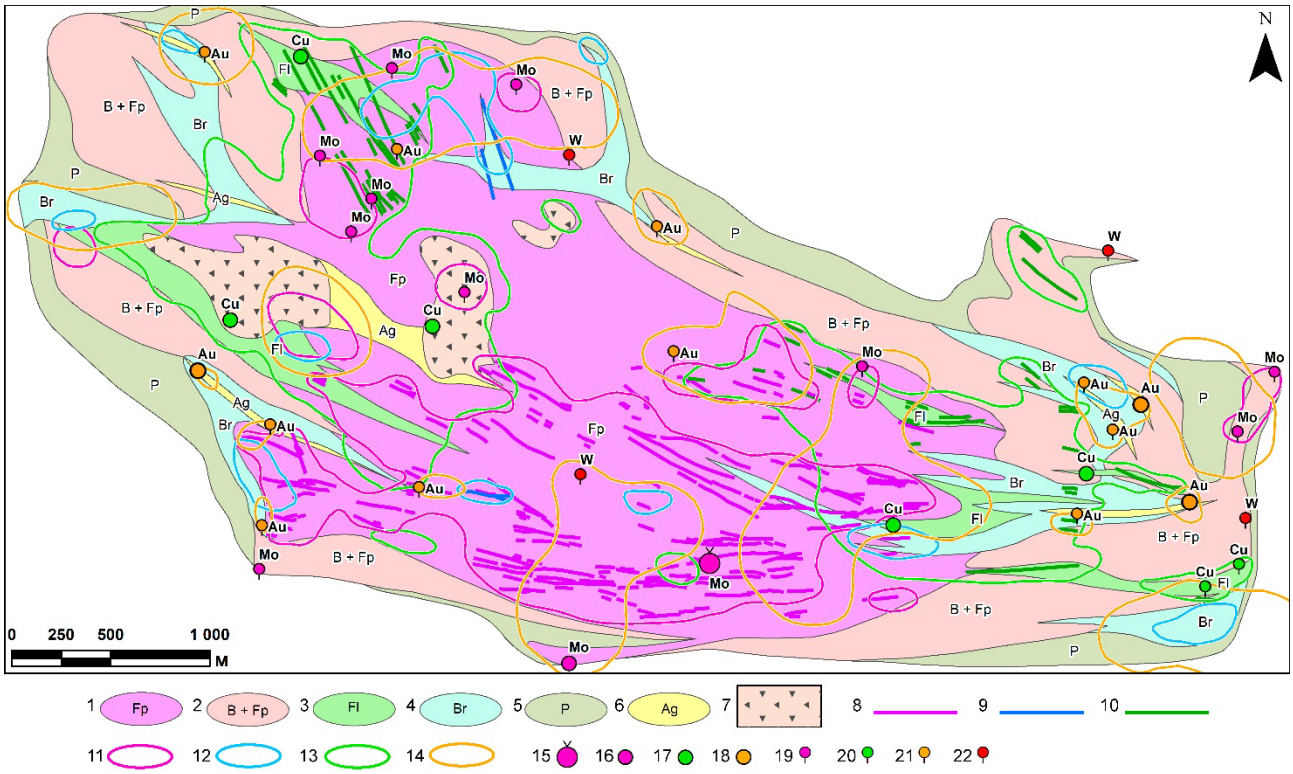


Рис.2. Схема гидротермально-метасоматической зональности центральной части Шахтаминского рудного узла

1 – зона калишпатитов с молибденитом; 2 – зона биотитовых калишпатитов с халькопиритом и молибденитом; 3 – зона филлизитов с пиритом и халькопиритом; 4 – зона березитов с пиритом, сфалеритом и галенитом; 5 – зона пропилитов; 6 – зона аргиллизитов; 7 – эксплозивно-гидротермальные брекчии; 8 – молибденит-кварцевые жилы; 9 – жилообразные зоны с молибденитовой и полиметаллической минерализацией; 10 – жилообразные зоны с молибденитовой и халькопиритовой минерализацией; 11 – литогеохимический ореол молибдена; 12 – литогеохимический ореол свинца; 13 – литогеохимический ореол меди; 14 – литогеохимический ореол золота; 15 – месторождение молибдена; 16 – проявление молибдена; 17 – проявление меди; 18 – проявление золота; 19 – пункт минерализации молибдена; 20 – пункт минерализации меди; 21 – пункт минерализации золота; 22 – пункт минерализации вольфрама.

Широко развиты березиты, проявленные по поздним тектоническим зонам, субширотного и северо-западного направлений. Они состоят из кварца, карбонатов, серицита, пирита и других рудных минералов. В них наблюдаются карбонат-кварцевые, кварцевые прожилки и микропрожилки с вкрапленностью пирита, халькопирита, блеклой руды, галенита, сфалерита, минералов висмута. С березитизацией связана полиметаллическая минерализация и значимые содержания золота. Завершился процесс березитизации проявлениями аргиллизации с образованием каолинита и монтмориллонита, иногда с тонкой вкрапленностью марказита и пирита.

Внешние зоны Шахтаминского рудного поля приурочены к развитию пропилитов. В породе появляются хлорит, эпидот, альбит, карбонат, иногда с тонкой вкрапленностью пирита. В юго-восточной части проявлены кварц-карбонатные жилы, содержащие самородные серебро и низкопробное золото, а также сульфосоли меди и серебра, относящиеся к малоглубинной золотосеребряной формации (Юргенсон, 2020).

Резюмируя изложенное, следует отметить:

1. В результате обобщения результатов изучения Шахтаминского рудного поля, его геотектонического положения и геодинамических условий формирования, новых данных по размещению золото-медно-молибденового и наложенного полиметаллического и золото-серебряного оруденения, новыми данными о пространственном распределении оруденения, его взаимоотношениях с ранней калишпатизацией, ассоциирующей с филлизитами, пропилитами и березитами, и отображении в геохимической зональности, дает основание однозначно отнести его к золото-медно-молибденовой формации.

2. Важным фактором оруденения именно золото-медно-молибден-порфировой формации является четкое сочетание метасоматической, геохимической и минеральной зональности с проявлением зон эксплозивных брекчий с участием в их цементе ранней молибденит-пирит-кварцевой минерализации, а также зональности околорудных изменений.

3. Анализ закономерностей размещения проявлений золото-полиметаллического, а также золото-серебряного оруденения, последние данные поисковых геологоразведочных работ (А.В. Баранов, 2019 г.) свидетельствуют о возможном наибольшим вертикальным диапазоне золото-медно-молибден-порфирового оруденения на юго-восточном и северо-западном флангах Шахтаминского рудного поля.

4. Значительные по площади масштабы гидротермально-метасоматических изменений и их зональность в пределах Шахтаминского рудного поля, раскрывают рудный потенциал объекта и создают условия для поиска рентабельных для открытой отработки залежей вкрапленных комплексных медных руд на флангах Шахтаминского молибденового месторождения.

5. На основании накопленной геологической информации, имеющихся прогнозно-поисковых моделей существуют реальные перспективы переоценки флангов Шахтаминского месторождения на медь и попутные компоненты, в результате чего возможно открытие рентабельных для открытой отработки залежей вкрапленных комплексных медных руд с ожидаемыми запасами более 500 тыс. т меди.

Работа выполнена в рамках проекта FUFR 2021 – 2025 ИПРЭК СО РАН

1. Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О., Крымский Р.Ш., Ларионов А.Н., Николаева И.В., Серов П.А. Шахтаминская Мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, источники, генетическиеи особенности // Геология и геофизика. 2013. Т.54. №6. С. 764–786. https: // doi. Org/10.1016/j.rgg.2013.04.009

2. Кепежинскас В.В., Кепежинскас К.Б., Эруптивные брекчии месторождения Шахтама в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика. 1964. №5. С. 69–81.

3. Петровская С.Г. Зональность ореолов и гидротермально-измененных пород молибденового месторождения на примере Шахтаминского рудного поля в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика, 1973. №9. С. 77–83.

4. Сотников В.И., Берзина А.П., Гимон В.О. Шахтаминское молибденовое месторождение // Месторождения Забайкалья. Т.I. Кн.1. Чита – Москва: Геоинформмарк, 1995. С. 187–192.

5. Юргенсон Г.А. Золотосеребряная минерализация в Шахтаминском рудном поле // Вестник ЗабГУ. 2020. Т.26. №6. С. 54 – 63. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-6-54-63

6. Юргенсон Г.А., Киселёва Г. Д., Доломанова-Тополь А.А., Коваленкер В.А., Петров В.А., Абрамова В.Л., Языкова Ю.И., Левицкая Л.А., Трубкин Н.В., Таскаев В.И., Каримова О.В. Строение, минералого-геохимические особенности и условия образования рудных жил Мо-порфирового месторождения Шахтаминское (Восточное Забайкалье) // Геол. рудн.

месторожд. – 2023. – Т. 65, № 7. – С. 662–699. DOI: 10.30857/S0016777023070092, EDN: GDTHSN.
7. Юргенсон Г.А., Груздев Р.В. Факторы и критерии прогноза и поисков месторождений золото-медно-молибден порфировой формации на примере Шахтаминского рудного района (Восточное Забайкалье) // VII Всероссийская Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике, посвященная 300-летию Российской академии наук и Десятилетию науки и технологий. – Улан-Удэ. – Максимиха, 26–31 августа 2024 г. – С. 145–149.

*Metasomatic Zoning as a Predictive Factor for Gold–Copper–Molybdenum Mineralization within the Shakhtama Ore Cluster

Gruzdev R.V., Yurgenson G.A.
INREC SB RAS, Chita, Russia, rogruzdev@mail.ru

Porphyry-type copper–molybdenum deposits are the principal sources of copper and molybdenum, and are also enriched in associated elements such as gold, silver, rhenium, bismuth, and others. According to data from http://www.mineral.ru, such deposits account for approximately 60% of the world's confirmed reserves of copper and molybdenum.

The Shakhtama ore cluster forms part of the eponymous lead–tungsten–gold–molybdenum metallogenic district. Structurally, it is located in the central part of the Borzya–Gazimur syncline, which formed in a collisional setting during the closure of the Paleozoic Mongol–Okhotsk oceanic basin and subsequent collision between the North Asian and Sino-Korean cratons. The structural position of the cluster is defined by its location at the intersection of three major fault zones: the NE-trending Borzya–Gazimur, the sublatitudinal Shakhtama–Zolin, and the NW-trending Shakhtama–Donin tectonic zones. These zones served as magma-feeding conduits for ore-bearing high-K calc-alkaline granitoids of the Shakhtama and possibly the Nercinsk–Zavod complex, and also controlled the location of local ore-hosting structures with vein–stockwork mineralization.

The most significant geological unit in the ore cluster is the Shakhtama ore field, which hosts its only known economic deposit (excluding large placer gold occurrences): the Shakhtama molybdenum vein deposit, discovered in 1936. It was mined by underground methods from 1941 to 1997. Reserves of Mo (categories A+B+C1) totaled 4,046 tonnes at an average grade of 0.51%; category C2 reserves were 2,379 tonnes. In addition to molybdenum, the ores contained Pb (up to 26.1%), Zn (up to 8.2%), Cu (up to 3.1%), Bi (up to 0.59%), Ag (up to 331 g/t), Au (up to 17 g/t), as well as Re, Se, and Te. Despite this complex composition, only molybdenite was extracted during processing. By 1997, the economic reserves had been depleted and were subsequently removed from the state reserve register.

The ore cluster is almost entirely localized within weakly eroded, multi-phase, zoned granitoids of the eponymous Shakhtama massif of Middle to Late Jurassic age, with a mapped surface area of up to 140 km². This intrusion cuts across batholithic granitoids of the Undin Complex and Lower Jurassic marine molasse deposits. Extensive gravity and magnetic lows indicate that the Shakhtama Massif is part of a large granitoid pluton with a surface projection exceeding 500 km² (Yurgenson et al., 2023).

The Shakhtama molybdenum deposit is located in the central part of the ore cluster (Fig. 1). Dikes and stocks trace the apical portion of a concealed body of ore-generating granites of the third intrusive phase of the Shakhtama Complex (?). Explosive breccia pipes are a distinctive feature of the structure, positioned in close proximity to subvolcanic granite porphyry stocks, jointly forming local fluid–explosive systems.

Hydrothermal–metasomatic processes in this zone are associated with the development of the ore-bearing porphyry system, with an overall surface expression of more than 20 km², including peripheral areas. The morphology of the hydrothermal–metasomatic zone is an asymmetric NW-trending ellipse (Fig. 2).

Metasomatic alteration in the Shakhtama deposit has been previously described (Berzina et al., 2013; Petrovskaya, 1973; Sotnikov et al., 1995). However, zones of ore-related alteration outside the immediate boundaries of the deposit have only recently been revealed through exploration by Vostokgeologiya (Yurgenson & Gruzdev, 2024).

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

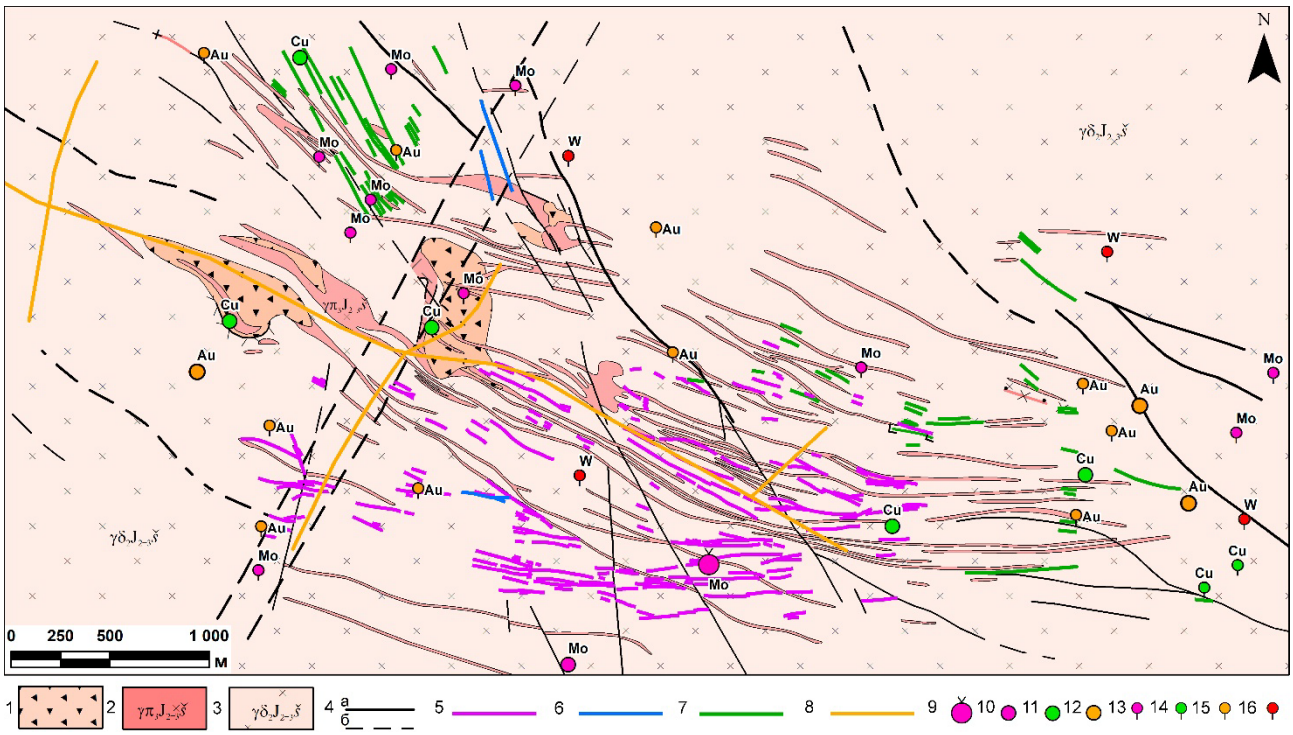


Fig. 1. Geological map of the central part of the Shakhtama ore cluster

1 – explosive-hydrothermal breccias; 2 – granite-porphyry (third phase, Shakhtama complex); 3 – granodiorites (second phase, Shakhtama complex); 4 – faults (a – reliable; b – inferred); 5 – molybdenite-quartz veins; 6 – vein-like zones with molybdenite and polymetallic mineralization; 7 – vein-like zones with molybdenite and chalcopyrite mineralization; 8 – gold placers; 9 – molybdenum deposit (Shakhtaminskoye); 10 – molybdenum occurrence; 11 – copper occurrence; 12 – gold occurrence; 13 – molybdenum mineralization point; 14 – copper mineralization point; 15 – gold mineralization point; 16 – tungsten mineralization point.

In the central part of the ore field, quartz–K-feldspar metasomatites predominate within second-phase granodiorites. These host vein and vein–disseminated molybdenum mineralization, forming a molybdenite–quartz "core." The Shakhtama molybdenum deposit is associated with this zone of molybdenite–quartz veins.

Surrounding the quartz–K-feldspar zone is a biotite–K-feldspar metasomatic halo with molybdenite–chalcopyrite mineralization. These biotite–K-feldspar rocks also form the outer envelopes of other metasomatic zones—phyllic and beresite types—developed along fault and fracture zones. The mineralization here is mainly composed of chalcopyrite, pyrite, and tennantite–tetrahedrite group minerals. Copper contents in biotite–K-feldspar metasomatites typically do not exceed 0.2%, rarely reaching 0.3%.

Explosive–hydrothermal breccia bodies are mapped along the margins of the third-phase granite porphyry stock of the Shakhtama Complex. Their formation has been discussed in previous works (Kepezhinskas & Kepezhinskas, 1964; Sotnikov et al., 1995; Berzina et al., 2013). According to our data, these breccias are composed of compositionally diverse clasts cemented by a complex matrix. Within both the clasts and the cement, bornite–chalcopyrite–pyrite mineralization is observed, often with visible gold. Disseminated and vein–disseminated textures are typical, with accessory magnetite, molybdenite, and scheelite. Copper contents in the explosive–hydrothermal breccias range from approximately 0.2% to 0.7%.

Among the biotite–K-feldspar metasomatites with chalcopyrite and molybdenite mineralization, quartz–sericite metasomatites with pyrite–chalcopyrite mineralization (phyllic alteration zone) are developed along fault zones. These zones occur at higher elevations in second-phase granodiorites compared to the outcrops of explosive breccias. Plagioclase is replaced by

sericite, and biotite by aggregates of muscovite, quartz, and carbonate. Ore minerals include pyrite and chalcopyrite; copper contents in phyllic zones reach up to 0.24%.

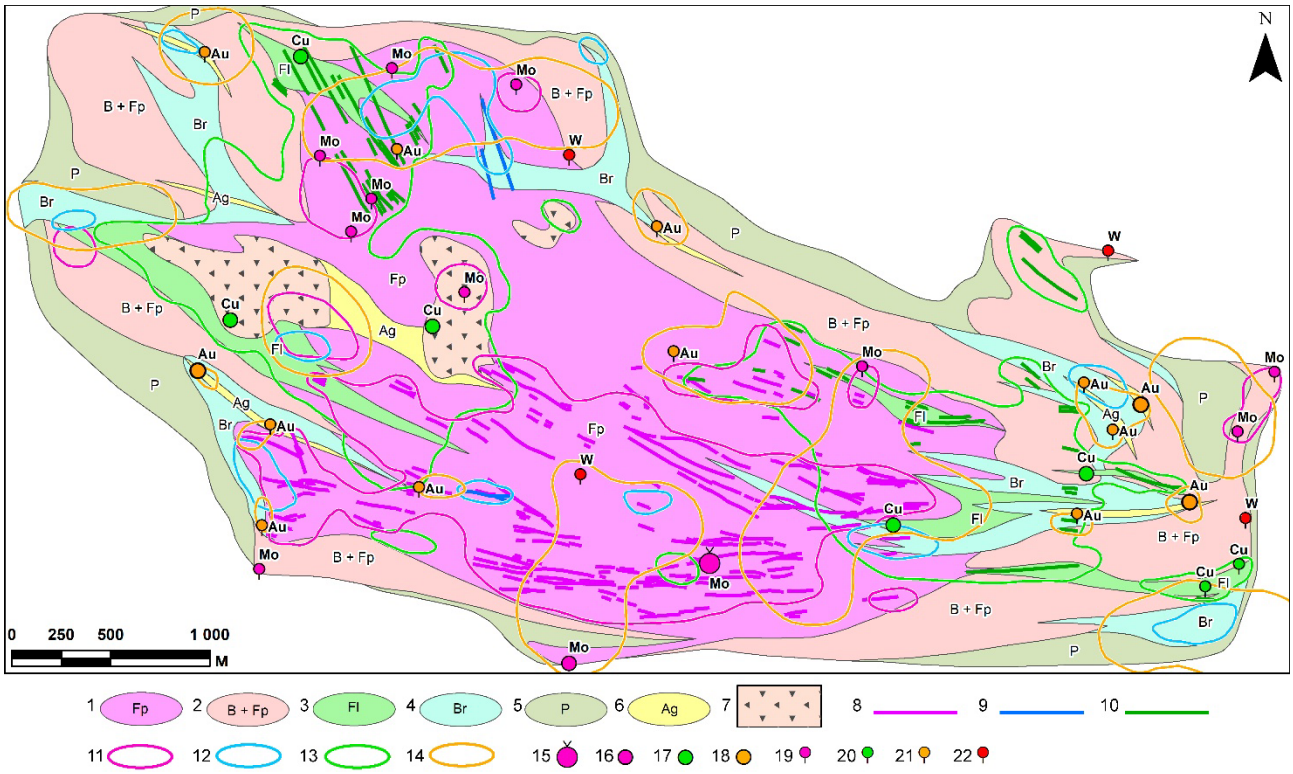


Fig. 2. Map of hydrothermal–metasomatic zoning in the central Shakhtama ore cluster

1 – zone of potassium feldspatites with molybdenite; 2 – zone of biotite potassium feldspatites with chalcopyrite and molybdenite; 3 – zone of phyllicites with pyrite and chalcopyrite; 4 – zone of beresites with pyrite, sphalerite and galena; 5 – zone of propylites; 6 – zone of argillizites; 7 – explosive-hydrothermal breccias; 8 – molybdenite-quartz veins; 9 – vein-like zones with molybdenite and polymetallic mineralization; 10 – vein-like zones with molybdenite and chalcopyrite mineralization; 11 – lithogeochemical halo of molybdenum; 12 – lithogeochemical halo of lead; 13 – lithogeochemical halo of copper; 14 – lithogeochemical halo of gold; 15 – molybdenum deposit; 16 – molybdenum occurrence; 17 – copper occurrence; 18 – gold occurrence; 19 – point of molybdenum mineralization; 20 – point of copper mineralization; 21 – point of gold mineralization; 22 – point of tungsten mineralization.

Beresites are widely developed along late tectonic zones trending sublatitudinally and northwestward. They consist of quartz, carbonates, sericite, pyrite, and other ore minerals, with quartz–carbonate and carbonate veins, microveins, and disseminated pyrite, chalcopyrite, tennantite–tetrahedrite, galena, sphalerite, and bismuth minerals. Beresitization is associated with polymetallic mineralization and significant gold contents. The final stage of beresitization involves argillic alteration with the formation of kaolinite and montmorillonite, occasionally with fine-grained marcasite and pyrite dissemination.

The outer zones of the Shakhtama ore field are marked by propylitic alteration. These rocks contain chlorite, epidote, albite, and carbonate, occasionally with finely disseminated pyrite. In the southeastern part of the area, quartz–carbonate veins are observed, containing native silver and low-fineness gold, along with copper and silver sulfosalts, characteristic of shallow gold–silver formation (Yurgenson, 2020).

Conclusions:

The synthesis of data on the structure of the Shakhtama ore field, its geotectonic position, geodynamic formation setting, newly obtained information on the distribution of gold–copper–molybdenum and overprinted polymetallic and gold–silver mineralization, as well as the spatial

relationships between mineralization and early K-feldspar alteration—associated with phyllic, propylitic, and beresitic zones and reflected in geochemical zoning—clearly supports classifying the Shakhtama ore field as belonging to the gold–copper–molybdenum porphyry formation.

A key ore-controlling factor for this formation is the distinct combination of metasomatic, geochemical, and mineralogical zoning, along with the presence of explosive breccia zones containing early molybdenite–pyrite–quartz mineralization in the cement, and well-developed alteration halos around ore zones.

Analysis of the spatial patterns of gold–polymetallic and gold–silver mineral occurrences, supported by the latest exploration data (A.V. Baranov, 2019), indicates the possibility of the greatest vertical extent of gold–copper–molybdenum porphyry mineralization along the southeastern and northwestern flanks of the Shakhtama ore field.

The large scale of hydrothermal–metasomatic alteration and its zonal structure within the ore field demonstrate the substantial metallogenic potential of the area and define favorable conditions for discovering open-pittable, disseminated, polymetallic copper ores along the flanks of the Shakhtama molybdenum deposit.

Based on the accumulated geological data and existing predictive–exploration models, there is strong potential for reassessing the copper and associated metal resources on the flanks of the Shakhtama deposit. This may lead to the discovery of economically viable, open-pittable deposits with estimated reserves exceeding 500,000 tonnes of copper.

This work was carried out as part of the FUFR 2021–2025 project of IPREK SB RAS.

1. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Krymsky R.Sh., Larionov A.N., Nikolaeva I.V., Serov P.A. The Shakhtama Mo–Porphyry Magmatic System (Eastern Transbaikalia): Age, Sources, and Genetic Features. Geology and Geophysics. 2013. Vol. 54. No. 6. Pp. 764–786. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.04.009
2. Kepezhinskas V.V., Kepezhinskas K.B. Eruptive Breccias of the Shakhtama Deposit, Eastern Transbaikalia. Geology and Geophysics. 1964. No. 5. Pp. 69–81.
3. Petrovskaya S.G. Zoning of Halos and Hydrothermally Altered Rocks in the Molybdenum Deposit Based on the Example of the Shakhtama Ore Field, Eastern Transbaikalia. Geology and Geophysics. 1973. No. 9. Pp. 77–83.
4. Sotnikov V.I., Berzina A.P., Gimon V.O. The Shakhtama Molybdenum Deposit. In: Mineral Deposits of Transbaikalia. Vol. 1, Book 1. Chita–Moscow: Geoinformmark, 1995. Pp. 187–192.
5. Yurgenson G.A. Gold–Silver Mineralization in the Shakhtama Ore Field. Bulletin of Zabaikalsky State University. 2020. Vol. 26. No. 6. Pp. 54–63. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-6-54-63
6. Yurgenson G.A., Kiseleva G.D., Dolomanova-Topol A.A., Kovalenker V.A., Petrov V.A., Abramova V.L., Yazykova Yu.I., Levitskaya L.A., Trubkin N.V., Taskaev V.I., Karimova O.V. Structure, Mineralogical–Geochemical Features, and Formation Conditions of Ore Veins in the Shakhtama Mo–Porphyry Deposit (Eastern Transbaikalia). Geology of Ore Deposits. 2023. Vol. 65. No. 7. Pp. 662–699. DOI: 10.30857/S0016777023070092, EDN: GDTHSN
7. Yurgenson G.A., Gruzdev R.V. Factors and Criteria for Predicting and Exploring Gold–Copper–Molybdenum Porphyry Deposits: A Case Study from the Shakhtama Ore District (Eastern Transbaikalia). In: VII All-Russian Baikal Youth Scientific Conference on Geology and Geophysics, dedicated to the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences and the Decade of Science and Technology. Ulan-Ude, Maksimikha, August 26–31, 2024. Pp. 145–149.

Рудная гидрогеохимическая аномалия в зоне загрязнения подземных вод Читинской ТЭЦ-1

Замана Л.В., Усманова Л.И.
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия,
l.v.zamana@mail.ru, larisaum@mail.ru

В результате фильтрационных утечек из гидрозолоотвала (ГЗО) Читинской ТЭЦ-1, который находится в 3 км к северо-западу от ее площадки и оз. Кенон (рис. 1) и введён в эксплуатацию в 1973 г., сформировался вытянутый до 3 км в юго-восточном направлении ореол загрязнения подземных вод. В гидрогеологическом отношении участок приурочен примерно к середине северо-западного фланга Читино-Ингодинского межгорного артезианского бассейна в зоне транзита подземных вод водоносного комплекса нижнемеловых осадочных отложений доронинской свиты. Породы комплекса на глубину 500-600 м в основном представлены алевролитами и песчаниками с примерно равным соотношением. Наиболее контрастно загрязнение подземных вод по макрокомпонентам проявлено по сульфат-иону, содержания которого превышают 700 мг/л. В районе золоотвала вне зоны его влияния выше по уклону уровня подземных вод концентрации SO_4^{2-} изменялись от 22.8 до 66.0 мг/л (Усманова и др., 2018). Ниже по концентрациям, но примерно при таком же соотношении с фоновыми значениями, проявлено и загрязнение фтором.

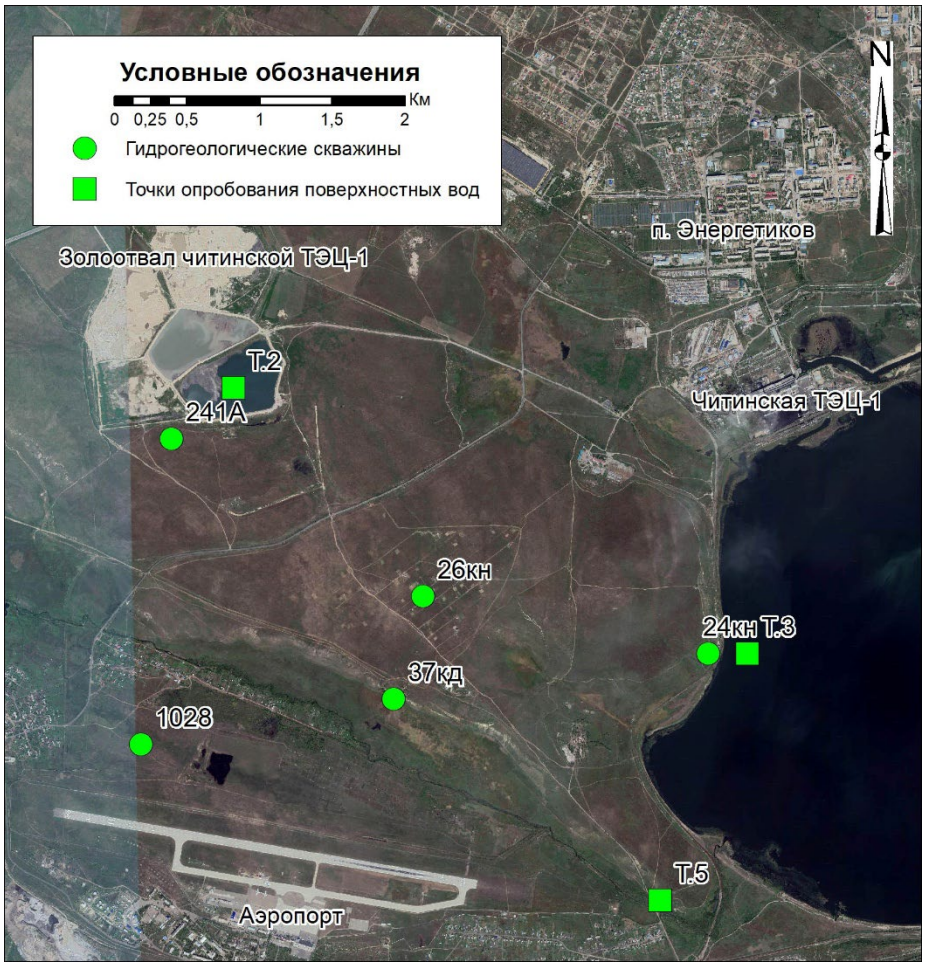


Рис. 1. Схема расположения пунктов гидрогеохимического опробования.

С 2018 г. ИПРЭК СО РАН в рамках госбюджетных и хоздоговорных работ в районе ГЗО периодически проводилось гидрогеохимическое опробование по сети пунктов (см. рис. 1) с определением широкого комплекса микроэлементов, часть которых, относящихся к теме

представленного сообщения, приведена в табл. 1. Компоненты химического состава, Mn и Fe определялись в аттестованной на анализы природных вод лаборатории ИПРЭК СО РАН, анализы на микроэлементы (Li–Pb) выполнены масс-спектрометрическим методом с индуктивно-вязанной плазмой (ICP MS) в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск).

Показатель	ГЗО, т. 2	Скважины					Оз. Кенон, т. 3	Кадалинка, т. 5
		241А	24кн	26кн	37кд	1028		
pH	8.33–10.00	7.00–7.20	6.86–7.40	6.40–7.20	6.80–7.10	6.86–7.40	7.80–8.60	7.30–8.00
SO42–	512–782	568–720	64.8–130	601–765	625–723	43.5–71.0	188–231	81.3–510
F–	5.87–14.8	1.75–6.00	1.28–1.85	1.62–1.99	2.39–2.83	0.25–0.32	1.23–1.44	0.40–0.97
Σ ионов	919–1392	1200–1464	728–849	1176–1462	1234–1405	350–422	555–712	294–1191
Mn	0.004–5.75	0.14–0.68	0.099–0.25	1.52–1.99	0.16–0.45	1.05–1.24	0.003–0.07	0.01–0.47
Fe	0.03–83.2	0.77–21.2	0.65–3.86	0.99–89.0	0.82–5.97	1.52–10.6	0.01–0.25	0.07–0.56
Li	43–97	73–136	76–119	80–143	73–171	22–41	36–60	20–85
Be	0.005–0.031	0.045–0.52	0.002–0.012	0.045–1.82	0.34–1.1	0.004–0.035	0.003–0.012	0.005–0.02
Co	0.13–1.72	0.48–6.60	0.05–3.01	5.60–117.5	0.31–1.22	3.32–7.50	0.04–0.34	0.05–5.11
Ni	0.72–5.79	1.11–12.6	0.64–12.9	23.0–117.4	1.32–3.20	1.88–7.10	1.44–4.08	0.27–6.29
Cu	0.34–5.44	0.43–8.70	0.34–2.60	1.01–7.90	0.57–2.60	0.36–4.90	0.91–5.70	0.67–6.70
Zn	1.23–17.7	5.50–36.0	1.82–20.7	60–1043	6.33–14.9	2.29–12.4	0.13–11.4	0.95–9.50
As	10.0–160	0.2–3.6	0.64–19.0	2.1–75.0	0.49–5.3	0.44–1.9	3.0–12.0	0.28–2.3
Rb	9.56–18.0	17.0–25.7	6.32–7.78	27.0–33.4	12.6–16.8	1.69–2.51	3.40–4.19	0.98–3.80
Mo	49.6–112	2.10–174	1.73–12.0	5.10–22.0	5.40–6.20	0.01–2.15	8.70–17.0	1.27–7.30
Cd	0.12–2.71	0.05–2.49	0.02–1.57	0.18–9.50	0.09–0.23	0.03–3.33	0.04–0.91	0.03–0.77
Tl	0.020–0.089	0.004–0.21	0.001–0.04	0.12–1.13	0.003–0.01	0.009–0.03	0.001–0.01	0.001–0.011
Pb	0.01–0.96	0.05–3.28	0.02–0.61	0.01–1.94	0.01–0.20	0.004–0.55	0.01–0.48	0.007–0.41

Примечание. Данные по Mn и Fe приведены по определениям методом атомной абсорбции.

Таблица 1. Физико-химические характеристики водных проб пунктов опробования в районе размещения гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ-1 в 2018-2021 гг. (SO_4^{2-}–Fe – мг/л, Li–Pb – мкг/л)

Данные по SO_4^{2-} и F^- подтверждают их значение как показателей загрязнения поверхностных и подземных вод утечками из ГЗО. По микроэлементам в контуре загрязнения наиболее высокими максимальными концентрациями по пунктам опробования подземных вод, исключая литий и медь, выделяется скважина 26кн. Эта аномалия, несмотря на её явное отличие по содержанию рудных элементов от других точек гидрогеохимического опробования, в предшествующих публикациях (Усманова, 2019; Фёдоров, Усманова, 2023 и др.) как рудная не рассматривалась. Мы оцениваем её как рудную по следующим причинам.

Универсальными гидрогеохимическими признаками рудных месторождений являются цинк и сульфат-ион (Основы…, 1983). SO_4^{2-}, будучи основным загрязняющим компонентом

вод золоотвала, поисковым индикатором в данном случае рассматриваться не может, тогда как Zn в выявленных концентрациях при их фоновых значениях в воде ГЗО однозначно указывает на наличие рудного источника. Для сравнения, среднее содержание Zn в воде оз. Байкал составляет 3.2 мкг/л при максимуме 14 мкг/л (Ветров и др., 2013), а в подземных водах зоны выщелачивания горных областей – 18.4 мкг/л (Шварцев, 1998).

Рудную природу аномалии подтверждает и её комплексный характер, в особенности концентрации Co, Ni, As. Медь, хотя и входит в число универсальных признаков рудной минерализации, в воде скважины лишь по максимальному содержанию чуть выше значения для отстойника золоотвала, что может быть связано как с низким содержанием её в источнике выноса, так и с ограничением водной миграции значениями pH. Мышьяк, несмотря на его более низкое содержание, чем в воде ГЗО, имеет местный источник, поскольку в подземных водах по другим пунктам концентрации его низкие.

По ассоциации рудных элементов наиболее вероятный тип оруденения полиметаллический, что в какой-то степени подтверждают данные по кадмию, который в основном содержится в сфалерите, хотя содержание свинца фоновое, что также может объясняться нейтральностью водной среды. Учитывая металлогению региона, нельзя исключить принадлежность оруденения и к малоглубинной золотоносной формации. В мезозойском осадочной разрезе локализовано известное Тасеевское месторождение золота. Добавим ко всему, что в воде скважины аномальны содержания Be и Mo, которые являются гидрогеохимическими индикаторами редкометального оруденения (Основы…, 1983, стр. 84).

Высоким содержанием в воде выделяется таллий, что явно свидетельствует об обогащённости им источника выноса, а это может быть дополнительным мотивом для постановки поисково-разведочных работ. Таллий имеет одинаковый атомный радиус с рубидием и концентрируется вместе с ним на поздних этапах магматического процесса в полевых шпатах и слюдах. Наиболее высокое содержание Rb по скважине в сравнении с другими водопунктами (табл. 1) могло бы рассматриваться как показатель связи с этими минералами, но осадочный геологический разрез и ассоциация с рудными элементами указывают на рудный источник Tl.

Отчасти рудным источником могут определяться и содержания сульфат-иона, поскольку по скв. 26кн они выше, чем по ближайшей к ГЗО скв. 241А.

При очевидном интересе к данной аномалии в геолого-поисковом отношении следует обратить внимание на её экологическую опасность, особенно по таллию, который относится к высокотоксичным элементам, и недопустимость использования подземных вод для питьевого водоснабжения на этом участке, который находится в пределах дачного кооператива. При ПДК для вод хозяйственно-питьевого использования всего 0.1 мкг/л (СанПиН 2.1.3684-21) содержание Tl по всем пробам из скв. 26кн выше. Также постоянно выше норм (в скобках, мкг/л) содержание лития (30) и никеля (20), в отдельные сроки – бериллия (0.2), кадмия (1.0), мышьяка (10) и кобальта (100). По макрокомпонентам не соответствуют нормативам данные по фтору (ПДК 1.5 мг/л) и сульфат-иону (500 мг/л).

Подготовлено в рамках выполнения госзадания ИПРЭК СО РАН по теме “Геоэкология водных экосистем Забайкалья в условиях современного климата и техногенеза, основные подходы к рациональному использованию вод и их биологических ресурсов” (№ госрегистрации 121032200070-2).

1. Ветров В.А., Кузнецова А.И., Склярова О.А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 41-51.
2. Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений / Б.А. Колотов, С.Р. Крайнов, В.З. Рубейкин и др. М.: Недра, 1983. 199 с.
3. СанПиН 1.2.3684-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". М., 2021. 469 с.
4. Усманова Л.И., Замана Л.В., Усманов М.Т. Геохимия подземных и поверхностных вод в зоне влияния золоотвала Читинской ТЭЦ-1 // Геологическая эволюция взаимодействия

воды с горными породами: материалы третьей Всероссийской конференции с международным участием (г. Чита, 20–25 августа 2018 г.). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2018. С. 379–382. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-379-382.
5. Усманова Л.И. Гидрогеохимическая характеристика вод зоны влияния гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ–1 // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 166–172.
6. Фёдоров И.А., Усманова Л.И. Оценка современного эколого-гидрогеологического состояния и прогноз его изменения на территории размещения золоотвала Читинской ТЭЦ-1 (Восточное Забайкалье) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 5. С. 52–64. DOI: 10.31857/S0869780923050041.
7. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.

*Ore-Related Hydrogeochemical Anomaly in the Contamination Zone of Groundwater near Chita CHP-1

Zamana L.V., Usmanova L.I.
INREC SB RAS, Chita, Russia, l.v.zamana@mail.ru, larisaum@mail.ru

As a result of filtration leaks from the ash and slag disposal area (ASDA) of the Chita CHP-1, which has been in operation since 1973 and is located approximately 3 km northwest of the power station and Lake Kenon (Fig. 1), a southeastward-extending groundwater contamination plume up to 3 km long has formed. Hydrogeologically, the area is situated on the northwestern flank of the Chita-Ingoda intermontane artesian basin, within the groundwater transit zone of the Lower Cretaceous sedimentary aquifer complex of the Doroninskaya Suite. Down to depths of 500–600 m, this complex predominantly comprises siltstones and sandstones in approximately equal proportions.

Contamination of groundwater by major components is most pronounced in terms of sulfate ions, with concentrations exceeding 700 mg/L. Upgradient from the ASDA and outside its influence, sulfate concentrations in groundwater ranged from 22.8 to 66.0 mg/L (Usmanova et al., 2018). Fluoride pollution is also observed at lower concentrations but exhibits a similar ratio to background values.

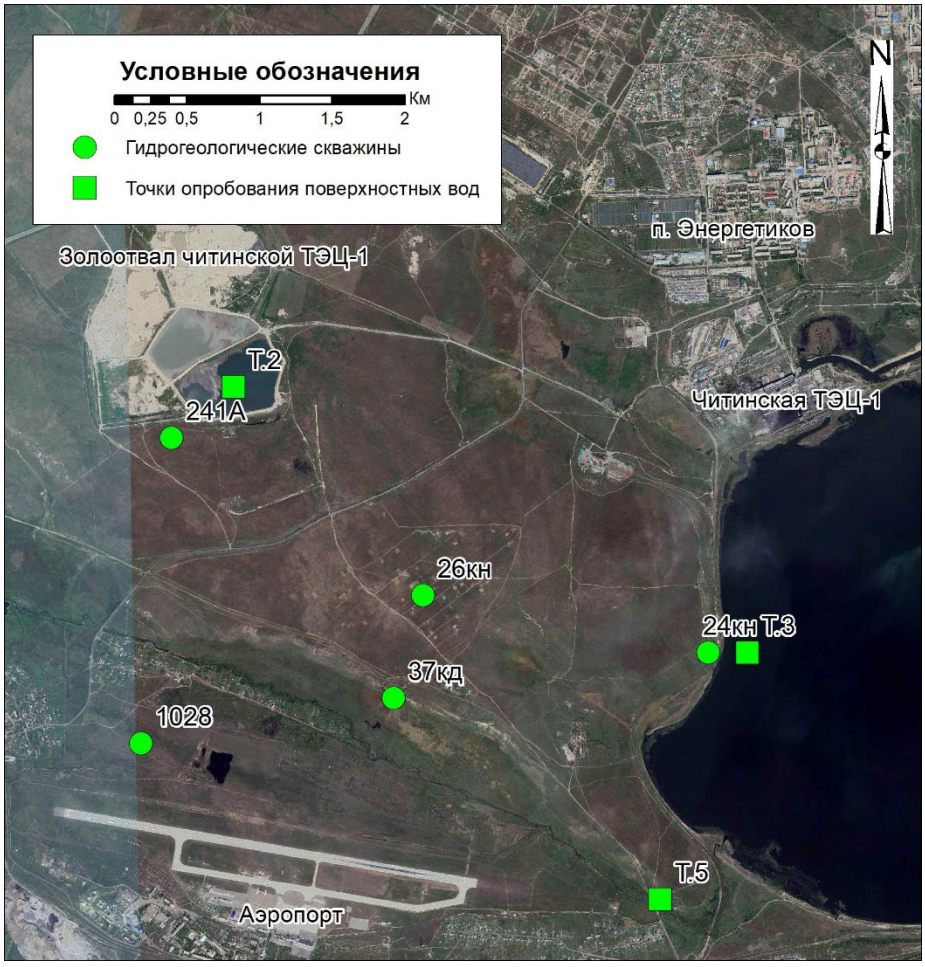


Fig. 1. Layout of groundwater hydrogeochemical sampling points.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Since 2018, the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the SB RAS has been periodically conducting hydrogeochemical sampling in the ASDA area as part of state-funded and contract-based projects. Water samples were collected from a network of observation points (see Fig. 1), and a wide range of trace elements was analyzed. Selected elements relevant to the topic are presented in Table 1. The major components Mn and Fe were analyzed at the certified laboratory of the Institute for the analysis of natural waters. Trace elements (Li–Pb) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk).

Table 1. Physicochemical characteristics of water samples from observation points in the ASDA area of Chita CHP-1, 2018–2021 (SO_4^{2-}–Fe in mg/L; Li–Pb in μg/L; Mn and Fe determined by atomic absorption spectrometry)

Parameter	ASDA, p. 2	Wells					Kenon, p. 3	Kadalinka, p. 5
		241A	24кн	26кн	37кд	1028		
pH	8.33–10.00	7.00–7.20	6.86–7.40	6.40–7.20	6.80–7.10	6.86–7.40	7.80–8.60	7.30–8.00
SO42–	512–782	568–720	64.8–130	601–765	625–723	43.5–71.0	188–231	81.3–510
F–	5.87–14.8	1.75–6.00	1.28–1.85	1.62–1.99	2.39–2.83	0.25–0.32	1.23–1.44	0.40–0.97
Σ ions	919–1392	1200–1464	728–849	1176–1462	1234–1405	350–422	555–712	294–1191
Mn	0.004–5.75	0.14–0.68	0.099–0.25	1.52–1.99	0.16–0.45	1.05–1.24	0.003–0.07	0.01–0.47
Fe	0.03–83.2	0.77–21.2	0.65–3.86	0.99–89.0	0.82–5.97	1.52–10.6	0.01–0.25	0.07–0.56
Li	43–97	73–136	76–119	80–143	73–171	22–41	36–60	20–85
Be	0.005–0.031	0.045–0.52	0.002–0.012	0.045–1.82	0.34–1.1	0.004–0.035	0.003–0.012	0.005–0.02
Co	0.13–1.72	0.48–6.60	0.05–3.01	5.60–117.5	0.31–1.22	3.32–7.50	0.04–0.34	0.05–5.11
Ni	0.72–5.79	1.11–12.6	0.64–12.9	23.0–117.4	1.32–3.20	1.88–7.10	1.44–4.08	0.27–6.29
Cu	0.34–5.44	0.43–8.70	0.34–2.60	1.01–7.90	0.57–2.60	0.36–4.90	0.91–5.70	0.67–6.70
Zn	1.23–17.7	5.50–36.0	1.82–20.7	60–1043	6.33–14.9	2.29–12.4	0.13–11.4	0.95–9.50
As	10.0–160	0.2–3.6	0.64–19.0	2.1–75.0	0.49–5.3	0.44–1.9	3.0–12.0	0.28–2.3
Rb	9.56–18.0	17.0–25.7	6.32–7.78	27.0–33.4	12.6–16.8	1.69–2.51	3.40–4.19	0.98–3.80
Mo	49.6–112	2.10–174	1.73–12.0	5.10–22.0	5.40–6.20	0.01–2.15	8.70–17.0	1.27–7.30
Cd	0.12–2.71	0.05–2.49	0.02–1.57	0.18–9.50	0.09–0.23	0.03–3.33	0.04–0.91	0.03–0.77
Tl	0.020–0.089	0.004–0.21	0.001–0.04	0.12–1.13	0.003–0.01	0.009–0.03	0.001–0.01	0.001–0.011
Pb	0.01–0.96	0.05–3.28	0.02–0.61	0.01–1.94	0.01–0.20	0.004–0.55	0.01–0.48	0.007–0.41

The data on SO_4^{2-} and F^- concentrations confirm their importance as indicators of surface and groundwater contamination from ASDA leakage. Among trace elements, the highest maximum concentrations in the groundwater contamination contour—excluding lithium and copper—were recorded in well 26kn. Despite this anomaly showing a distinct pattern of ore-related elements compared to other hydrogeochemical sampling points, it has not previously been considered an ore-related anomaly in earlier publications (Usmanova, 2019; Fyodorov & Usmanova, 2023, etc.).

We interpret this anomaly as ore-related based on the following reasons. Zinc and sulfate ions are recognized as universal hydrogeochemical indicators of ore deposits (Fundamentals..., 1983).

Since SO_4^{2-} is the main contaminant from the ash disposal site, it cannot serve as a reliable prospecting indicator in this case. In contrast, Zn concentrations at the levels identified—when compared to its background values in ASDA water—clearly suggest an ore-related source. For comparison, the average Zn content in Lake Baikal water is 3.2 μg/L, with a maximum of 14 μg/L (Vetrov et al., 2013), and in groundwater from leaching zones in mountainous regions it averages 18.4 μg/L (Shvartsev, 1998).

The ore-related nature of the anomaly is also confirmed by its multi-element character, particularly elevated concentrations of Co, Ni, and As. Although copper is also a typical indicator of ore mineralization, in this case, its maximum level in well 26kn is only slightly higher than in the ASDA sedimentation pond, which could be due either to low Cu content in the source or limited mobility in water at the measured pH values. Arsenic, although lower in concentration compared to ASDA water, likely originates from a local source, as its concentrations at other sampling points are much lower.

Based on the association of ore elements, the most likely ore type is polymetallic, as indirectly supported by cadmium data—Cd is commonly found in sphalerite. The background-level lead concentrations may reflect limited solubility due to the neutral pH. Considering the metallogeny of the region, it is also possible that the mineralization belongs to a shallow-level gold-bearing formation. The well-known Taseevskoye gold deposit is hosted in the Mesozoic sedimentary sequence of the area.

Moreover, well 26kn displays anomalous Be and Mo concentrations, both considered hydrogeochemical indicators of rare-metal mineralization (Fundamentals..., 1983, p. 84).

The high thallium (Tl) content in the water clearly indicates that the source area is enriched in this toxic element, which underscores the importance of conducting exploration and delineation work. Thallium has an ionic radius comparable to that of rubidium and tends to concentrate alongside it during the late stages of magmatic processes, especially in feldspars and micas. The highest rubidium concentrations detected in well 26kn, compared to other monitoring points (Table 1), could suggest a connection with these minerals; however, the sedimentary geological setting and the association with ore elements point instead to a mineralized origin for Tl.

To some extent, the elevated sulfate levels in well 26kn—higher than those in well 241A, which is located closer to the ASDA—may also indicate an ore-related contribution.

While this anomaly is clearly of geological and prospecting interest, its ecological risks must not be overlooked—particularly due to thallium, a highly toxic element. Groundwater from this area is not suitable for drinking purposes, especially considering that the site lies within a dacha cooperative. According to SanPiN 2.1.3684-21, the maximum permissible concentration (MPC) of Tl in drinking water is 0.1 μg/L, and this threshold is exceeded in all samples from well 26kn. Concentrations of other elements also routinely exceed regulatory limits (in μg/L): lithium (30), nickel (20), and occasionally beryllium (0.2), cadmium (1.0), arsenic (10), and cobalt (100). Among macrocomponents, fluoride (MPC 1.5 mg/L) and sulfate (MPC 500 mg/L) also surpass permissible levels.

This work was carried out under the state assignment of the Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology SB RAS within the framework of the project "Geoecology of aquatic ecosystems in Transbaikalia under contemporary climate and technogenic influence: key approaches to the sustainable use of waters and their biological resources" (state registration no. 121032200070-2).

1. Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal // Geography and Natural Resources. 2013. No. 3. P. 41–51.
2. Fundamentals of Hydrogeochemical Prospecting for Ore Deposits / B.A. Kolotov, S.R. Kraynov, V.Z. Rubeykin et al. Moscow: Nedra, 1983. 199 p.
3. SanPiN 1.2.3684-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and/or harmlessness of environmental factors to humans". Moscow, 2021. 469 p.

4. Usmanova L.I., Zamana L.V., Usmanov M.T. Geochemistry of surface and groundwater in the area affected by the ash disposal site of Chita CHP-1 // Geological Evolution of Water-Rock Interactions: Proceedings of the 3rd All-Russian Conference with International Participation (Chita, August 20–25, 2018). Ulan-Ude: Publishing House of BSC SB RAS, 2018. P. 379–382. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-379-382.
5. Usmanova L.I. Hydrogeochemical characteristics of waters in the impact zone of the ash disposal site of Chita CHP-1 // Advances in Current Natural Sciences. 2019. No. 11. P. 166–172.
6. Fyodorov I.A., Usmanova L.I. Assessment of the current ecological-hydrogeological state and forecast of its change in the area of the ash disposal site of Chita CHP-1 (Eastern Transbaikalia) // Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology. 2023. No. 5. P. 52–64. DOI: 10.31857/S0869780923050041.
7. Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of the Hypergenesis Zone. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: Nedra, 1998. 366 p.

Геодинамические обстановки формирования фанерозойских магматических комплексов Аргунского блока (ЮВ Забайкалье, Китай, Монголия)

Кайгородова Е.Н., Андреева О.В., Козловский А.М., Петров В.А.
ИГЕМ РАН, katmsu@mail.ru

Аргунский блок представляет собой важную тектоническую и металлогеническую единицу в восточной части Центрально-Азиатского подвижного пояса (ЦАПП) ввиду исключительной насыщенности его разнообразными полезными ископаемыми. Он расположен в границах трех государств – России, Китая и Монголии, но большая его часть приходится на территорию Восточного Забайкалья.

Имеющиеся материалы о времени формирования, изменении петрогеохимических и изотопно-геохимических характеристик главных магматических комплексов и эффузивно-субвулканических серий в течение не только позднемезозойского, но и более древних тектоно-магматических циклов (ТМЦ), позволяют наметить основные тенденции в развитии и распространении разнообразных типов оруденения и связанных с ним метасоматических образований. Обоснование представлений о последовательных ТМЦ в контексте обстановок формирования рудоносных систем Южного Приаргунья приведено в (Петров и др., 2017).

Аргунский блок (террейн) ограничен мезозойским Монголо-Охотским швом (сутурой) на северо-западе, на юге – палеозойским Сигуиту-Таюаньским швом, отделяющим на юго-востоке Аргунский блок от структур Большого Хингана. На юго-западе блок граничит с Центрально-Монгольским террейном. Предполагается (Tang et al., 2013), что Аргунский и Центрально-Монгольский блоки были соединены в раннем палеозое и составляли единый Центрально-Монгольско-Аргунский блок. В пределах Аргунского блока широко распространены неопротерозойские и палеозойские гранитоиды и мезозойские вулканические и интрузивные породы среднего и кислого составов (рис. 1).

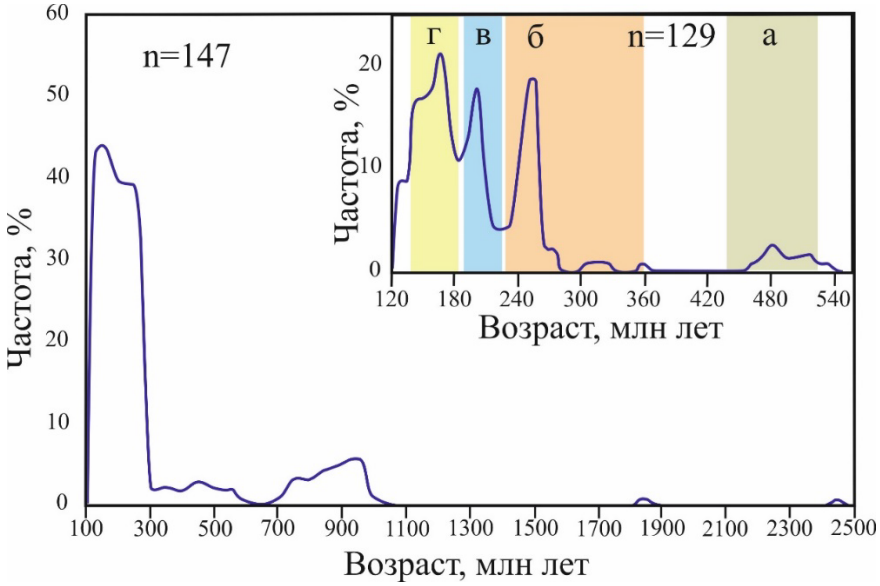


Рис. 1. Гистограмма распределения проявлений магматизма в пределах Аргунского блока. На врезке – отрезок для фанерозоя. а – раннепалеозойский ТМЦ, б – средне-позднепалеозойский ТМЦ, в – раннемезозойский ТМЦ, г – позднемезозойский ТМЦ.

Породы фундамента Аргунского блока в основном сложены неопротерозойскими метаосадочными породами и гранитными комплексами с небольшим количеством мезо-палеопротерозойских метаморфических пород, а сам блок, по сути, является частью Ханкайско-Салаирского орогена (Zhao et al., 2014). Фундамент Аргунского блока был сильно

переработан в результате фанерозойского орогенеза и в целом его возраст и тектоническая эволюция остаются не до конца ясными.

Породы каледонского ТМЦ имеют ограниченное распространение в пределах Аргунского блока, они представлены габбро, диоритами и гранитоидами. Данные магматические породы в Аргунском блоке сформировались в условиях растяжения, которые, вероятно, были связаны с постколлизионной эволюцией Аргунского блока и Большого Хингана.

Породы герцинского ТМЦ развития Аргунского блока представлены в основном интрузивными кислыми разностями. Исключение составляют позднепермские-раннетриасовые (253–248 млн лет) габброиды интрузий Вума в Китае. Палеозойские вулканические породы представлены каменноугольными трахиандезитами и дацитами на северо-востоке Китая (Zhang et al., 2010). В пределах российской части Аргунского блока интенсивность проявления магматических и рудно-метасоматических процессов в позднем палеозое заметно возрастает, что связано с обширными внедрениями гранитоидов позднепермского возраста (ундинский комплекс). На уровне современного эрозионного среза эти гранитоиды занимают огромные площади юго-восточного Забайкалья. Это грандиозное геологическое событие часто связывают с мантийными плюмами как одними из важнейших проявлений механизмов глубинной геодинамики (Ярмолюк, Кузьмин, 2012). Существует и альтернативная точка зрения (Dril et al., 2017), согласно которой формирование огромных объемов гранитных магм рассматривается как результат аккреции террейнов, вулканических дуг с Сибирским палеоконтинентом. Предполагается, согласно изотопным данным, что эти террейны стали субстратом для дальнейшего проявления гранитоидного P2-T1 магматизма (ундинский комплекс, формирование которого отвечает интервалу 257–244 млн лет).

Интрузивные породы раннего и среднего триаса наблюдаются в виде пояса в китайской части Аргунского блока. Они представлены широким диапазоном пород от габбро до гранитов (в основном диоритами, кварцевыми диоритами, гранодиоритами, монцогранитами и сиеногранитами), с которым пространственно связаны крупные порфировые Cu-Mo месторождения. Предполагается, что магматизм триасовых и раннеюрских магматических пород (Wang et al., 2024) в Аргунском блоке происходил в обстановке активной континентальной окраины, связанной с продолжающейся субдукцией на юг Монголо-Охотской океанической плиты под Аргунский блок, в то время как последующий этап (позднеюрский и раннемеловой магматизм) происходил в условиях растяжения и, вероятно, был вызван подъемом астеносферы.

Заметное снижение магматической активности в течение средней юры знаменует собой смену режима от позднетриасового-раннеюрского нормального и адакитового известково-щелочного магматизма к позднеюрскому-раннемеловому внутриплитному магматизму. Позднеюрский-раннемеловой постколлизионный магматизм маркирует собой окончательное закрытие Монголо-Охотского океана. По данным (Сасим и др., 2012) в конце мезозоя, завершая эпоху мощных преобразований в строении и составе литосферы, проявились интенсивные процессы сводо- и грабенообразования, а также активный магматизм, породивший широкое разнообразие интрузивных магматических комплексов, вулканических серий и вулкано-плутонических ассоциаций, в том числе проявление магматических пород повышенной щелочности, которые характеризуются обычно повышенными содержаниями некогерентных элементов. В этот период в юго-восточном Забайкалье сформировался ряд разновозрастных вулканических и плутонических комплексов пород (Ступак и др., 2016), со многими из которых связаны месторождения и рудопроявления различных полезных ископаемых.

Систематизация данных об изотопном составе Nd салических коровых интрузивных и вулканических пород, распространенных на территории Аргунского блока (рис. 2) показывает, что все породы имеют величины $\varepsilon_{Nd}(t)$ более -8.6. Такие значения существенно выше поля изотопной эволюции раннедокембрийской континентальной коры и не предполагают наличия масштабного древнего фундамента в основании блока. Наиболее низкие значения $\varepsilon_{Nd}(t)$

согласуются с полями изотопной эволюции континентальной коры неопротерозойских террейнов центральной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (Тувино-Монгольского и Дзабханского), в которых раннедокембрийские породы представлены ограничено (Козаков и др., 2021; Ярмолюк и др., 2017), так же, как и в Аргунском блоке.

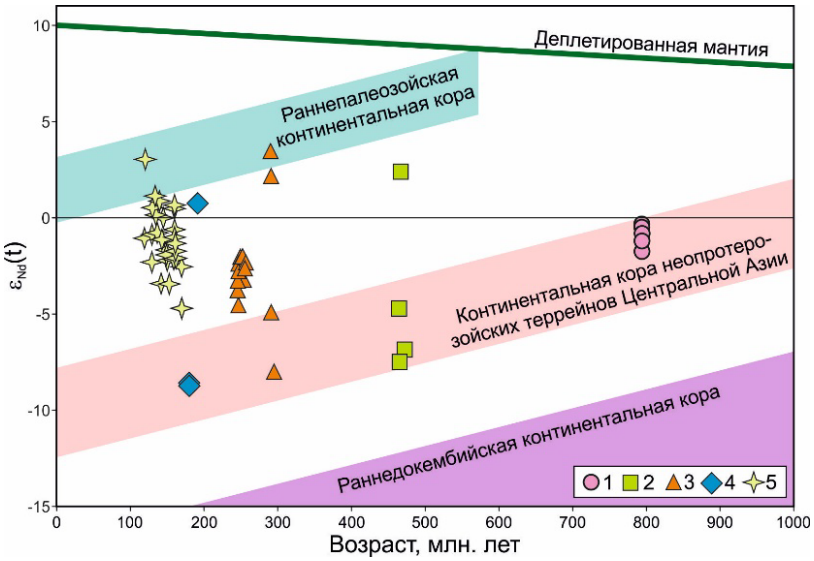


Рис. 2. Изотопный состав Nd салических магматических пород Аргунского блока относительно полей изотопной эволюции разновозрастной континентальной коры Центральной Азии. 1–4 – магматические породы основных этапов магматизма: 1 – неопротерозойский ТМЦ, 2 – раннепалеозойский (каледонский) ТМЦ, 3 – позднепалеозойский (герцинский) ТМЦ, 4 – раннемезозойский ТМЦ, 5 – позднемезозойский ТМЦ (Петров и др., в печати).

Изотопный состав Nd большинства позднепалеозойских и мезозойских магматических пород смещается от поля изотопной эволюции континентальной коры неопротерозойских террейнов Центральной Азии вверх – в сторону изотопных составов ювенильной континентальной коры (Ярмолюк, Кузьмин, 2012). В больше мере это характерно для наиболее молодых средне- и позднемезозойских пород, большинство из которых имеют значения $\varepsilon_{Nd}(t)$ в диапазоне от –3.5 до +1.1. В этот диапазон попадают и составы вулканических пород Стрельцовского рудного поля (Коваленко и др., 2015). Такое смещение изотопных составов корового салического магматизма свидетельствует о проявленных процессах андерплейтинга неопротерозойской коры Аргунского блока ювенильным материалом, происходящих на разных этапах его тектоно-магматической переработки в палеозое и мезозое. При этом по мере омоложения магматизма доля ювенильного материала в его источнике возрастала (см. рис. 2).

Таким образом, Аргунский блок имеет сложную историю развития, представляющую собой в фанерозое эволюционную смену геодинамических обстановок, возникавших в океаническую, переходную и континентальную стадии развития Монголо-Охотской области. На приграничной с Россией территории СВ Китая (Аргунский металлогенический пояс и структуры Большого Хингана) отсутствуют (или пока не обнаружены) редкометальные Li-F граниты, аналогичные кукульбейским и, соответственно, генетически связанные с ними Sn, W, Li, Ta, Nd, Be месторождения. Наряду с этим в ЮВ Забайкалье отсутствуют (или пока не обнаружены) магматиты T3-J1 возраста, которые в китайской части блока ассоциируют с крупными Cu-Mo месторождениями порфирового типа. Не исключено, что отсутствие или слабое развитие магмато-гидротермальных процессов в триасе ЮВ Забайкалья соответствует известной для этой части Евразии закономерности омоложения тектономагматических событий в направлении северо-востока ЦАПП при «ножницеобразном» закрытии Монголо-Охотского палеоокеана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ №13.1902.24.44 (Соглашение № 075-15-2024-641).

1. Коваленко Д.В., Петров В.А., Полуэктов В.В., Агеева О.А. Геодинамическая позиция мезозойских мантийных пород Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье), мантийные домены Центральной Азии и Китая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 4. Вып. 28. С. 24-39.
2. Козаков И.К., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Диденко А.Н., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М. Формирование неопротерозойской континентальной коры в структурах центрального сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2021. Т. 29. № 2. С. 195-224.
3. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Тектоно-магматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445-469.
4. Сасим С.А., Чуканова В.С., Ильина Н.Н., Семенова Ю.В., Ощепкова А.В. Геохимия вулканических пород позднемезозойской рифтогенной ассоциации Александрово-Заводской впадины (Юго-Восточное Забайкалье) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2012. Т. 5. № 2. С. 209-228.
5. Ступак Ф.М., Кудряшова Е.А., Лебедев В.А. О юрском вулканизме и вулканах Шадоронской впадины Юго-Восточного Забайкалья // Вулканология и сейсмология. 2016. № 2. С. 18-31.
6. Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И. Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометальный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 5. С. 375-399.
7. Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Лебедев В.И. Неопротерозойские магматические комплексы Сонгинского блока (Монголия): к проблеме образования и корреляции докембрийских террейнов Центрально-Азиатского орогенного пояса // Петрология. 2017. Т. 25. № 4. С. 362-394.
8. Dril S.I., Noskova Yu.V., K.-L. Wang K.L., Belyaev V.A., Skuzovatov S.Yu., Grigoriev D.A., Belkov D.A. Geochronology Sr-Nd isotope geochemistry of late paleozoic collisional granitoids of Undinsky complex (Eastern Transbaikalia region) // Geodynamics and tectonophysics. 2017. V. 8. No. 3. P. 405-408.
9. Tang J., Xu W.-L., Wang F., Wang W., Xu M.-J., Zhang Y.-H. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent // Precambrian research. 2013. No. 224. P. 597-611.
10. Zhang F.Q., Chen H.L., Cao R.C., Meng Q.A., Zhu D.F., Wang, Z.G. Discovery of late paleozoic adakite from the basement of the Hailaer Basin in NE China and its geological implication // Acta Petrologica Sinica. 2010. V. 26. P. 633-641 (in Chinese with English abstract)
11. Zhao Sh., Xu W., Wang W., Tang J., Zhang Y. Geochronology and geochemistry of middle–late Ordovician granites and gabbros in the Erguna region, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Erguna Massif // Journal of Earth Science. 2014. V. 25. No. 5. P. 841-853.
12. Wang Y., Zhao Y., Shui X., Tao Z. Petrogenesis of the Early Jurassic–Early Cretaceous adakite-like rocks in the Erguna Block, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Mongol–Okhotsk Ocean // Minerals. 2024. 14. 725.

***Geodynamic Settings of the Formation of Phanerozoic Magmatic Complexes of the Argun Block (SE Transbaikalia, China, Mongolia)**

Kaygorodova E.N., Andreeva O.V., Kozlovsky A.M., Petrov V.A.
IGEM RAS, katmsu@mail.ru

The Argun Block represents a significant tectonic and metallogenic unit within the eastern part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) due to its exceptional endowment in diverse mineral resources. Geographically, it extends across the territories of three countries—Russia, China, and Mongolia—with the majority located within Eastern Transbaikalia.

Available data on the timing of formation, petrological-geochemical, and isotope-geochemical characteristics of the major magmatic complexes and effusive-subvolcanic series, not only from the Late Mesozoic but also from earlier tectono-magmatic cycles (TMCs), make it possible to identify major evolutionary trends in the distribution and development of diverse ore types and associated metasomatic formations. The justification of sequential TMCs in the context of ore-forming systems of Southern Priargunye is presented in (Petrov et al., 2017).

The Argun Block (terrain) is bounded to the northwest by the Mesozoic Mongol-Okhotsk suture, and to the south by the Paleozoic Siguitu-Taiyuan suture, separating the block from the Greater Xing'an structures. To the southwest, it borders the Central Mongolian terrain. It is assumed (Tang et al., 2013) that the Argun and Central Mongolian blocks were joined in the Early Paleozoic, forming a unified Central Mongolian–Argun block. Within the Argun Block, Neoproterozoic and Paleozoic granitoids are widespread, along with Mesozoic volcanic and intrusive rocks of intermediate to felsic composition (Fig. 1).

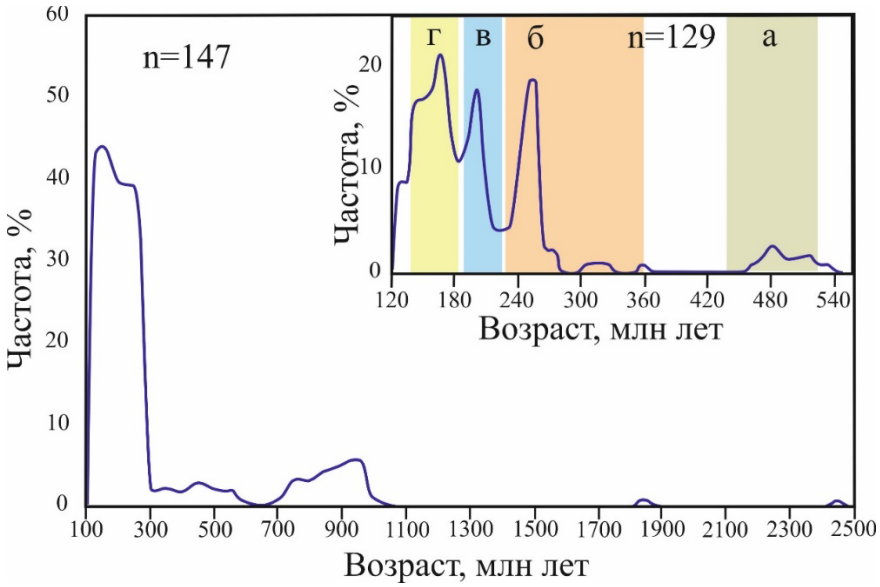


Fig. 1. Histogram of the distribution of magmatic occurrences within the Argun Block. Inset – Phanerozoic interval. a – Early Paleozoic TMC, b – Middle to Late Paleozoic TMC, c – Early Mesozoic TMC, d – Late Mesozoic TMC.

The basement rocks of the Argun Block are mainly composed of Neoproterozoic metasedimentary rocks and granite complexes, with minor occurrences of Meso- to Paleoproterozoic metamorphic formations. In essence, the block is part of the Khanka–Salair orogenic system (Zhao

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

et al., 2014). The basement was significantly reworked by Phanerozoic orogenesis, and its precise age and tectonic evolution remain not fully understood.

Rocks of the Caledonian TMC are of limited extent within the Argun Block and are represented by gabbros, diorites, and granitoids. These rocks formed under extensional conditions likely associated with the post-collisional evolution of the Argun and Greater Xing'an blocks.

Rocks of the Hercynian TMC in the Argun Block are mainly composed of felsic intrusive varieties. An exception is the Late Permian–Early Triassic (253–248 Ma) gabbroic intrusions of the Wuma suite in China. Paleozoic volcanic rocks are represented by Carboniferous trachyandesites and dacites in northeastern China (Zhang et al., 2010). In the Russian part of the Argun Block, the intensity of magmatic and ore-related metasomatic processes increased significantly during the Late Paleozoic, associated with widespread emplacement of Late Permian granitoids (Undinsky Complex). At the current erosion level, these granitoids occupy vast areas of southeastern Transbaikalia. This grand-scale geological event is often attributed to mantle plume activity, considered one of the key mechanisms of deep geodynamic processes (Yarmolyuk & Kuzmin, 2012). An alternative hypothesis (Dril et al., 2017) suggests that the formation of large volumes of granite magma resulted from the accretion of terrains and volcanic arcs to the Siberian paleocontinent. Isotopic data imply that these terrains became a substrate for subsequent P2–T1 granitoid magmatism (Undinsky Complex, dated at 257–244 Ma).

Early and Middle Triassic intrusive rocks occur as a belt within the Chinese part of the Argun Block. These include a wide range of compositions, from gabbros to granites (mainly diorites, quartz diorites, granodiorites, monzogranites, and syenogranites), spatially associated with major porphyry Cu-Mo deposits. It is assumed that Triassic to Early Jurassic magmatism (Wang et al., 2024) in the Argun Block occurred in an active continental margin setting, related to continued southward subduction of the Mongol–Okhotsk oceanic plate beneath the Argun Block. A subsequent stage (Late Jurassic to Early Cretaceous magmatism) developed under extensional conditions, possibly due to asthenospheric upwelling.

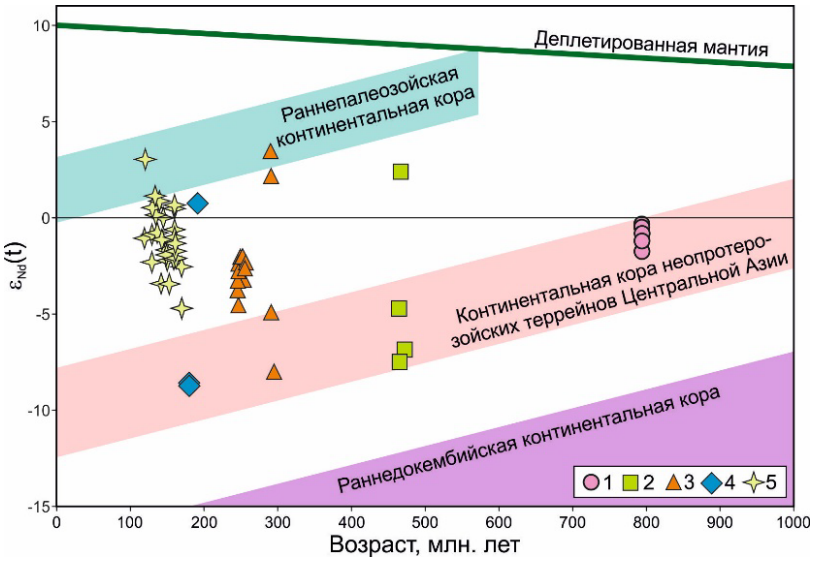


Fig. 2. Nd isotopic composition of felsic magmatic rocks of the Argun block relative to the isotopic evolution fields of continental crust of different ages in Central Asia.

1–4 – magmatic rocks of the main magmatic stages: 1 – Neoproterozoic magmatic cycle; 2 – Early Paleozoic (Caledonian) magmatic cycle; 3 – Late Paleozoic (Hercynian) magmatic cycle; 4 – Early Mesozoic magmatic cycle; 5 – Late Mesozoic magmatic cycle (Petrov et al., in press).

A noticeable decline in magmatic activity during the Middle Jurassic marks a transition from the Late Triassic–Early Jurassic normal and adakitic calc-alkaline magmatism to Late Jurassic–Early Cretaceous intraplate magmatism. This post-collisional magmatism signals the final closure of the Mongol–Okhotsk Ocean. According to Sasim et al. (2012), the end of the Mesozoic was marked by

intense processes of dome and graben formation, as well as active magmatism that produced a wide variety of intrusive magmatic complexes, volcanic series, and volcano-plutonic associations, including alkaline-rich rocks characterized by elevated concentrations of incompatible elements. During this period, a number of volcanic and plutonic complexes of various ages formed in southeastern Transbaikalia (Stupak et al., 2016), many of which are associated with deposits and occurrences of diverse mineral resources.

Systematization of Nd isotopic composition data from felsic crustal intrusive and volcanic rocks distributed across the Argun Block (Fig. 2) shows that all rocks exhibit εNd(t) values greater than –8.6. These values are significantly higher than the isotopic evolution field of Early Precambrian continental crust and do not support the presence of a large-scale ancient basement beneath the block. The lowest εNd(t) values correspond to the isotopic evolution fields of Neoproterozoic continental crustal terrains in the central part of the Central Asian Orogenic Belt (Tuva-Mongolian and Dzabkhan terrains), where Early Precambrian rocks are also limited (Kozakov et al., 2021; Yarmolyuk et al., 2017), just as in the Argun Block.

The isotopic composition of most Late Paleozoic and Mesozoic magmatic rocks trends away from the field of Neoproterozoic continental crust evolution toward that of juvenile continental crust (Yarmolyuk & Kuzmin, 2012). This trend is more pronounced in younger Middle–Late Mesozoic rocks, most of which have εNd(t) values ranging from –3.5 to +1.1. This same range includes compositions of volcanic rocks from the Streltsovka ore field (Kovalenko et al., 2015). Such a shift in the isotopic signature of felsic crustal magmatism indicates pronounced underplating processes of the Neoproterozoic crust of the Argun Block by juvenile material during different stages of its tectono-magmatic reworking in the Paleozoic and Mesozoic. Furthermore, as magmatism becomes progressively younger, the proportion of juvenile material in its source increases (see Fig. 2).

Thus, the Argun Block has a complex developmental history characterized in the Phanerozoic by the evolutionary succession of geodynamic settings arising through oceanic, transitional, and continental stages of the Mongol–Okhotsk domain. On the Russian–Chinese border area (the Argun metallogenic belt and the Greater Xing'an structures), no Li-F rare-metal granites similar to the Kukulbey granites—and thus no genetically related Sn, W, Li, Ta, Nd, or Be deposits—have yet been identified. Conversely, in southeastern Transbaikalia, no Triassic T3–J1 magmatic rocks are observed (or have yet been discovered), although such rocks in the Chinese part of the block are associated with large porphyry Cu–Mo deposits. The absence or limited development of magmatic-hydrothermal processes during the Triassic in southeastern Transbaikalia may reflect a known trend in Eurasia: the northeastward younging of tectonomagmatic events within the Central Asian Orogenic Belt during the "scissor-like" closure of the Mongol–Okhotsk paleo-ocean.

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 13.1902.24.44 (Agreement No. 075-15-2024-641).

1. Kovalenko, D.V., Petrov, V.A., Poluektov, V.V., Ageeva, O.A. (2015). Geodynamic position of Mesozoic mantle-derived rocks of the Streltsovka caldera (Eastern Transbaikalia), mantle domains of Central Asia and China. Bulletin of the KRAESC. Earth Sciences, (4)28, 24–39.
2. Kozakov, I.K., Kovach, V.P., Salnikova, E.B., Didenko, A.N., Plotkina, Yu.V., Fedosenko, A.M. (2021). Formation of the Neoproterozoic continental crust in the structures of the central segment of the Central Asian Fold Belt. Petrology, 29(2), 195–224.
3. Petrov, V.A., Andreeva, O.V., Poluektov, V.V. (2017). Tectono-magmatic cycles and geodynamic settings of the formation of ore systems in Southern Priargunye. Geology of Ore Deposits, 59(6), 445–469.
4. Sasim, S.A., Chukanova, V.S., Ilina, N.N., Semenova, Yu.V., Oshchepkova, A.V. (2012). Geochemistry of volcanic rocks of the Late Mesozoic rift-related association of the Alexandrov-Zavod depression (Southeastern Transbaikalia). Proceedings of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences, 5(2), 209–228.

5. Stupak, F.M., Kudryashova, E.A., Lebedev, V.A. (2016). On Jurassic volcanism and volcanoes of the Shadoron depression, Southeastern Transbaikalia. Volcanology and Seismology, (2), 18–31.
6. Yarmolyuk, V.V., Kuzmin, M.I. (2012). Late Paleozoic and Early Mesozoic rare-metal magmatism of Central Asia: stages, domains, and tectonic settings. Geology of Ore Deposits, 54(5), 375–399.
7. Yarmolyuk, V.V., Kozlovsky, A.M., Lebedev, V.I. (2017). Neoproterozoic magmatic complexes of the Songino Block (Mongolia): toward the problem of formation and correlation of Precambrian terrains in the Central Asian Orogenic Belt. Petrology, 25(4), 362–394.
8. Dril, S.I., Noskova, Yu.V., Wang, K.-L., Belyaev, V.A., Skuzovatov, S.Yu., Grigoriev, D.A., Belkov, D.A. (2017). Geochronology and Sr–Nd isotope geochemistry of late Paleozoic collisional granitoids of the Undinsky complex (Eastern Transbaikalia region). Geodynamics and Tectonophysics, 8(3), 405–408.
9. Tang, J., Xu, W.-L., Wang, F., Wang, W., Xu, M.-J., Zhang, Y.-H. (2013). Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent. Precambrian Research, 224, 597–611.
10. Zhang, F.Q., Chen, H.L., Cao, R.C., Meng, Q.A., Zhu, D.F., Wang, Z.G. (2010). Discovery of Late Paleozoic adakite from the basement of the Hailaer Basin in NE China and its geological implication. Acta Petrologica Sinica, 26, 633–641. (In Chinese with English abstract.)
11. Zhao, S., Xu, W., Wang, W., Tang, J., Zhang, Y. (2014). Geochronology and geochemistry of middle–late Ordovician granites and gabbros in the Erguna region, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Erguna Massif. Journal of Earth Science, 25(5), 841–853.
12. Wang, Y., Zhao, Y., Shui, X., Tao, Z. (2024). Petrogenesis of the Early Jurassic–Early Cretaceous adakite-like rocks in the Erguna Block, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Mongol–Okhotsk Ocean. Minerals, 14, 725.

Ключевые характеристики Mo-, Mo-Cu - порфировых и Cu-Au-Fe скарново-порфировых месторождений Восточного Забайкалья как атрибуты концептуальной генетической модели постколлизионных минеральных систем

Коваленкер В.А., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Абрамов С.С., Доломанова-Тополь А., Языкова Ю.И.
ИГЕМ РАН, г. Москва, vladkov2007@yandex.ru

Месторождения порфировых систем (включающие собственно порфировый, скарновый, эпитермальный и др. типы минерализации, Sillitoe, 2010) играют лидирующую роль в обеспечении мировой экономики такими стратегическими металлами как Cu, Mo, Au, Re и др. (Sillitoe, 2010). Поэтому изучению их геологических, петрологических, минералого-геохимических, изотопных характеристик и особенностей генезиса как основы генетических и прогнозно-поисковых моделей во всем мире уделяется первостепенное внимание, как со стороны горнодобывающих компаний, так и академической науки.

Многочисленными исследованиями показано, что большая часть порфировых систем, многие из которых достигают гигантских размеров, сформировалась над зонами субдукции на конвергентных границах плит и были инициированы развитием известково-щелочного магматизма (например, классические порфировые системы Андийской континентальной окраины и островных дуг Юго-запада Пацифики; Sillitoe, 2010). В то же время, часть порфировых систем образуется во внутриконтинентальных обстановках (Pirajno, Zhou, 2015). По геодинамическому положению порфировые системы подразделяются на субдукционные (коллизионные), развитие которых происходило при субдукции океанического слэба под континент, и постсубдукционные (постколлизионные), которые образуются после завершения субдукции, ассоциируют с высоко-K известково-щелочным магматизмом и приурочены как к зонам сдвиговых перемещений (позднеколлизионный этап), так и контролируемым разломами и грабенами зонам растяжения (постколлизионный этап) (Hou et al., 2009). Постколлизионные месторождения известны главным образом, в Центрально-Азиатском орогеном поясе (ЦАОП). Их яркими примерами являются порфировые и порфирово-скарновые месторождения Восточного Китая, связываемые с мезозойским тектоно-термальным событием, затронувшим большую часть восточной окраины материковой Азии, включая Восточное Забайкалье и Монголию. Считается, что эти минеральные системы возникли в результате уникального набора геодинамических условий и мантийно-литосферных взаимодействий, создавших идеальную ситуацию для внедрения гранитоидов и ассоциированных минералообразующих событий (Pirajno, Zhou, 2015).

Расположенные в южной части Восточного Забайкалья изученные нами минеральные системы Бугдаинского (Mo-W), Шахтаминского (Mo-Cu) порфировых и Быстринского (Cu-Au-Fe) скарново-порфирового месторождения также принадлежат к постколлизионному типу. Они, как и другие (Лугоканское, Култуминское) месторождения порфирового семейства пространственно связаны с Газимурской тектонической зоной, протягивающейся к юго-востоку от Монголо-Охотской сутуры в СВ направлении (рис.1). Крупные суммарные запасы + прогнозные ресурсы стратегических металлов этих месторождений (Au – 442+1200 т; Ag – 3063+6800 т; Cu – 2660+8500 тыс.т; Mo – 600+100 тыс.т; Pb – 439+150 тыс.т; Zn –301+100 тыс.т; Fe – 279+220 млн. т; Природные ресурсы, 2002) выдвигают этот регион в число одной из значительных металлогенических провинций нашей страны.

Несмотря на контрастную (Mo, W vs Cu, Au) металлогеническую специализацию месторождений, они обладают бесспорным сходством, которое определяется идентичным временем формирования (163-155 млн. лет), пространственным тяготением к Ундинскому гранитному плутону ($P\text{-}T_1$), тесной ассоциацией с различными фазами Шахтаминского интрузивного комплекса ($J_{2\text{-}3}$). Несомненное генетическое родство изученных месторождений позволяет рассматривать их в качестве идеальных модельных объектов порфировых систем

применительно к конкретной геолого-тектонической обстановке Восточного Забайкалья. Главные из этих характеристик суммированы в таблице 1.

Таблица 1. Ключевые характеристики порфировых месторождений Восточного Забайкалья

Тип и масштаб	Mo (W), крупное	Mo(Cu), среднее	Cu-Au -Fe, крупное
Вмещающие породы	Граниты Р	Монцониты, диориты $J_{2\text{-}3}Š$, мелководные морские осадки J_1tm	Терригенно-карбонатные породы, монцониты, диориты $J_{2\text{-}3}Š$
Рудоносный магматизм	I. Риолит-порфиры II.Диоритовые порфириты	От монцонит-порфиров до гранит-порфиров $J_2\text{-}3Š$	Монцониты, диориты $J_{2\text{-}3}Š$, диоритовые порфириты, гранодиорит-гранит-порфиры
Тектоника	I. СВ контракцион-ные трещины, шток-верк. II. СЗ субмеридиональные разломы	Субширотные разломы	СВ, СЗ и субширот-ные разломы, контак-ты с интрузиями, межпластовые нарушения
Метасоматиты	I. Окварцевание, калишпатизация II. Серицитизация III. Хлоритизация, аргиллизация	I. Калишпатизация. II. Карбонатизация, серицитизация. III. Аргиллизация, свенбергитизация	I. Проградные и ретроградные скарны; II-III. Пропиллитизация, калишпатизация, серицитизация, аргиллизация
Главные минералы руд	I. Молибденит (шеелит, вольфрамит); II. Сульфиды и сульфосоли полиметал-лов, Au сам.	I. Молибденит (шеелит); II. Сульфиды и сульфосоли полиметал-лов	I.Магнетит, халькопирит, пирит, пирротин, Au сам. (шеелит); II-III. Молибденит, шеелит, сульфиды и сульфосоли полиметаллов, Au сам.
Среднее содержание Re (ppm) в MoS_2	53.8	34.65	335.8
Состав растворов и газов (курсив) ФВ	I. Na(Ca, Mg, Fe)Cl; *CO_2 (N_2+H_2S)* II. Na-K-Cl (HCO_3,SO_4); *CO_2 (N_2+H_2S*	I. NaCl; *CO_2 (CH_4?)* II. NaCl	I. Na(Ca, Mg, Fe)Cl; *SO_4, CO_2* II. Na-Ca-K-Fe-Cl; *SO_4*
Концентрация солей (С, мас.%) во флюидах	I. 62-6.6 II. 26 - 2.6	I. 46 - 7.1 II. 7.5 - 1.5	I. 47 -2.2 II. 50 -16 III. 12 -5
Тг ФВ, °С	I. 560 -300 II. 375 - 140	I. 460 – 168 II. 269 - 130	I. 530 – 300 II. 520 – 244 III. 260 - 149
Средние значения $\delta^{34}S$ (‰) сульфидов	I. +0.5 II. +3.66	+ 6.9	+ 10.0

Примечание. I, II, III – типы и стадии процессов; ФВ – флюидные включения

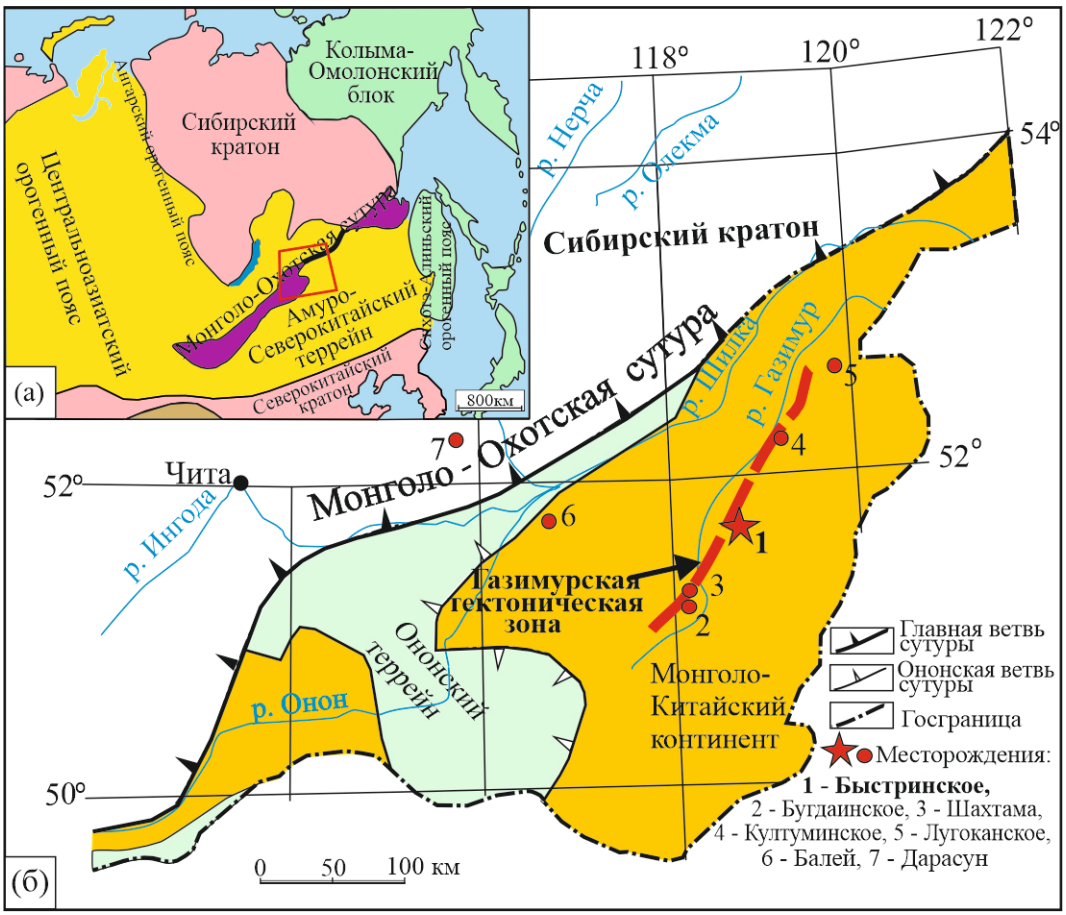


Рис. 1. Упрощенные тектонические схемы Северной Азии (а, по Nevolko et al., 2021) и региона Восточного Забайкалья (б, по Redin et al., 2022, с дополнениями).

В контексте обсуждения концептуальных моделей важно отметить, что изученные месторождении имеют не только разную металлогеническую специализацию, но также отличаются типами рудной минерализации, масштабами, PTC- параметрами и составом рудных флюидов, что, безусловно, является отражением специфики рудообразующих процессов в каждой из рассматриваемых минеральных систем, что видно из сопоставления данных по Бугдаинскому, Шахтаминскому и Быстринскому месторождениям. Рудная минерализация Бугдаинского месторождения образовалась в течение 3 стадий: I – предрудной (калишпатизация и окварцевание, которые последовали после внедрения штоков риолит-порфиров), II – кварц-молибденитовой (штокверк) и III – Au-полиметаллической (секущие жилы, серицитизация). Для ранних флюидов I и II стадий типичны многофазные, высококонцентрированные (до солевых расплавов) ФВ, которые часто сосуществуют с малоплотными газовыми ФВ, указывая на фазовую сепарацию (кипение) флюидов в этот период. В вакуолях многофазных ФВ кварц-молибденитовой стадии наряду с дочерними кристаллами NaCl, установлены кристаллы молибденита, а также примесь N_2 и H_2S в составе газовой фазы ФВ, свидетельствуя о присутствии в составе флюидов сульфидной S, т.е. на их восстановленный характер. В отличие от этого в вакуолях ФВ III стадии установлены кристаллы ангидрита, т.е. флюиды этой стадии содержали сульфатную S и были окисленными. Стадийность минералообразования и набор рудных минералов Шахтаминского месторождения в целом очень сходны с таковыми на Бугдаинском. Как и на ассоциированных с Шахтаминским интрузивным комплексом Бугдаинском и Быстринском месторождениях для ранних флюидов Шахтаминского месторождения отмечены признаки фазовой сепарации (вскипания). В то же время, преимущественная форма и характер локализации минералов продуктивной стадии Шахтаминского месторождения в виде жил, а также относительно низкие начальные температуры образования кварца как кварц-молибденитовой (460ºC), так и

карбоната полиметаллической (269 ºС) стадий, и заметно более низкие в целом концентрации растворов при менее разнообразном составе компонентов во флюидах являются важными факторами, препятствующими формированию на Шахтаминском месторождении крупномасштабного оруденения. Основной объем Fe-Cu-Au- минерализации Быстринского месторождения вмещается скарнами, развитыми на контакте диоритовой интрузии с терригенно-карбонатными отложениями. Важная с генетической точки зрения, но не играющая существенной экономической роли минерализация порфирового типа, представленная кварц-молибденитовыми и золотоносные кварц-сульфидными жилами, ассоциирует с субвулканическими и дайковыми телами порфировых гранитоидов. Ранние кварц-молибденитовые жилы структурно и морфологически весьма сходны с синхронной кварц-молибденитовой минерализацией Шахтаминской системы, а по составу – с кварц-молибденитовыми жилами и прожилками Бугдаинского штокверка. Основными периодами развития Быстринской системы являются: (а) – внедрение диоритовой интрузии, сопровождающееся ороговикованием и формированием ранних скарнов, затем даек порфиритов и порфиров, и формирование поздних скарнов; (б) – ретроградное изменение скарнов и пропилитизация с отложением магнетита, затем пирротина, халькопирита и пирита; (в) – близкое по времени, но несколько позже, сопровождающее минерализацию порфирового типа формирование ограниченно распространенных К-метасоматитов; и (г) – отложение поздней полиметаллической минерализации на фоне серицитизации и слабой аргиллизации.

Рассмотренные выше данные позволяют обозначить контуры геолого-генетической модели порфировых систем Восточно-Забайкальского региона, которая увязывает совокупность геотектонических, геологических, петрологических, минералого-геохимических и генетических факторов, оказавших влияние на специфику магматизма, процессов метасоматизма и рудоотложения, металлогеническую специализацию и продуктивность образованных этими системами месторождений. Ключевыми из них являются: (1) Геолого-тектоническая позиция и металлогения Восточно-Забайкальского региона как среды, в которой развиваются порфировые системы, показывающая, что он характеризуется сложным геологическим строением, рифтовой тектоникой, развитием высоко-К известково-щелочного (шошонитового) магматизма и разнообразной металлогенией, обусловленной многочисленными месторождениями и рудопроявлениями Au, Ag, Cu, Fe, Pb, Zn, Mo, W, Sn и U; (2) Источники металлов, демонстрирующие, что возможными источниками Mo и W в рудах месторождений могут служить биотит-роговообманковые граниты Ундинского плутона (P_2-T), в то время как источник Cu, Zn, Pb, As и Sb, скорее всего, следует связывать с более молодыми высококремнистыми породами риолит-гранитного состава; (3) Глубина генерации магматических пород порфировых систем, согласно расчетным значениям PT параметров, происходила на двух глубинных уровнях кристаллизации их материнских магм: гипабиссальном с P от 2 до 1.5 кбар и T от 820 до 870 ºС, который отвечает этапу образования минералов вкрапленников в диоритах и сиенодиоритах ранней фазы, ответственных за формирование скарнов, и субвулканического с P от 0.9 до 0.5 кбар, отвечающего этапу формирования гранодиорит-порфиров и, вероятно, более кислых порфировых пород; (4) Влияние T и fO_2 параметров магматических флюидов на последовательность формирования скарнов и рудной минерализации определяется тем, что образование ранних известковых скарнов происходило при участии сильно окисленного (NNO+3) равновесного с гранодиоритовым расплавом (NNO+2.5) высокотемпературного магматического флюида и не сопровождалось отложением сульфидной минерализации, тогда как при снижении T< 440ºС стартовали процессы, которые вызвали замещение скарнов более низкотемпературными (ретроградными) апоскарновыми тремолит-хлорит-кварц-эпидотовыми и кварц-кальцит-хлоритовыми ассоциациями и отложение основной массы халькопирита, пирита и других рудных минералов; (5) Параметры и состав постмагматических флюидов, определенные на основании наличия в вакуолях ФВ ранних высокотемпературных (T от > 530 до 250 °C) и высокосоленых (C до 47 мас.% NaCl-экв) порций постмагматического флюида, кристалликов халькопирита и молибденита, а также включений кварца, ангидрита,

кальцита, гематита и магнетита, предполагают окисленное состояние этого раннего высокотемпературного флюида, который содержал ионы Cl, SO4, карбонат- и/или бикарбонат-ионы, и Ca, Mg, Na и Fe среди катионов.

Работа выполнена в рамках Госфинансирования по теме Плана НИР ИГЕМ РАН (Код (шифр) FMMN-2024-0013, № Госучета 124022400139-2

1. Быстринское месторождение //Харитонов Ю.Ф. (ред.). Природные ресурсы Читинской области и Агинского бурятского автономного округа. Атлас инвестиционных предложений. Чита, 2002. С. 60-63

2. Hou Z.Q., Beaudoin G., Rui Z., Gao Y., Zaw K. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collizional extension in the Tibetan orogen // Ore geology Rev. 2009. V.36.P.25-51

3. Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-P., Champion D. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. V. 79. P. 1-24

4. Nevolko P.A., Svetlitskaya T.V., Savichev A.A., Vesnin V.S., Fominykh P.A. Uranium-Pb zircon ages, whole-rock and zircon mineral geochemistry as indicators for magmatic fertility and porphyry Cu-Mo-Au mineralization at the Bystrinsky and Shakhtama deposits, Eastern Transbaikalia, Russia // Ore Geology Reviews. 2021. V. 139. 104532

5. Pirajno F., Zhou T. Intracontinental porphyry and porphyry-skarn mineral systems in Eastern China: Scrutiny of a special case “Made-in-China” // Economic Geology. 2015. V.110. P. 603-629

6. Richards J.P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere // Geology. 2009. V.37. P.247-250

7. Sillitoe R. Porphyry-copper systems // Economic Geology. 2010. V.105. P. 3-41.

*Key Characteristics of Mo-, Mo-Cu Porphyry and Cu-Au-Fe Skarn-Porphyry Deposits of Eastern Transbaikalia as Attributes of a Conceptual Genetic Model for Post-Collisional Mineral Systems

Kovalenker V.A., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Abramov S.S., Dolomanova-Topol A., Yazykova Yu.I.
IGEM RAS, Moscow, Russia, vladkov2007@yandex.ru

Porphyry system deposits (including porphyry, skarn, epithermal and other mineralization types; Sillitoe, 2010) play a leading role in supplying the global economy with strategic metals such as Cu, Mo, Au, Re and others (Sillitoe, 2010). Therefore, the study of their geological, petrological, mineralogical-geochemical, isotopic characteristics and genetic features—as a foundation for genetic and exploration models—receives top priority worldwide from both the mining industry and academic researchers.

Numerous studies have shown that most porphyry systems, many of which reach giant sizes, were formed above subduction zones at convergent plate boundaries and were initiated by the development of calc-alkaline magmatism (e.g., classic porphyry systems of the Andean continental margin and island arcs of the southwestern Pacific; Sillitoe, 2010). At the same time, some porphyry systems form in intracontinental settings (Pirajno, Zhou, 2015). Geodynamically, porphyry systems are divided into subduction-related (collisional), formed during oceanic slab subduction beneath a continent, and post-subduction (post-collisional), which develop after the end of subduction, associated with high-K calc-alkaline magmatism and localized along strike-slip fault zones (late-collisional stage) or within fault-controlled extensional grabens (post-collisional stage) (Hou et al., 2009). Post-collisional deposits are mainly known from the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Striking examples include porphyry and porphyry-skarn deposits of eastern China, related to a Mesozoic tectono-thermal event that affected much of East Asia, including Eastern Transbaikalia and Mongolia. These mineral systems are thought to have formed due to a unique combination of geodynamic conditions and mantle-lithosphere interactions, creating ideal settings for granitoid emplacement and associated mineralizing events (Pirajno, Zhou, 2015).

The mineral systems we studied in the southern part of Eastern Transbaikalia—Bugdain (Mo-W), Shakhtama (Mo-Cu) porphyry deposits, and Bystrinsky (Cu-Au-Fe) skarn-porphyry deposit—also belong to the post-collisional type. These, along with others such as Lugokan and Kultuminskoe, are spatially associated with the Gazimur tectonic zone, which extends northeastward from the Mongol-Okhotsk suture (Fig. 1). The large cumulative reserves and forecast resources of strategic metals in these deposits (Au – 442+1200 t; Ag – 3063+6800 t; Cu – 2660+8500 kt; Mo – 600+100 kt; Pb – 439+150 kt; Zn – 301+100 kt; Fe – 279+220 Mt; Natural Resources, 2002) rank this region among Russia's major metallogenic provinces.

Despite contrasting metallogenic specialization (Mo, W vs. Cu, Au), the deposits show undeniable similarities, including identical formation ages (163–155 Ma), spatial proximity to the Undinsky granite pluton ($P–T_1$), and close association with various phases of the Shakhtama intrusive complex ($J_{2–3}$). The definite genetic affinity among these deposits makes them ideal model objects for porphyry systems in the specific geological-tectonic setting of Eastern Transbaikalia. The main characteristics are summarized in Table 1.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Table 1. Key Characteristics of Porphyry Deposits in Eastern Transbaikalia

Тип и масштаб	Mo (W), крупное	Mo(Cu), среднее	Cu-Au -Fe, крупное
Вмещающие породы	Граниты P	Монцониты, диориты $J_{2\text{-}3}\check{S}$, мелководные морские осадки J_1tm	Терригенно-карбонатные породы, монциониты, диориты $J_{2\text{-}3}\check{S}$
Рудоносный магматизм	I. Риолит-порфиры II.Диоритовые порфириты	От монцонит-порфиров до гранит-порфиров J_2-$3\check{S}$	Монциониты, диориты $J_{2\text{-}3}\check{S}$, диоритовые порфириты, гранодиорит-гранит-порфиры
Тектоника	I. СВ контракцион-ные трещины, шток-верк. II. СЗ субмеридиональные разломы	Субширотные разломы	СВ, СЗ и субширот-ные разломы, контак-ты с интрузиями, межпластовые нарушения
Метасоматиты	I. Окварцевание, калишпатизация II. Серицитизация III. Хлоритизация, аргиллизация	I. Калишпатизация. II. Карбонатизация, серицитизация. III. Аргиллизация, свенбергитизация	I. Проградные и ретроградные скарны; II-III. Пропиллитизация, калишпатизация, серицитизация, аргиллизация
Главные минералы руд	I. Молибденит (шеелит, вольфрамит); II. Сульфиды и сульфосоли полиметаллов, Au сам.	I. Молибденит (шеелит); II. Сульфиды и сульфосоли полиметал-лов	I.Магнетит, халькопирит, пирит, пирротин, Au сам. (шеелит); II-III. Молибденит, шеелит, сульфиды и сульфосоли полиметаллов, Au сам.
Среднее содержание Re (ppm) в MoS_2	53.8	34.65	335.8
Состав растворов и газов (курсив) ФВ	I. Na(Ca, Mg, Fe)Cl; *CO_2 (N_2+H_2S)* II. Na-K-Cl (HCO_3,SO_4); *CO_2 (N_2+H_2S*	I. NaCl; *CO_2 (CH_4?)* II. NaCl	I. Na(Ca, Mg, Fe)Cl; *SO_4, CO_2* II. Na-Ca-K-Fe-Cl; *SO_4*
Концентрация солей (С, мас.%) во флюидах	I. 62-6.6 II. 26 - 2.6	I. 46 - 7.1 II. 7.5 - 1.5	I. 47 -2.2 II. 50 -16 III. 12 -5
Тг ФВ, °С	I. 560 -300 II. 375 - 140	I. 460 – 168 II. 269 - 130	I. 530 – 300 II. 520 – 244 III. 260 - 149
Средние значения $\delta^{34}S$ (‰) сульфидов	I. +0.5 II. +3.66	+ 6.9	+ 10.0

Note: I, II, III – types and stages of processes; FI – fluid inclusions

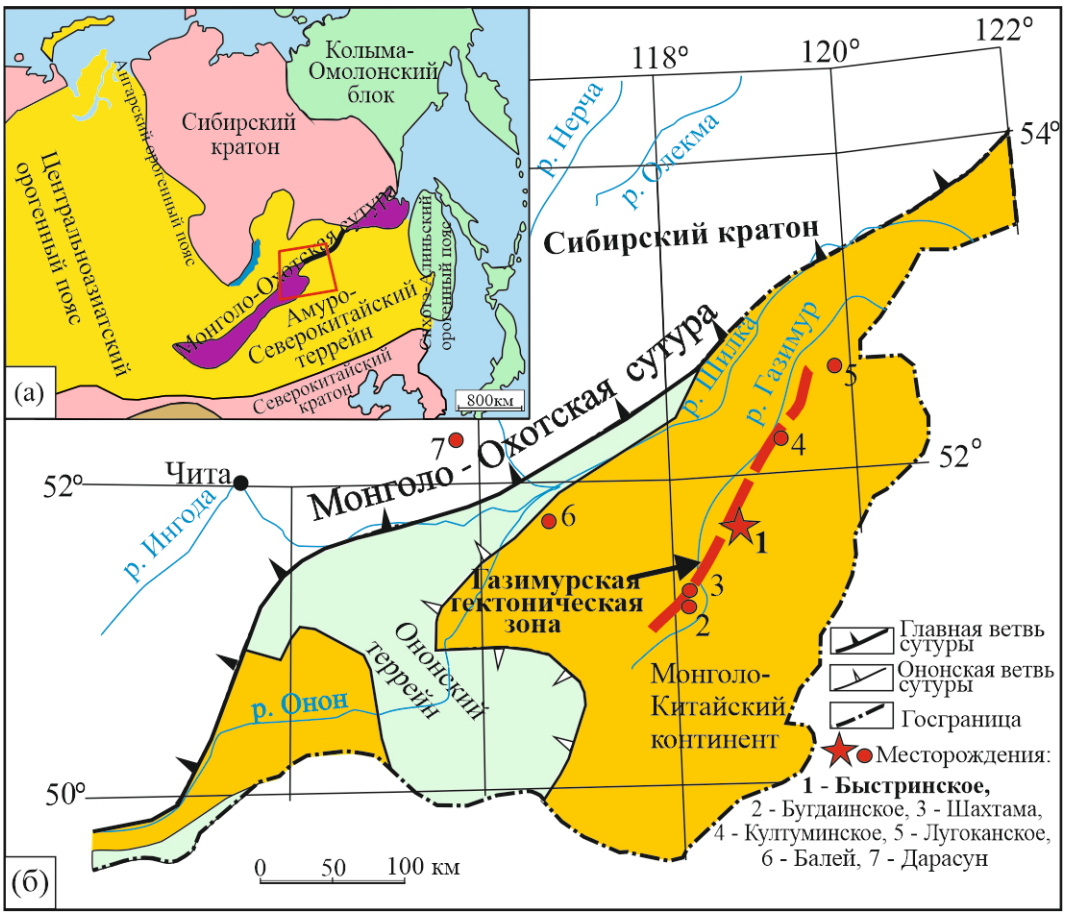


Fig. 1. Simplified tectonic maps of Northern Asia (a, after Nevolko et al., 2021) and the Eastern Transbaikalia region (b, after Redin et al., 2022, with additions).

In the context of discussing conceptual models, it is important to note that the studied deposits not only differ in their metallogenic specialization, but also in types of ore mineralization, scale, P–T–C parameters, and composition of ore-bearing fluids. This undoubtedly reflects the specificity of ore-forming processes in each of the considered mineral systems, as seen from the comparison of data from the Bugdain, Shakhtama, and Bystrinskoe deposits. The ore mineralization of the Bugdain deposit was formed over three stages:

(I) pre-ore (K-feldspar alteration and quartz veining, which followed the emplacement of rhyolite porphyry stocks),

(II) quartz–molybdenite stockwork stage, and

(III) Au–polymetallic stage (cross-cutting veins, sericitization).

For the early fluids of stages I and II, multiphase, highly concentrated fluid inclusions (up to salt melts) are typical, often coexisting with low-density gas-rich inclusions, indicating phase separation (boiling) of fluids during this period. In the vacuoles of the multiphase fluid inclusions of the quartz–molybdenite stage, in addition to daughter NaCl crystals, molybdenite crystals were also identified, as well as N_2 and H_2S in the gas phase, which indicates the presence of sulfide sulfur and thus a reduced character of the fluids. In contrast, fluid inclusions from stage III contain anhydrite crystals, indicating that the fluids of this stage contained sulfate sulfur and were oxidized.

The staged nature of mineral formation and the set of ore minerals at the Shakhtama deposit are generally very similar to those at Bugdain. As with the Bugdain and Bystrinskoe deposits, which are also associated with the Shakhtama intrusive complex, the early fluids of the Shakhtama deposit show signs of phase separation (boiling). At the same time, the dominant morphology and localization of productive-stage minerals at Shakhtama—primarily as veins—along with relatively low initial formation temperatures of quartz in both the quartz–molybdenite (460 °C) and carbonate–polymetallic (269 °C) stages, and significantly lower overall solution concentrations with a less

diverse set of fluid components, are important factors limiting the scale of mineralization at the Shakhtama deposit.

The main volume of Fe–Cu–Au mineralization at the Bystrinskoe deposit is hosted in skarns developed along the contact between a diorite intrusion and terrigenous–carbonate sediments. A genetically important but economically less significant porphyry-type mineralization, represented by quartz–molybdenite and gold-bearing quartz–sulfide veins, is associated with subvolcanic and dyke bodies of porphyritic granitoids. The early quartz–molybdenite veins are structurally and morphologically very similar to the synchronous quartz–molybdenite mineralization of the Shakhtama system, and compositionally similar to the quartz–molybdenite veins and veinlets of the Bugdain stockwork. The main stages of the development of the Bystrinskoe system are:

(a) emplacement of the diorite intrusion, accompanied by hornfels formation and early skarn development, followed by porphyry dikes and the formation of late skarns;

(b) retrograde skarn alteration and propylitization with deposition of magnetite, followed by pyrrhotite, chalcopyrite, and pyrite;

(c) slightly later, the formation of limited K-metasomatites associated with porphyry-type mineralization;

(d) deposition of late polymetallic mineralization accompanied by sericitization and weak argillization.

The data reviewed above make it possible to outline the contours of a genetic–geological model of porphyry systems in the Eastern Transbaikalian region, integrating a set of geotectonic, geological, petrological, mineralogical–geochemical, and genetic factors that influence the specific features of magmatism, metasomatic processes, ore deposition, metallogenic specialization, and productivity of the ore systems formed. The key factors include:

1. Geological–tectonic position and metallogeny of the Eastern Transbaikalian region as the environment in which porphyry systems develop, showing that it is characterized by a complex geological structure, rift-related tectonics, the development of high-K calc-alkaline (shoshonitic) magmatism, and diverse metallogeny. This is manifested in numerous deposits and occurrences of Au, Ag, Cu, Fe, Pb, Zn, Mo, W, Sn, and U.

2. Sources of metals, which indicate that possible sources of Mo and W in the ores may be the biotite–hornblende granites of the Unda pluton (P_2–T), while the source of Cu, Zn, Pb, As, and Sb is most likely associated with younger high-silica rocks of rhyolite–granite composition.

3. Depth of generation of magmatic rocks of the porphyry systems, as derived from calculated P–T parameters, occurred at two crustal levels: Hypabyssal (P = 2–1.5 kbar; T = 820–870 °C), corresponding to the formation of phenocrysts in diorites and sienodiorites of the early phase, responsible for skarn formation. Subvolcanic (P = 0.9–0.5 kbar), corresponding to the stage of granodiorite porphyry formation and possibly more acidic porphyritic rocks.

4. Influence of T and fO_2 parameters of magmatic fluids on the sequence of skarn and ore mineralization formation, showing that early calcic skarns formed under strongly oxidized (NNO+3) high-temperature magmatic fluids in equilibrium with granodiorite melt (NNO+2.5), and were not accompanied by sulfide deposition. As temperatures fell below 440 °C, retrograde alteration of skarns began, producing lower-temperature (retrograde) assemblages of tremolite–chlorite–quartz–epidote and quartz–calcite–chlorite associations, and deposition of the main volume of chalcopyrite, pyrite, and other ore minerals.

5. Parameters and composition of postmagmatic fluids, determined by the presence in fluid inclusions (FIs) of early high-temperature (T > 530 to 250 °C) and highly saline (up to 47 wt.% NaCl eq.) portions of postmagmatic fluids, crystals of chalcopyrite and molybdenite, and inclusions of quartz, anhydrite, calcite, hematite, and magnetite. These suggest an oxidized state for the early high-temperature fluid, containing Cl^-, SO_4^{2-}, carbonate and/or bicarbonate ions, and cations such as Ca, Mg, Na, and Fe.

This research was conducted under State Assignment of the IGEM RAS, topic code FMMN-2024-0013, state registration number 124022400139-2.

1. Bystrinskoe deposit // Kharitonov Yu.F. (ed.). Natural resources of the Chita Region and the Agin Buryat Autonomous Okrug. Atlas of investment proposals. Chita, 2002. Pp. 60–63.
2. Hou Z.Q., Beaudoin G., Rui Z., Gao Y., Zaw K. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan orogen. Ore Geology Reviews, 2009, Vol. 36, pp. 25–51.
3. Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-P., Champion D. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. Lithos, 2005, Vol. 79, pp. 1–24.
4. Nevolko P.A., Svetlitskaya T.V., Savichev A.A., Vesnin V.S., Fominykh P.A. Uranium-Pb zircon ages, whole-rock and zircon mineral geochemistry as indicators for magmatic fertility and porphyry Cu-Mo-Au mineralization at the Bystrinsky and Shakhtama deposits, Eastern Transbaikalia, Russia. Ore Geology Reviews, 2021, Vol. 139, 104532.
5. Pirajno F., Zhou T. Intracontinental porphyry and porphyry-skarn mineral systems in Eastern China: Scrutiny of a special case “Made-in-China”. Economic Geology, 2015, Vol. 110, pp. 603–629.
6. Richards J.P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. Geology, 2009, Vol. 37, pp. 247–250.
7. Sillitoe R. Porphyry-copper systems. Economic Geology, 2010, Vol. 105, pp. 3–41.

Тектоническая позиция урановых месторождений Хиагдинского рудного поля

Кочкин Б.Т., Петров В.А., Голубев В.Н.
ИГЕМ РАН, Москва, boriscochkin@yandex.ru

Урановые месторождения Хиагдинского рудного поля (ХРП) находятся на Витимском плоскогорье в республике Бурятия (рис. 1А). Они относятся к промышленному типу месторождений «в палеодолинах» (Уран…, 2010) или «в базальных каналах» по международной классификации. Геолого-структурная позиция витимских месторождений характеризуется их приуроченностью к сети эрозионных врезов в палеозойском гранитном фундаменте. Главные палеодолины с многочисленными притоками, начинающимися от осей водоразделов, прослежены на 120-100 км в северо-восточном направлении примерно вдоль долин современных рек Джилинда (Витимская), Аталанга и Большой Амалат (рис. 1Б). Палеодолины на Витимском плоскогорье заполнены терригенно-вулканогенными образованиями миоцена, в которых локализованы урановые залежи. На площади ХРП сконцентрированы 8 самых крупных месторождений. Генезис урановой минерализации этого типа связывают с инфильтрацией окислительных растворов метеорного происхождения в проницаемые терригенные осадки, содержащие углефицированные растительные остатки, которые служат сингенетическими восстановителями урана.

Первая особенность месторождений на Витимском плоскогорье заключается в том, что сеть рудовмещающих палеодолин перекрыта платобазальтами миоцен-четвертичного возраста. Вулканический туфовый материал появляется уже в верхней части терригенных отложений. Примечательно, что контуры лавового поля и палеодолин практически совпадают (см. рис. 1Б). Бурением выявлен ряд базальтовых некков, секущих рудовмещающие образования. Кроме того, к северу от ХРП возвышается конус палеовулкана Намару с возрастом базальтов 7.55-6.6 млн. лет (Рассказов и др., 2007; Уран…, 2010).

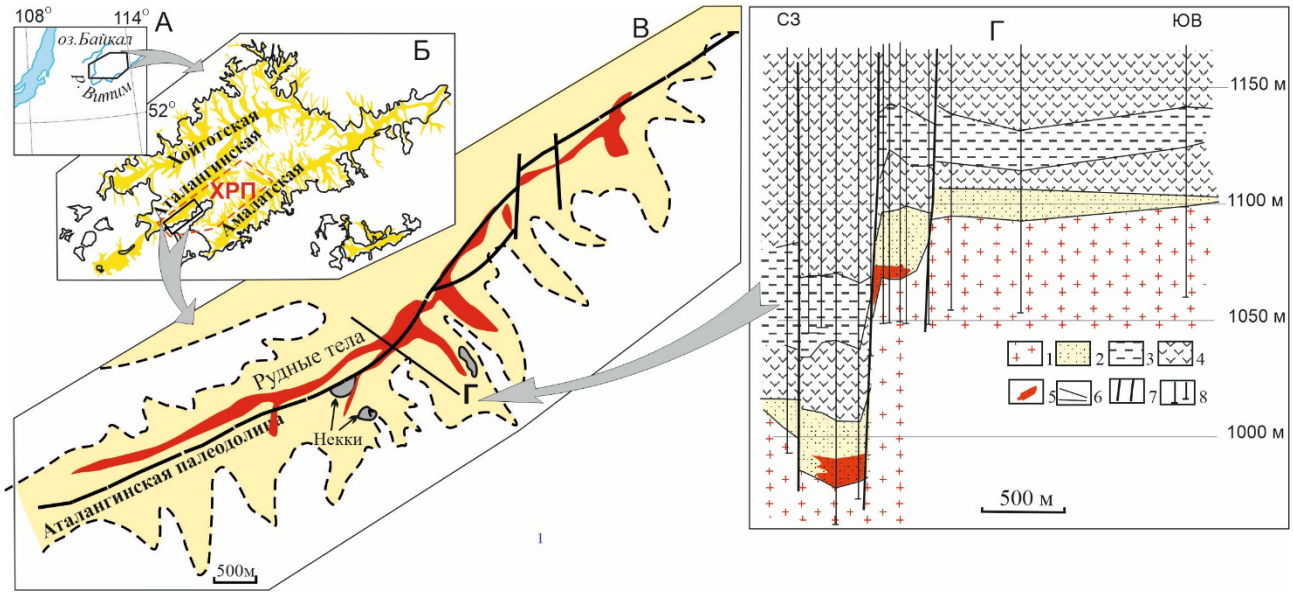


Рис. 1. А – Региональная позиция неогеновых впадин на Витимском плоскогорье. Б – Конфигурация палеодолин (желтое), погребенных под платобазальтами (сплошной черный контур). В – Месторождение Дыбрынское. Г – Схематический поперечный разрез через Аталангинскую палеодолину. Составлено по данным ФГУГП «Урангео», 2007 г. с упрощениями и дополнениями. 1 – граниты фундамента; 2 – терригенные отложения; 3 – алевриты; 4 – базальты; 5 – рудные тела; 6 – границы пород; 7 – разломы: 8 – скважины.

Вторая особенность витимских месторождений состоит в том, что рудоконтролирующая эпигенетическая зональность полностью преобразована пострудными процессами.

Установлено, что в формировании облика месторождений ХРП принимали участие термы, связанные с базальтовым вулканизмом, а также холодные углекислые воды, развитые в фундаменте по всей территории Даурии и, возможно, поставлявшие эпигенетические восстановители урана (Кочкин и др., 2017; Солодов, Нестерова, 2022).

В докладе изложены результаты изучения рудовмещающих впадин ХРП и анализа их позиции в тектонической структуре Юго-Восточной Евразии, обсуждается роль этой позиции в формировании витимской минералообразующей системы.

Месторождения ХРП выявлены главным образом в притоках Аталангинской и Амалатской палеодолин. Вкрест простирания бурением на полную мощность изучены верховья только одной из главных палеодолин – Аталангинской, в которой локализованы залежи Дыбрынского месторождения (рис. 1В).

Юго-восточный борт Аталангинской палеодолины осложнен Кореткондинским разломом и несколькими более мелкими (по амплитуде вертикальных смещений) дизъюнктивами. Скважинные пересечения шва этого разлома характеризуют его как нормальный сброс (рис. 1Г). Установлено, что по Кореткондинскому разлому северо-западный блок опущен по отношению к юго-восточному с переменной вертикальной амплитудой (30-80 м). В средней части площади месторождения Кореткондинский разлом меняет общее северо-восточного простирание на более крутое. В указанном участке выявлено несколько оперяющих разрывов, сопряженных с основным разломом. Перечисленные особенности характеризуемого участка можно рассматривать как следствие сдвиговой составляющей в смещениях по Кореткондинскому разлому.

Структурный контроль оруденения в целом для этого месторождения выражается приуроченностью его наиболее продуктивной части к месту изгиба Кореткондинского разлома и смены простирания. В сегменте указанного перегиба должна формироваться локальная зона растяжения. Именно здесь в центральной части Дыбрынского месторождения выявлены обширные области вторичного восстановления рудоконтролирующей окислительной зональности, связанные с воздействием углекислых вод, и участки рудных тел в базальтах, которые могут рассматриваться как доказательство участия эпигенетических восстановителей урана (Кочкин и др., 2014).

Данные разведочного бурения на территории Витимского плоскогорья показали, что главные палеодолины имеют эрозионно-тектоническую природу, и, по-видимому, генетически связаны с другими кайнозойскими впадинами Байкальской рифтовой зоны (рис. 2А). Сеть палеодолин Витимского плоскогорья и вулканическое плато находятся примерно в 200 км юго-восточнее Байкальской рифтовой системы кайнозойского возраста. Менее значительные кайнозойские рифтовые структуры известны южнее вплоть до зон спрединга в Южно-Китайском и Японском морях на протяжении порядка 2000 км (рис. 2Б). Кайнозойский рифтогенез в Юго-Восточной Евразии рассматривается как следствие Индо-Евразийской коллизии и синхронной ей субдукции Тихоокеанской плиты под Евразийскую (Рассказов и др., 2007; Yin, 2010; Чувашова и др., 2023).

Витимский урановорудный район занимает закономерное место в тектонической структуре Юго-Восточной Евразии. Феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири объясняется тесной согласованностью тектонических процессов южнее Восточной Сибири с процессами конвергенции плит Тихого океана и Евразии. В Кайнозойскую эру в систему взаимодействующих плит вступает Индийская плита. Столкновение Индийской и Евразийской плит, начавшееся в палеоцене (около 65 млн. лет назад) положило начало формированию Гималайско-Тибетского орогена на юго-западной окраине Евразии. На юго-восточной окраине в ответ на сжатие в северо-восточном направлении формируется зона осевого северо-запад – юго-восточного растяжения, которое в Байкальской рифтовой зоне сочеталось с раскрытием зоны спрединга во впадине Японского моря (Чувашова и др., 2023).

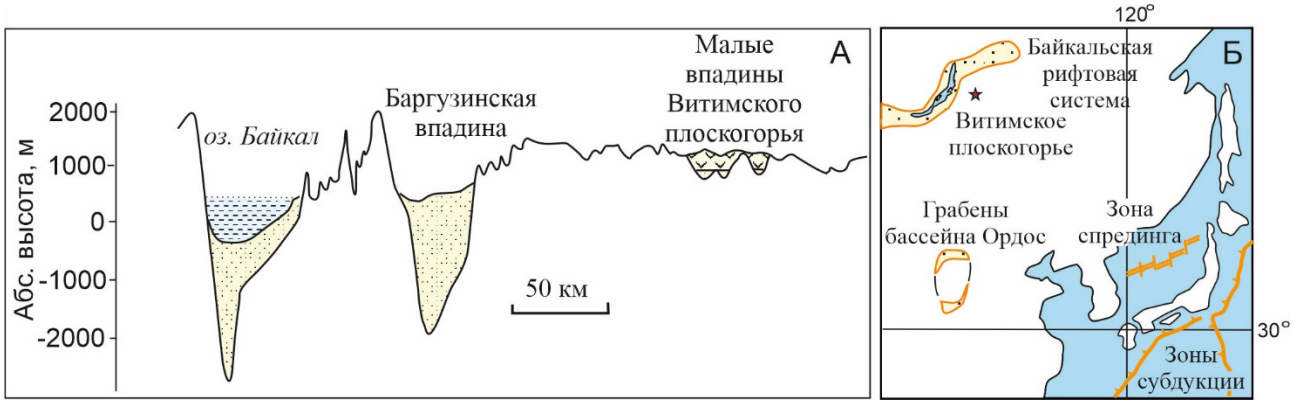


Рис. 2. А – Пространственные соотношения малых впадин Витимского плоскогорья с впадинами Байкальской рифтовой зоны (по Рассказов и др., 2007 с изменениями). Б – Позиция Витимского плоскогорья среди кайнозойских структур Юго-Восточной Евразии.

Витимское плоскогорье – один из районов распространения молодого вулканизма в Забайкалье, начавшегося в раннем миоцене и продолжавшегося в течение всего позднего кайнозоя. На вулканических полях Байкальской рифтовой системы выделяются от 3 до 7 вулканических импульсов в диапазоне последних 22 млн лет. В вулканической истории Витимского плоскогорья насчитывается 7 импульсов: I − 21, II −18, III − 15−9, IV − 7.5−6.5, V − 5−3, VI − 1.8−1.5 и VII − 1.1−0.6 млн лет назад (Рассказов и др., 2007). K–Ar возраст образцов базальтов, взятых из средней части покрова над месторождением Дыбрынское − 8.6−9.1 млн лет приходится на конец третьего эпизода вулканизма. К этому времени базальты, по-видимому, заполнили не только главные долины, но и перекрыли водоразделы между палеооврагами.

U–Pb возраст урановой минерализации для месторождений ХРП определен величиной около 10 млн. лет, который следует рассматривать как возраст консервации руд после вторичного восстановления рудоконтролирующей зоны окисления поствулканическими растворами.

Урановая минералообразующая система, чтобы быть эффективной, должна включать комплекс обязательных элементов: источник урана и растворов, каналы переноса и депонирования урана, тектонические условия для возникновения силовых градиентов для движения растворов и предпосылки возникновения в системе механизма осаждения. Для систем, которые окончили свою активность, важным элементом становится условие консервации накопленной минерализации. Все эти элементы, начиная с источника урана, которым служат палеозойские граниты, присутствуют в витимской системе.

Фактором, определяющим возможность формирования гидродинамических условий для инфильтрационной минералообразующей системы, является тектоническая дифференциация рельефа, инициирующая градиенты гидравлического давления в водоносных горизонтах. В частности, для Витимского плоскогорья предпосылкой для активизации движения подземных вод, возможно, послужил кайнозойский рифтогенез. В этом регионе он проявился формированием эрозионно-тектонических впадин восток-северо-восточного простирания. Базальтовый вулканизмом обеспечил сохранность исходных впадин в виде погребенных палеодолин, в которых локализованы инфильтрационные урановые месторождения. Вулканизм также был причиной поступления в рудовмещающие осадки восстановительных вод различного состава, изменившим исходные характеристики урановых руд. Восстановительные условия, созданные углекислыми водами в рудовмещающих отложения и базальтовый экран, вместе обеспечили консервацию минерализации от экзогенного разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ №13.1902.24.44 (Соглашение № 075-15-2024-641).

1. Кочкин Б.Т., Новгородцев А.А., Тарасов Н.Н. Мартыненко В.Г. Морфологические особенности рудных тел и генезис месторождений урана Хиагдинского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 6. С. 539-555.
2. Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В., Асадулин Эн.Э., Голубев В.Н. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С. 124-140.
3. Рассказов С.В., Лямина Н.А., Черняева Г.П. и др. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: Феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 193 с.
4. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды – рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. №1. С. 151-162.
5. Уран российских недр. Гл. ред. Г.А. Машковцев. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
6. Чувашова И.С., Рассказов С.В. Прорыв в изучении и датировании новейшего вулканизма Байкальской рифтовой системы и его значение для понимания новейшей геодинамики Азии // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3. № 3. С. 149-197.
7. Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis // Tectonophysics. 2010. Vol. 488. P. 293-325.

*Tectonic Position of Uranium Deposits in the Khiagda Ore Field

Kochkin B.T., Petrov V.A., Golubev V.N.
IGEM RAS, Moscow, boriscochkin@yandex.ru

The uranium deposits of the Khiagda Ore Field (KOF) are located on the Vitim Plateau in the Republic of Buryatia (Fig. 1A). They belong to the industrial type of "paleovalley" deposits (Uran…, 2010), also referred to as “basal channel” deposits in international classifications. The geological-structural position of the Vitim deposits is defined by their localization along a network of erosional incisions within the Paleozoic granite basement. The main paleovalleys, with numerous tributaries originating from watershed axes, stretch for 120–100 km in a northeast direction, roughly following the valleys of the present-day Dzhalinda (Vitim), Atalanga, and Bolshoy Amalat rivers (Fig. 1B). These paleovalleys are filled with Miocene terrigenous-volcanogenic formations that host uranium mineralization. Eight of the largest deposits are concentrated within the KOF. The genesis of this uranium mineralization is linked to the infiltration of oxidized meteoric waters into permeable terrigenous sediments containing carbonized plant debris, which acted as synsedimentary uranium reductants.

A key feature of the deposits on the Vitim Plateau is that the network of ore-hosting paleovalleys is overlain by Miocene–Quaternary plateau basalts. Volcanic tuffaceous material appears already in the upper part of the terrigenous sequence. Notably, the contours of the lava field closely match those of the paleovalleys (see Fig. 1B). Drilling has revealed several basaltic necks cutting through the ore-hosting formations. Additionally, north of the KOF stands the Namaru paleovolcano cone, with basalt ages of 7.55–6.6 Ma (Rasskazov et al., 2007; Uran…, 2010).

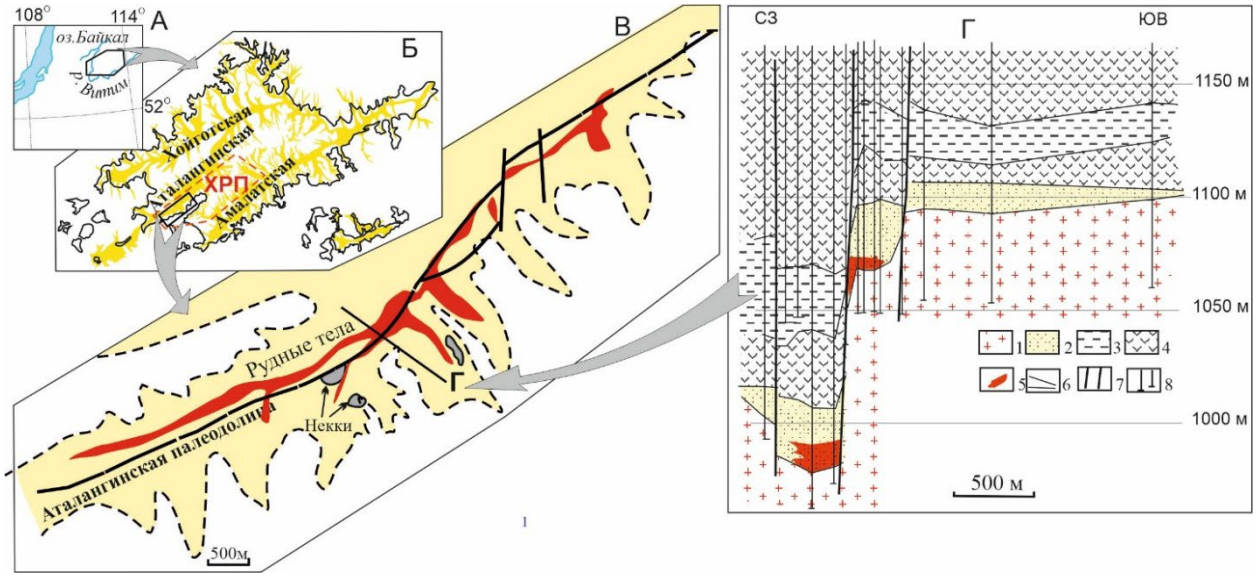


Fig. 1. A – Regional position of Neogene depressions on the Vitim Plateau. B – Configuration of paleovalleys (yellow), buried beneath plateau basalts (solid black outline). C – Dybrynskoye deposit. D – Schematic cross-section through the Atalanga paleovalley. Compiled based on data from FGUGP "Urangeo", 2007, with simplifications and additions.

1 – basement granites; 2 – terrigenous deposits; 3 – siltstones; 4 – basalts; 5 – ore bodies; 6 – lithological boundaries; 7 – faults; 8 – wells.

A second distinctive feature of the Vitim deposits is that the ore-controlling epigenetic zonation has been entirely overprinted by post-ore processes. It has been established that thermal fluids

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

associated with basaltic volcanism and cold carbon dioxide-rich waters (prevalent in the basement across Dauria and possibly supplying uranium-reducing agents) played roles in shaping the current appearance of the KOF deposits (Kochkin et al., 2017; Solodov & Nesterova, 2022).

This presentation outlines results from the study of ore-hosting depressions in the KOF and analysis of their position within the tectonic framework of Southeast Eurasia, emphasizing the role of this positioning in the formation of the Vitim mineral-forming system.

The deposits of the KOF are primarily identified in the tributaries of the Atalanga and Amalat paleovalleys. Only one of the main paleovalleys—the Atalanga—has been fully investigated via drilling across its entire thickness, revealing uranium accumulations at the Dybrynskoye deposit (Fig. 1C).

The southeastern flank of the Atalanga paleovalley is offset by the Koretkondinsky Fault and several smaller (in vertical displacement amplitude) disjunctives. Drill intersections through the fault zone indicate that it is a normal fault (Fig. 1D). The northwest block is downthrown relative to the southeast block, with vertical offsets ranging from 30–80 m. In the central part of the deposit area, the general northeast strike of the Koretkondinsky Fault steepens, with several splay faults branching from the main structure. These features suggest a strike-slip component to the displacements along the fault.

Structurally, ore mineralization in this deposit is controlled by its position at the flexure and strike change of the Koretkondinsky Fault, forming a localized extensional zone. It is in this segment that extensive zones of secondary restoration of the ore-controlling oxidation zonation, linked to CO_2-rich water activity, and ore bodies hosted in basalts have been identified. These are interpreted as evidence of epigenetic uranium reduction (Kochkin et al., 2014).

Exploratory drilling across the Vitim Plateau indicates that the main paleovalleys are of erosional-tectonic origin and likely genetically linked with other Cenozoic depressions in the Baikal rift zone (Fig. 2A). The paleovalley network and volcanic plateau lie approximately 200 km southeast of the Baikal rift system. Smaller Cenozoic rift structures extend even farther south, reaching as far as spreading centers in the South China and Japan seas—a distance of around 2,000 km (Fig. 2B). The Cenozoic rifting in SE Eurasia is viewed as a consequence of the India–Eurasia collision and simultaneous Pacific Plate subduction beneath Eurasia (Rasskazov et al., 2007; Yin, 2010; Chuvashova et al., 2023).

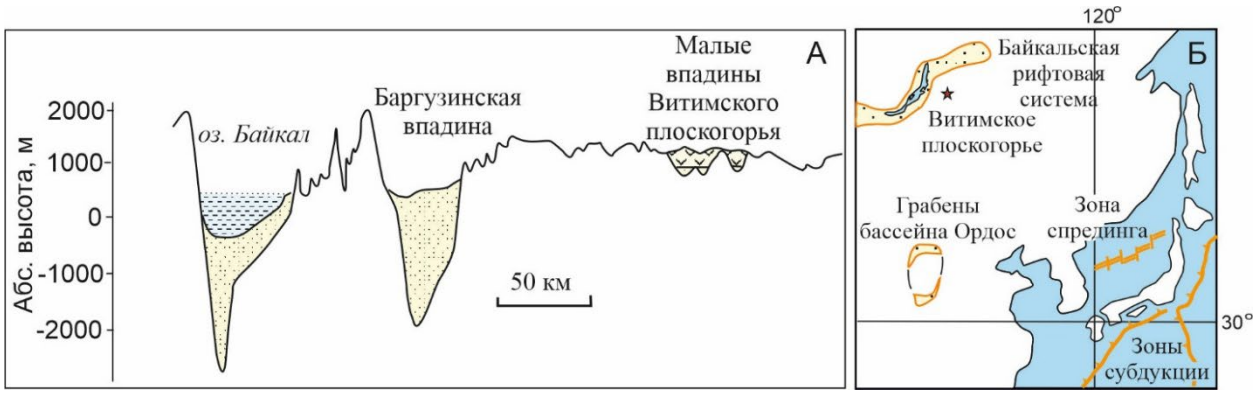


Fig. 2. A – Spatial relationships between small depressions of the Vitim Plateau and the Baikal rift zone depressions (after Rasskazov et al., 2007, modified). B – Position of the Vitim Plateau among Cenozoic structures of Southeast Eurasia.

The Vitim Plateau is one of the regions in Transbaikalia where young volcanism has occurred, beginning in the Early Miocene and continuing throughout the Late Cenozoic. Within the Baikal rift system, 3 to 7 volcanic pulses are distinguished over the past 22 million years. On the Vitim Plateau, seven volcanic pulses have been recorded: I – 21, II – 18, III – 15–9, IV – 7.5–6.5, V – 5–3, VI – 1.8–1.5, and VII – 1.1–0.6 Ma (Rasskazov et al., 2007). The K–Ar age of basalt samples from the middle part of the lava cap over the Dybrynskoye deposit—8.6–9.1 Ma—corresponds to the end of the third

volcanic phase, suggesting that by this time the basalts had covered not only the main valleys but also the watersheds between paleo-gullies.

The U–Pb age of uranium mineralization in KOF deposits is approximately 10 million years, interpreted as the age of ore preservation following secondary reduction of the ore-controlling oxidation zone by post-volcanic fluids.

An effective uranium mineral system requires several critical components: a source of uranium and carrier fluids, pathways for transport and deposition, tectonic settings for driving fluid flow, and mechanisms for ore precipitation. For fossilized systems, preservation becomes an additional key factor. All of these components are present in the Vitim system, starting with the source of uranium—Paleozoic granites.

A fundamental factor enabling the development of hydraulic conditions for infiltration-type ore formation is tectonic topographic differentiation, which initiates hydraulic pressure gradients in aquifers. In the case of the Vitim Plateau, Cenozoic rifting likely played this role, expressed as the formation of erosional-tectonic depressions with ENE strike. Basaltic volcanism preserved the original paleovalleys as buried channels hosting the infiltration-type uranium deposits. Volcanism also facilitated the entry of reductive waters into the host sediments, altering the original characteristics of uranium ores. These reducing conditions created by CO_2-rich waters, together with the basalt cap, ensured long-term preservation of the mineralization from exogenous destruction.

This study was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 13.1902.24.44 (Agreement No. 075-15-2024-641).

1. Kochkin B.T., Novgorodtsev A.A., Tarasov N.N., Martynenko V.G. Morphological features and genesis of uranium deposits in the Khiagda ore field // Geology of Ore Deposits. 2014. Vol. 56. No. 6. P. 539–555.
2. Kochkin B.T., Tarasov N.N., Andreeva O.V., Asadulin En.E., Golubev V.N. Polygeny and polychronism of uranium mineralization at the Khiagda ore field (Buryatia) // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59. No. 2. P. 124–140.
3. Rasskazov S.V., Lyamina N.A., Chernyaeva G.P., et al. Cenozoic stratigraphy of the Vitim Plateau: The phenomenon of long-term rifting in southern East Siberia. Novosibirsk: Academic Publ. House “Geo”, 2007. 193 p.
4. Solodov I.N., Nesterova M.V. Carbon dioxide-rich groundwater as a uranium ore preservation factor at Khiagda deposits (Republic of Buryatia) // Geology of Ore Deposits. 2022. Vol. 64. No. 1. P. 151–162.
5. Uranium Resources of Russia. Ed. G.A. Mashkovtsev. Moscow: VIMS, 2010. 850 p.
6. Chuvashova I.S., Rasskazov S.V. Advances in the study and dating of modern volcanism in the Baikal Rift Zone and their significance for understanding Asia’s neotectonics // Geology and the Environment. 2023. Vol. 3. No. 3. P. 149–197.
7. Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis // Tectonophysics. 2010. Vol. 488. P. 293–325.

Геохимия и возраст магматических пород Арсеньевского и Высокогорского оловорудных месторождений (Сихотэ-Алинь)

Крук Н.Н.[1], Гаврюшкина О.А.[1], Крук Е.А.[1], Федосеев Д.Г.[2], Орехов А.А.[2], Смирнов С.З.[1], Семенова Д.В.[1], Травин А.В.[1], Касаткин С.А.[2]
[1]ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, kruk@igm.nsc.ru; [2]ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток, dmitry_fedoseev@bk.ru

Оловорудные месторождения Сихотэ-Алиня локализованы, большей частью, в Журавлевско-Амурском террейне и представлены тремя основными типами: касситерит-силикатно-сульфидными, олово-порфировыми и грейзеново-кварцевожильными, связанными с Li-F гранитами.

Состав и условия формирования магматических пород месторождений последнего типа достаточно детально освещены в (Руб и др., 1998; Гоневчук и др., 2005; Смирнов и др., 2014; Крук и др., 2022; Гаврюшкина и др., 2023 и др.). В данной работе излагаются результаты геохимических и геохронологических исследований магматических пород Арсеньевского (касситерит-силикатно-сульфидный тип) и Высокогорского (предположительно – олово-порфировый тип) месторождений.

Арсеньевское месторождение расположено в западной части Кавалеровского рудного района Приморья (Родионов, 2005, Кокорин и др, 2008). Вмещающими породами являются раннемеловые (апт-альбские) терригенные отложения, смятые в складки северо-восточного простирания.

Руды локализованы в двух субширотных зонах. По данным (Геодинамика…, 2006) оловянное оруденение сформировано в три этапа: к первому относятся тела турмалин-кварц-касситерит-сульфидных метасоматитов, ко второму (главному) - субмеридиональные кварцевые жилы с флюоритом, касситеритом и сульфидами (арсенопирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, пирит); третий этап представлен кварц-карбонатными жилами с деревянистым оловом, сульфидами и сульфосолями.

Магматические породы района месторождения представлены, преимущественно, дайками и мелкими штоками. Среди них выделяются три группы: 1) монцодиорит-порфиры и трахиандезибазальты; 2) гранодиорит- и риолит-порфиры; 3) калиевые риолиты. По данным предшественников (Геодинамика…, 2006, Кокорин и др., 2008) магматические породы первой группы принадлежат раннемеловому березовско-араратскому комплексу, второй – позднемеловому угловскому, третьей – позднемеловому же шумненскому. Детальные наблюдения в горных выработках установили характер связи магматизма и оруденения: дайки монцодиорит-порфиров прорываются рудными телами всех трех этапов, гранодиорит-порфиров – второго и третьего, риолитов – только третьего (Кокорин и др., 2008).

Монцодиорит- и монцонит-порфиры представляют собой ультракалиевые породы слабо повышенной щелочности. Они характеризуются повышенной железистостью, умеренными содержаниями титана и повышенными фосфора, а по соотношению щелочей и кальция соответствуют известково-щелочной серии. Редкоэлементный состав характеризуется повышенными концентрациями несовместимых элементов (Rb – до 100 г/т, Zr – до 135 г/т, Y – до 20 г/т, Nb – до 11 г/т). Содержания РЗЭ также выше кларка средних пород (∑РЗЭ – 110-125 г/т), спектры их распределения асимметричные с (La/Yb)N=8-10 и незначительным европиевым минимумом. На мультиэлементных диаграммах фиксируются слабые минимумы по Ba, Ta, Nb и Ti, незначительные максимумы по Sr, Zr и Hf. В целом геохимические характеристики монцодиорит-и монцонит-порфиров позволяют уверенно параллелизовать их с идентичными по кремнекислотности породами березовско-араратского комплекса, имеющими возраст 100+1 млн лет (Крук и др., 2019).

Гранодиорит-порфиры – высококалиевые породы нормальной щелочности с натровой специализацией щелочей (K_2O/Na_2O=0,4-0,7). Для них характерны умеренная железистость, невысокие содержания титана и повышенные – фосфора. Породы слабо пересыщены

глиноземом, а по соотношению щелочей и кальция соответствуют известково-щелочным и щелочно-известковистым разностям. Редкоэлементный состав характеризуется более низкими, в сравнении с предшествующими монцодиорит-порфирами, содержаниями крупноионных литофильных и высокозарядных элементов. Содержания РЗЭ близкларковые (∑РЗЭ – 85-92 г/т), спектры их распределения асимметричные с (La/Yb)N= 9,5-10 и крайне незначительным европиевым минимумом. Форма мультиэлементных спектров близка к наблюдаемой для монцодиоритов.

Возраст гранодиорит-порфиров, определенный U-Pb (LA-ICP-MS) методом по цирконам, составил 99±1 млн лет (СКВО=0,47, кластер из 26 конкордантных аналитических точек).

Дайки риолитов были изучены в пределах рудного поля. Петрографические исследования показали, что все образцы характеризуются высокой степенью метасоматического преобразования, которое, как мы полагаем, привело с существенному изменению петрохимического состава. Формально риолиты представляют собой высококремнистые (75,5-78 мас. % SiO2) ультракалиевые железистые и пересыщенные глиноземом породы нормальной щелочности. Для них типичны высокие калий/натровые отношения (1,9-39), обусловленные не только высокими концентрациями K_2O, но и низкими (обычно менее 1 мас. %) содержаниями Na_2O. Редкоэлементный состав изученных образцов характеризуется повышенными содержаниями Rb и Cs, низкими Sr и умеренными – Ba. Концентрации Zr, Nb и Hf существенно ниже кларковых, содержания Y, Th, U и Ta – на близкларковом уровне. Концентрации РЗЭ понижены (∑РЗЭ – 85-98 г/т), спектры их распределения асимметричные с с $(La/Yb)_N \approx 6$ и значительным европиевым минимумом. На мультиэлементных спектрах наблюдаются отчетливые минимумы по Sr, Ba, Ta, Nb, Ti. Возраст формирования риолитов достоверно определить не удалось, как не удалось параллелизовать их ни с одним известным комплксом Сихотэ-Алиня. Результаты K-Ar датирования пород месторождения, обобщенные в (Кокорин и др., 2008) указывают на наличие большого количества раннепалеогеновых дат с пиком на 60 млн лет. Этот рубеж предварительно может быть принят как возраст преобразования риолитов и образования поздней оловорудной минерализации.

Высокогорское месторождение локализовано в пределах Высокогорско-Нежданкинского горста в западной части Таухинского террейна Сихотэ-Алиня. Вмещающими являются терригенно-вулканогенно-кремнистые (с линзами и блоками карбонатов) отложения раннемелового таухинского аккреционного комплекса. Руды месторождения сконцентрированы в телах кварцевых турмалинитов, жилах и штокверках грейзенов с турмалином, молибденитом и сульфидами, а также телах эксплозивных брекчий с многочисленными жилами и штокверками касситерит-мусковит-кварцевого состава (Бортников и др., 2005; Соколова и др., 2024).

Наиболее древними магматическими породами, проявленнми непосредственно в рудном поле, являются дорудные гранодиорит-порфиры и дацит-порфиры, формирующие небольшой шток в центральной части месторождения. Кроме того, здесь широко развиты дайки до- и синрудных дацитов, риолитов, фельзит-порфиров, пострудных рогобманковых порфиритов, а также ультракалиевых риолитов, идентичных палеогеновым породам расположенной к северо-западу Якутинской вулкано-тектонической структуры.

Петрографические исследования пород, отобранных в рудном поле Высокогорского месторождения, показали, что все образцы гранодиорит-порфиров, риолитов и фельзит-порфиров подвержены метасоматическим изменениям разной степени интенсивности, в то время как роговообманковые порфириты и ультракалиевые риолиты не несут следов изменений, что подтверждает их пострудную позицию.

Гранодиорит-порфиры представляют собой умеренно-, реже высококалиевые магнезиально-железистые породы нормальной щелочности. Они обеднены кальцием и резко пересыщены глиноземом, что вместе с широкими вариациями содержаний щелочей указывает на высокую степень постмагматических изменений. Редкоэлементный состав пород

характеризуется умеренными содержаниями Rb и Cs, слабо повышенными в сравнении с кларком концентрациями Ba, Zr и Hf, близкларковыми - Y, Ta, Nb, Th и U. Концентрации РЗЭ –195-210 г/т, спектры их распределения асимметричные с (La/Yb)N= 9,6-10,6 и незначительным европиевым минимумом. На мультиэлементных диаграммах фиксируются слабые минимумы по Ba и Sr, более значимые – по Ta, Nb и Ti. Возраст пород, определенный U-Pb (LA-ICP-MS) методом по цирконам, составил 83±1 (оценка средневзвешенного возраста по отношению 206Pb/238U для кластера из 32 аналитических определений с дискордантностью менее 5%, СКВО=0,33).

Риолиты и фельзит-порфиры – высококалиевые, щелочно-известковистые, пересыщенные глиноземом железистые породы нормальной щелочности с высокой (до 78,8 мас. % SiO_2) кремнекислотностью и низкими содержаниями фосфора. Редкоэлементный состав характеризуется более высоким, в сравнении с предшествующими гранодиорит-порфирами, содержаниями крупноионных литофильных элементов. Концентрации Zr близки к кларковым (140-150 г/т), в то время как содержания остальных HFSE резко повышены (Y- до 90 г/т, Nb - до 42 г/т, Ta – до 4 г/т, Hf – до 8,2 г/т, Th – до 43 г/т, U – до 10 г/т). Суммарные концентрации РЗЭ значимо не отличаются от таковых в гранодиорит-порфирах (∑РЗЭ = 200-210 г/т), но спектры их распределения субсимметричные с (La/Yb)N= 1,4-1,6 за счет резко повышенных содержаний иттриевых лантаноидов (Yb – до 10,8 г/т, Lu – до 1,66 г/т) и с глубоким европиевым минимумом. На мультиэлементных спектрах присутствует резкий максимум по Th, минимумы по Ba, Sr и Ti. В целом геохимические характеристики риолитов и фельзит-порфиров указывают на их принадлежность к породам А-типа, при этом по геохимическим особенностям они резко отличаются от палеогеновых вулканических и субвулканических ультракалиевых пород богопольского комплекса, широко распространенных в окрестностях месторождения. Необходимо также отметить, что изученные риолиты и фельзит-порфиры достаточно резко отличаются по составу от вулканитов типичных олово-порфировых месторождений Южной Америки, но обнаруживают сходство с рудоносными порфирами Южной Австралии (Ren, Walshe, 1995).

Возраст циркона из фельзит-порфиров, определенный U-Pb (LA-ICP-MS) методом по цирконам, составил 58±1 млн лет (оценка средневзвешенного возраста по отношению 206Pb/238U для кластера из 17 аналитических определений с дискордантностью менее 5%, СКВО=0,72).

Проведенные исследования показали, что оловорудные месторождения разных типов различаются по возрасту магматизма, ассоциирующего с оруденением (≈ 100 млн лет для касситерит-силикатно-сульфидных месторождений, ≈ 75 млн лет для грейзеново-кварцевожильных, связанных с Li-F гранитами и ≈ 60 млн лет – для олово-порфировых). При этом пики проявления рудоносного магматизма Арсеньевского и Высокогорского месторождений синхронны с главными рубежами интрузивного магматизма Сихотэ-Алиня. В то же время, рудоносные магматиты обладают специфической геохимией и не находят прямых аналогов среди одновозрастных магматических образований региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России (проект № 13.1902.24.44, соглашение № 075-15-2024-641).

1. Бортников Н.С., Ханчук А.И., КрыловаТ.Л., Аникина Е.Ю., Гореликова Н.В., Гоневчук В.Г., Игнатьев А.В., Кокорин А.М., Коростелев П.Г., Ломм Т. Геохимия минералообразующих флюидов некоторых оловорудных гидротермальных систем Сихотэ-Алиня (Дальний Восток, Россия) // Геология рудных месторождений, 2005, Т. 47, № 6, С. 537–570.
2. Гаврюшкина О.А., Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Крук Н.Н., Пономарчук А.В., Томас В.Г. Эволюция редкометалльных Li-F гранитных магм в очагах рудно-магматических систем олово-вольфрамовых месторождений Тигриного и Забытого (Центральный Сихотэ-Алинь, Приморье) // Геология рудных месторождений, 2023, Т. 65, № 6, стр. 509-527.

3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России (ред. А.И.Ханчук). в двух книгах. Владивосток: Дальнаука, 2006, 981 с.
4. Гоневчук В.Г., Гоневчук Г.А., Кокорин А.М. Новые изотопно-геохронологические данные и некоторые вопросы генезиса оловянного оруденения Кавалеровского района (Приморье) / Тихоокеанская геология, 2005, Т. 24, № 6, С. 77-88.
5. Кокорин А.М., Гоневчук В.Г., Кокорина Д.А., Орехов А.А. Высокогорское оловорудное месторождение: особенности минерализации и генезиса // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2001, вып. 2, часть 1, С. 156-170.
6. Кокорин А.М., Кокорина Д.А., Орехов А.А. Многометалльность и высокая продуктивность локальных рудно-магматических систем Сихотэ-Алиня (на примере Арсеньевского месторождения) / Тихоокеанская геология, 2008, Т. 27, № 2, С. 29-46.
7. Крук Н.Н., Гвоздев В.И., Орехов А.А., Крук Е.А., Касаткин С.А., Голозубов В.В., Руднев С.Н., Шого А., Цуйоши К., Ковач В.П., Серов П.А. Раннемеловые гранитоиды и монцонитоиды южной части Журавлевского террейна (Сихотэ-Алинь): геохимические особенности и источники расплавов // Тихоокеанская геология, 2019, Т.38, № 3, С.30-49.
8. Крук Н.Н., Гаврюшкина О.А., Федосеев Д.Г., Орехов А.А., Крук Е.А., Касаткин С.А., Медников С.Л. Редкометалльные граниты массива Тигриный (Сихотэ-Алинь): геохимия, минералогия и особенности эволюции // Тихоокеанская геология, 2022, т. 41, № 1, С. 46–64
9. Родионов С.М. Металлогения олова Востока России. М.: Наука, 2005. 327 с.
10. Руб М.Г., Руб А.К., Кривощеков Н.Н., Ашихмина Н.А. Редкометалльные граниты и руды месторождения Тигриное, Центральный Сихотэ-Алинь // Петрология, 1998, Т. 6, №1, С.16-29.
11. Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Секисова В.С., Бортников Н. С., Гореликова Н.В., Томас В. Г. Магматогенно-флюидная система олово-порфирового Высокогорского месторождения (Сихотэ-Алинь, Кавалеровский рудный район, Приморье, Россия): магматический этап развития / геология рудных месторождений, 2023, том 65, № 7, с. 700–721.
12. Смирнов С.З., Бортников Н.С., Гоневчук В.Г., Гореликова Н.В. Составы расплавов и флюидный режим кристаллизации редкометальных гранитов и пегматитов Тигриного Sn–W месторождения (Приморье) // Доклады РАН, 2014, Т. 456, № 1, с. 95–100.
13. Jahn B.-M., Valui G., Kruk N., Gonevchuk V., Usuki M., Wu J.T.J. Emplacement ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: crustal growth and regional tectonic evolution // Journal of Asian Earth Sciences, 2015, V.111, P. 872–918.
14. Ren S., Walshe J. Magmatic and Hydrothermal History of the Porphyry-Style Deposits of the Ardlethan Tin Field, New South Wales, Australia / Economic Geology, 1995, Vol. 90, P. 1620-1645.

*Geochemistry and Age of Magmatic Rocks from the Arsenyev and Vysokogorskoe Tin Deposits (Sikhote-Alin)

Kruk N.N.[1], Gavryushkina O.A.[1], Kruk E.A.[1], Fedoseev D.G.[2], Orekhov A.A.[2], Smirnov S.Z.[1], Semenova D.V.[1], Travin A.V.[1], Kasatkin S.A.[2]
[1]IGM SB RAS, Novosibirsk, Russia, kruk@igm.nsc.ru; [2]FEGI FEB RAS, Vladivostok, Russia, dmitry_fedoseev@bk.ru

Tin deposits in the Sikhote-Alin region are mostly located within the Zhuravlevsko-Amur terrane and are represented by three main types: cassiterite-silicate-sulfide, tin-porphyry, and greisen-quartz-vein types associated with Li-F granites.

The composition and formation conditions of magmatic rocks associated with the latter type have been well described in previous works (Rub et al., 1998; Gonevchuk et al., 2005; Smirnov et al., 2014; Kruk et al., 2022; Gavryushkina et al., 2023, among others).

This study presents the results of geochemical and geochronological investigations of the magmatic rocks at the Arsenyev (cassiterite-silicate-sulfide type) and Vysokogorskoe (presumably tin-porphyry type) deposits.

The Arsenyev deposit is situated in the western part of the Kavalerovo ore district of Primorye (Rodionov, 2005; Kokorin et al., 2008). The host rocks are Early Cretaceous (Aptian–Albian) terrigenous sediments folded into NE-trending structures.

Ore mineralization is localized in two sublatitudinal zones. According to (Geodynamics…, 2006), tin mineralization occurred in three stages: the first stage is represented by bodies of tourmaline–quartz–cassiterite–sulfide metasomatites; the second (main) stage consists of submeridional quartz veins with fluorite, cassiterite, and sulfides (arsenopyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, galena, pyrite); the third stage comprises quartz–carbonate veins with wood tin, sulfides, and sulfosalts.

The magmatic rocks in the deposit area occur mostly as dikes and small stocks. Three groups are distinguished among them: 1. Monzodiorite-porphyries and trachyandesibasalts; 2. Granodiorite- and rhyolite-porphyries; 3. Potassic rhyolites. According to previous research (Geodynamics…, 2006; Kokorin et al., 2008), rocks of the first group belong to the Early Cretaceous Berezovsk–Ararat complex; the second to the Late Cretaceous Uglovka complex; and the third to the coeval Shumny complex. Detailed field observations indicate the genetic link between magmatism and mineralization: monzodiorite-porphyry dikes cut ore bodies of all three stages, granodiorite-porphyry dikes cut bodies of the second and third stages, and rhyolite dikes are associated only with the third stage (Kokorin et al., 2008).

Monzodiorite and monzonite porphyries are ultrapotassic rocks of slightly elevated alkalinity. They are characterized by high iron content, moderate Ti, elevated P, and belong to the calc-alkaline series based on alkali/Ca ratios. Their trace element composition shows elevated incompatible elements (Rb up to 100 ppm, Zr up to 135 ppm, Y up to 20 ppm, Nb up to 11 ppm). REE contents are also above average crustal values (ΣREE = 110–125 ppm), with asymmetric patterns $(La/Yb)_N$ = 8–10 and a minor Eu anomaly. Multielement diagrams show weak negative anomalies in Ba, Ta, Nb, and Ti, and slight positive anomalies in Sr, Zr, and Hf. Overall, the geochemistry is consistent with the Berezovsk–Ararat complex, dated at 100 ±1 Ma (Kruk et al., 2019).

Granodiorite-porphyries are high-K rocks with normal alkalinity and a sodic bias (K_2O/Na_2O = 0.4–0.7), moderate Fe, low Ti, and high P. They are slightly peraluminous and belong to the calc-alkaline to alkali-calcic series. Compared to the previous group, they are depleted in LILE and HFSE. REE contents are near-clark values (ΣREE = 85–92 ppm), $(La/Yb)_N$ = 9.5–10, with a weak Eu anomaly. Their multielement patterns are similar to monzodiorites.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

The U–Pb (LA–ICP–MS) zircon age is 99 ±1 Ma (MSWD = 0.47, based on 26 concordant points).

Rhyolite dikes from the ore field exhibit strong metasomatic alteration, significantly modifying their petrological composition. These are high-silica (75.5–78 wt.% SiO_2), ultrapotassic, ferruginous, peraluminous rocks of normal alkalinity. K/Na ratios are high (1.9–39) due to both elevated K_2O and low Na_2O (<1 wt.%). Trace element data show high Rb and Cs, low Sr, moderate Ba, very low Zr, Nb, and Hf, while Y, Th, U, and Ta are near average. REE concentrations are subdued (ΣREE = 85–98 ppm), with $(La/Yb)_N \approx 6$ and a pronounced Eu anomaly. Multielement spectra show negative anomalies in Sr, Ba, Ta, Nb, Ti. The formation age could not be confidently determined, but numerous early Paleogene K–Ar dates with a peak at 60 Ma (Kokorin et al., 2008) suggest that time as the likely age of alteration and late tin mineralization.

The Vysokogorskoe deposit is located within the Vysokogorsko-Nezhdankinsky horst in the western part of the Taukhinsky terrane of Sikhote-Alin. The host rocks are Lower Cretaceous terrigenous–volcanogenic–siliceous formations (with carbonate lenses and blocks) of the Taukhinsky accretionary complex. The ores are concentrated in quartz–tourmaline bodies, greisen veins and stockworks with tourmaline, molybdenite, and sulfides, as well as explosive breccia bodies with numerous cassiterite–muscovite–quartz veins and stockworks (Bortnikov et al., 2005; Sokolova et al., 2024).

The oldest magmatic rocks directly observed in the ore field are pre-ore granodiorite-porphyries and dacite-porphyries forming a small stock in the central part of the deposit. In addition, dikes of pre- and syn-ore dacites, rhyolites, felsite porphyries, post-ore hornblende porphyrites, and ultrapotassic rhyolites (identical to Paleogene rocks of the Yakutinskaya volcano-tectonic structure to the northwest) are widespread.

Petrographic analysis shows that all samples of granodiorite-porphyries, rhyolites, and felsite-porphyries are metasomatized to varying degrees, whereas hornblende porphyrites and ultrapotassic rhyolites show no signs of alteration, supporting their post-ore origin.

Granodiorite-porphyries are moderately to highly potassic, magnesian–ferruginous rocks of normal alkalinity. They are calcium-depleted and strongly peraluminous, with wide variations in alkali content indicative of high post-magmatic alteration. Their trace element content includes moderate Rb and Cs, slightly elevated Ba, Zr, and Hf, and near-clark levels of Y, Ta, Nb, Th, and U. ΣREE = 195–210 ppm; REE patterns are asymmetric with $(La/Yb)_N = 9.6–10.6$ and a weak Eu anomaly. Multielement diagrams show mild negative anomalies in Ba and Sr, and more significant troughs in Ta, Nb, and Ti. U–Pb (LA–ICP–MS) dating of zircon gives an age of 83 ±1 Ma (based on 32 analyses with discordance <5%, MSWD = 0.33).

Rhyolites and felsite-porphyries are high-K, alkali–calcic, peraluminous, ferruginous rocks with normal alkalinity, high SiO_2 (up to 78.8 wt.%) and low P. Their trace element composition includes elevated LILE (Rb, Cs), near-clark Zr (140–150 ppm), and significantly enriched HFSE: Y up to 90 ppm, Nb up to 42 ppm, Ta up to 4 ppm, Hf up to 8.2 ppm, Th up to 43 ppm, U up to 10 ppm. ΣREE = 200–210 ppm, with $(La/Yb)_N = 1.4–1.6$ due to enriched heavy REEs (Yb up to 10.8 ppm, Lu up to 1.66 ppm) and a pronounced Eu anomaly. Multielement diagrams show a sharp Th peak and negative anomalies in Ba, Sr, Ti. These characteristics place them within the A-type granite field. They differ significantly from coeval ultrapotassic volcanic rocks of the Bogopol complex, but resemble ore-bearing porphyries from South Australia (Ren, Walshe, 1995).

U–Pb (LA–ICP–MS) dating of zircons from felsite-porphyries yields an age of 58 ±1 Ma (from 17 concordant analyses with discordance <5%, MSWD = 0.72).

Conclusions: The studied tin deposits of different types are associated with magmatism of varying ages: ~100 Ma for cassiterite–silicate–sulfide type, ~75 Ma for greisen–quartz–vein type associated with Li–F granites, and ~60 Ma for tin–porphyry type. The magmatic peaks at Arsenyev and Vysokogorskoe deposits correspond to major intrusive phases in Sikhote-Alin. However, the ore-related magmatic rocks display specific geochemical features and lack clear analogues among coeval regional magmatism.

Funding: This work was financially supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education, project No. 13.1902.24.44 (agreement No. 075-15-2024-641).

1. Bortnikov N.S., Khanchuk A.I., Krylova T.L., Anikina E.Yu., Gorelikova N.V., Gonevchuk V.G., Ignatiev A.V., Kokorin A.M., Korostelev P.G., Lomm T. (2005). Geochemistry of ore-forming fluids in some tin-bearing hydrothermal systems of Sikhote-Alin (Russian Far East). Geology of Ore Deposits, 47(6), 537–570.
2. Gavryushkina O.A., Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Kruk N.N., Ponomarchuk A.V., Thomas V.G. (2023). Evolution of rare-metal Li–F granite magmas in ore-magmatic systems of the Tigrynoe and Zabytoe Sn–W deposits (Central Sikhote-Alin, Primorye). Geology of Ore Deposits, 65(6), 509–527.
3. Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian Far East (Ed. A.I. Khanchuk). In two volumes. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 981 p. [in Russian]
4. Gonevchuk V.G., Gonevchuk G.A., Kokorin A.M. (2005). New isotope-geochronological data and some genetic issues of tin mineralization in the Kavalerovo area (Primorye). Pacific Geology, 24(6), 77–88. [in Russian]
5. Kokorin A.M., Gonevchuk V.G., Kokorina D.A., Orekhov A.A. (2001). The Vysokogorskoe tin deposit: features of mineralization and genesis. In: Ore Deposits of Continental Margins. Vladivostok: Dalnauka, Vol. 2, Pt. 1, pp. 156–170. [in Russian]
6. Kokorin A.M., Kokorina D.A., Orekhov A.A. (2008). Multimetallicity and high productivity of local ore-magmatic systems of Sikhote-Alin (example of the Arsenyev deposit). Pacific Geology, 27(2), 29–46. [in Russian]
7. Kruk N.N., Gvozdev V.I., Orekhov A.A., Kruk E.A., Kasatkin S.A., Golozubov V.V., Rudnev S.N., Shogo A., Tsuyoshi K., Kovach V.P., Serov P.A. (2019). Early Cretaceous granitoids and monzonitoids of the southern part of the Zhuravlevka terrane (Sikhote-Alin): geochemical characteristics and melt sources. Pacific Geology, 38(3), 30–49. [in Russian]
8. Kruk N.N., Gavryushkina O.A., Fedoseev D.G., Orekhov A.A., Kruk E.A., Kasatkin S.A., Mednikov S.L. (2022). Rare-metal granites of the Tigriny massif (Sikhote-Alin): geochemistry, mineralogy and features of evolution. Pacific Geology, 41(1), 46–64. [in Russian]
9. Rodionov S.M. (2005). Tin Metallogeny of the Russian Far East. Moscow: Nauka. 327 p. [in Russian]
10. Rub M.G., Rub A.K., Krivoschekov N.N., Ashikhmina N.A. (1998). Rare-metal granites and ores of the Tigrinoe deposit, Central Sikhote-Alin. Petrology, 6(1), 16–29. [in Russian]
11. Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Sekisova V.S., Bortnikov N.S., Gorelikova N.V., Thomas V.G. (2023). Magmatic-hydrothermal system of the porphyry tin Vysokogorskoe deposit (Sikhote-Alin, Kavalerovo ore district, Primorye, Russia): magmatic stage of evolution. Geology of Ore Deposits, 65(7), 700–721.
12. Smirnov S.Z., Bortnikov N.S., Gonevchuk V.G., Gorelikova N.V. (2014). Composition of melts and fluid regime of crystallization of rare-metal granites and pegmatites of the Tigrinoe Sn–W deposit (Primorye). Doklady RAN, 456(1), 95–100. [in Russian]
13. Jahn B.-M., Valui G., Kruk N., Gonevchuk V., Usuki M., Wu J.T.J. (2015). Emplacement ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: crustal growth and regional tectonic evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 111, 872–918.
14. Ren S., Walshe J. (1995). Magmatic and Hydrothermal History of the Porphyry-Style Deposits of the Ardlethan Tin Field, New South Wales, Australia. Economic Geology, 90, 1620–1645.

Мезопротерозойский пикрит-пикробазальтовый вулканизм Енисейского кряжа: петрогеохимия, метаморфизм и Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd систематика

Лиханов И.И.[1], Козлов П.С.[2], Ножкин А.Д.[1], Ронкин Ю.Л.[2]
[1]ИГМ СО РАН, likh@igm.nsc.ru, nozhkin@igm.nsc.ru; [2]ИГГ УрО РАН, y-ronkin@mail.ru

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой коллизионно-аккреционный ороген на западной окраине Сибирского кратона, важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования о конфигурации древнего суперконтинента Нуны (Reverdatto et al., 2019). Детальный обзор мировых возрастных аналогов рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервалах времени 1380-1350 млн лет, установленных в структурах ряда крупных кратонов Нуны, приведен в работе (Likhanov, Santosh, 2019). Тем не менее, проблемы оценки геохронологических рубежей в истории этого суперконтинента во многом остаются дискуссионными и далеки от окончательного решения. Это связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящем докладе, где обсуждаются особенности происхождения, возрастной рубеж и стратиграфический уровень пикрит-пикробазальтового вулканизма Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса на юго-западе Сибирского кратона. Повышенный металлогенический интерес к древней рифтогенной структуре вызван локализацией в районе исследования Панимбинского золоторудного и Татарского P-Ta-Nb месторождений (Ножкин и др., 2011).

Объект исследования Ишимбинско-Татарская шовная зона, включающая полихронный Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс (РПВП) (Лиханов и др., 2011). Здесь изучены Панимбинский и Михайловский опорные участки, расположенные на севере РПВП Ишимбинско-Татарской шовной зоны. На Панимбинском участке интерес представляет панимбинская толща, сложенная метаморфизованными туффитами и туфами пикробазальтов и метаосадочными породами (Козлов, Лиханов, 2024). Толща метапород Михайловского участка имеет неоднородное строение, в её составе преобладают актинолитовые, хлорит-актинолитовые амфиболиты и двуполевошпатовые амфибол-диопсидовые метавулканиты. Перекрываются метавулканиты чёрными глинозёмистыми слюдисто-графитистыми сланцами с кордиеритом и андалузитом. Метаморфические породы района исследований слагают юго-восточную периферию Тейского метаморфического комплекса (Лиханов и др., 2011).

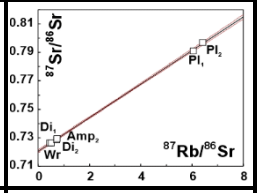
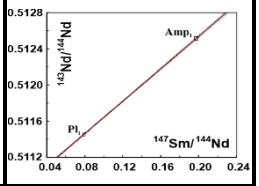
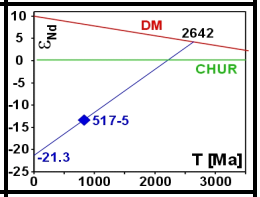
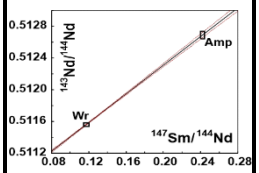
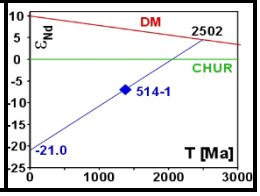
Результаты термобарометрии показали видимые различия в пределах погрешностей методов (Likhanov et al., 2004) по *P-T* параметрам формирования толщ разного химического состава: 4.8-4.9 кбар/527-549°C – метатуффиты пикробазальтов; 5.0-5.8 кбар/543-612°C – метабазиты; 3.5-4.6 кбар/522-636°C – метапелиты.

Результаты изучения Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS изотопной систематики выполнены для двух образцов пород в целом и выделенных из них минералов (диопсиды, амфибол, плагиоклазы), представляющих кординскую свиту и панимбинскую толщу Ишимбинско-Татарской шовной зоны в северной части РПВП, соответственно. Помимо основных параметров Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS изотопных систем (возраст, IR, $\varepsilon_{Nd}(t)$) отображены графики в координатах $^{87}Rb/^{86}Sr$ – $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{147}Sm/^{144}Nd$ – $^{143}Nd/^{144}Nd$, T – $\varepsilon_{Nd}(t)$, дающие представление о локализации соответствующих фигуративных точек на плоскостях графических представлений в указанных осях абсцисс и ординат (табл. 1).

Образец П-517-5-21 метавулканит, из основания пачки метавулканогенно-осадочных пород кординской свиты. ID-TIMS данные характеризующие изотопный состав Rb-Sr этой породы в целом и выделенных из нее минералов двух диопсидов и плагиоклазов, на графике Николайсена удовлетворяет линии регрессии, наклон которой в указанных координатах определяет возраст 827±17 млн лет и величину первичного отношения изотопов стронция

0.72051±0.00089. Параметры референсной линии на графике $^{147}Sm/^{144}Nd$ vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ для плагиоклаза и амфибола, соответствуют возрасту 1363±21 млн лет, $\varepsilon_{Nd}(1363) = -2{,}6$. Наконец, ^{147}Sm-^{143}Nd модельный возраст, соответствующий точке пересечения линий эволюции изотопного состава неодима образца П-517-5 и деплетированного резервуара (DM) на графике T vs. $\varepsilon_{Nd}(t)$, имеет величину 2642 млн лет. Возраст 827 млн лет мы интерпретируем как возраст метаморфической дифференциации регионально- метаморфизованных толщ 1006-996 млн лет, близкого к возрасту предрудной эпохи формирования метасоматитов золото-арсенопирит-кварцевого парагенезиса (Лиханов и др., 2011)

Таблица. 1. Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS изотопная систематика пород и минералов в северной части Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса.

бразец	Порода, минерал	вита/ олща	И зотопная истема	озраст | млн лет], d t)	Графическое представление
-517-5	Мет авулканит (Wr), диопсид (Di), амфибол Am , плаги оклаз (Pl)	К ординская вита, R	b-Sr	27±17, 0,00089	
			m- d	363±21, d 1363)= 2,6	
				M 2642, d 827) 13,4	
-514-1	Метам орфизован ый туф (т уфолава?) пикр обазальта (Wr), амфибол Am	Пан имбинская олща, R	m- d	377±40, d 1377) 7,0	
				M 2502, d 1377)= 7,0	

Примечания: R1 – Нижнерифейская система, 1350–1650 млн лет. IR - Initial Ratio. Wr - порода в целом. $T_{DM\text{-}1st}$, $T_{DM\text{-}2st}$ – одностадийный и двухстадийный Nd модельный возраст. CHUR, DM – линии эволюции хондритового и деплетированного модельных резервуаров.

Образец П-514-1-21 метаморфизованный туф пикробазальта, нижняя часть панимбинской толщи. На графике в координатах $^{147}Sm/^{144}Nd$ vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ фигуративные точки породы в целом и выделенного из нее амфибола, удовлетворяют линии согласования, параметры которой диагносцируют раннемезопротерозойский возраст 1377±40 млн лет, а также наличие определенного вклада корового материала, что подтверждается величиной $\varepsilon_{Nd}(1377) = -7.0$. Вычисленный, в рамках представлений об эволюции деплетированной мантии, неоархей-палеопротерозойский возраст T_{DM} 2502 млн лет, по сути определяется

временем, когда отношение $^{143}Nd/^{144}Nd$ в изученном образце П-514-1-21 соответствовало таковому в модельном резервуаре DM.

Полученные значения возраста внутриплитного вулканизма и связанного с ним рифтогенного метаморфизма в Ишимбинско-Татарской шовной зоне подтверждены Rb-Sr, ^{147}Sm-^{144}Nd, U-Pb TIMS и SHRIMP-II (циркон) изотопией для границы бурзяния (R_1) и юрматиния на Южном Урале (R_2).

Выводы.

(1) Геологические, петролого-геохимические и изотопно-геохронологические Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS результаты являются основанием для стратиграфической корреляции разрезов метавулканогенно-осадочной толщи кординской свиты Михайловского участка и метапикритов, ультраосновных и основных пикробазальтов панимбинской толщи Панимбинского участка.

(2) Важным геологическим критерием корреляции этих разрезов является то, что обе вулканогенно-осадочные толщи подстилает единый маркирующий горизонт черных углеродисто-слюдистых сланцев с хлоритоидом. От ниже залегающих карбонатно-терригенных пород рязановской свиты палеопротерозоя их отличает цвет, минеральный и петрогеохимический состав пород, повышенная глинозёмистость, радиоактивность, отсутствие карбонатной примеси, обогащение $C_{орг}$, ураном и др. компонентами. На классификационной диаграмме $K_2O+Na_2O–SiO_2$ (TAS) для базитов вулканогенные метапороды образуют тренд от пикритов, ультраосновных и основных пикробазальтов и базальтов, приуроченных к низам разрезов панимбинской толщи, до ультраосновных-основных пикробазальтов, базальтов, характеризующих, соответственно, нижние, средние и верхние части разреза Михайловского участка.

(3) Проведённые исследования свидетельствуют о мезопротерозойском (моложе 1370 млн лет) возрасте метаморфических преобразований протолитов метавулканитов кординской свиты и метавулканитов панимбинской толщи, на Михайловском и Панимбинском участках, соответственно. Установлен неоднородный характер их распространения и *P-T* условия преобразования исходных пород. По петрогеохимическому составу метавулканиты преимущественно соответствуют ультраосновным-основным пикробазальтам и базальтам. Залегание их на едином маркирующем горизонте углеродистых сланцев позволило скорректировать неопротерозойский возраст образования пород панимбинской вулканогенно-осадочной толщи и сопоставить её с таковыми кординской свиты, рассматривая эти образования на стратоуровне раннего мезопротерозоя. Этот возрастной рубеж интерпретируется как время деструкции докембрийских комплексов на западе Сибирского кратона. Возрастные аналоги рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервалах времени 1380-1350 млн лет и связанных с ними последующих процессов метаморфизма имеют место и в других регионах мира.

4. Установленный возраст рифтогенного пикрит-пикробазальтового вулканизма и метаморфизма коррелируется с временем формирования плагиогранитов немтихинского комплекса на Енисейском кряже и с Машакским 1380 млн лет субглобальным плюмовым магматизмом, проявленными в геодинамической обстановке растяжения в период распада суперконтинента Нуна (Likhanov, 2022).

Работа выполнена за счет средств РНФ (проект № 21-77-20018-П).

1. Козлов П.С., Лиханов И.И. Геология докембрийских комплексов Северо-Енисейского кряжа. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2024. 328 с.
2. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Вершинин А.Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // Доклады Академии Наук. 2011. Т. 436. № 4. С. 509-514.

3. Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А. Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. С. 158-181.
4. Likhanov I.I. Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. V. 12. No. 11. Article 402.
5. Likhanov I.I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research. 2019. V. 328. P. 128-145.
6. Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // Journal of Metamorphic Geology. 2004. V. 22. № 8. P. 743-762.
7. Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y. The Nature and Models of Metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p.

*Mesoproterozoic Picrite-Picrobasaltic Volcanism of the Yenisey Ridge: Petrogeochemistry, Metamorphism, and Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd Systematics

Likhanov I.I.[1], Kozlov P.S.[2], Nozhkin A.D.[1], Ronkin Yu.L.[2]
[1]IGM SB RAS, Novosibirsk, Russia, likh@igm.nsc.ru;
[2]IGG UB RAS, Ekaterinburg, Russia, y-ronkin@mail.ru

Reconstructing the geological history of the Yenisey Ridge—a collisional-accretionary orogen along the western margin of the Siberian Craton—is crucial not only for understanding the tectonic evolution of mobile belts but also for validating paleomagnetic models concerning the configuration of the Nuna supercontinent (Reverdatto et al., 2019). A comprehensive review of global age analogs of rift-related and intraplate magmatic events in the 1380–1350 Ma range, established in the structures of several major Nuna cratons, is provided by Likhanov and Santosh (2019). Nevertheless, the chronology of this supercontinent remains debatable due to limited geochemical and geochronological data, especially for periods of its formation and breakup, constraining global correlation of geological events. The present report aims to address this gap by discussing the origin, age, and stratigraphic position of the picrite-picrobasalt volcanism of the Rybinsk-Panimba Volcanic Belt (RPVB) in the southwestern Siberian Craton. Interest in this ancient rift-related structure is heightened by the presence of the Panimba gold and Tatarsk P-Ta-Nb deposits in the study area (Nozhkin et al., 2011).

The research focuses on the Ishimba-Tatar shear zone, incorporating the polychronous RPVB (Kozlov, Likhanov, 2024), with detailed study at the Panimba and Mikhailov reference sites in the northern RPVB sector. The Panimba site features the Panimba Formation, composed of metamorphosed tuffites and tuffs of picrobasalts and meta-sedimentary rocks. The Mikhailov section comprises amphibolites (actinolitic, chlorite-actinolitic), diopside-bearing metavolcanics, and two-feldspar amphibole-diopside varieties. These metavolcanics are overlain by aluminous graphite-mica schists with cordierite and andalusite. The metamorphic assemblages studied here represent the southeastern margin of the Tei metamorphic complex (Likhanov et al., 2011).

Thermobarometric data reveal variation in metamorphic P-T conditions for differing lithologies within analytical uncertainties (Likhanov et al., 2004): Metatuffites of picrobasalts: 4.8–4.9 kbar / 527–549 °C; Metabasalts: 5.0–5.8 kbar / 543–612 °C; Metapelites: 3.5–4.6 kbar / 522–636 °C.

Rb-Sr and 147Sm-143Nd ID-TIMS isotope systematics were applied to two whole-rock samples and their mineral separates (diopsides, amphiboles, plagioclases) from the Cordinsky Suite and Panimba Formation, respectively, in the northern RPVB. In addition to conventional parameters (age, IR, εNd(t)), the study includes isochron diagrams in coordinates 87Rb/86Sr vs. 87Sr/86Sr, 147Sm/144Nd vs. 143Nd/144Nd, and T vs. εNd(t), helping to localize analytical points on these graphical fields (Table 1).

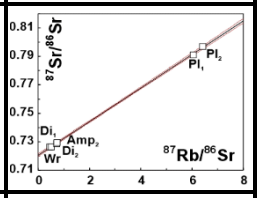
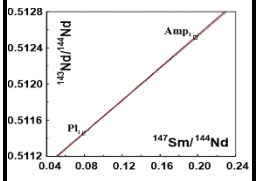
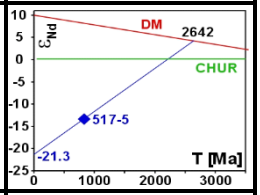
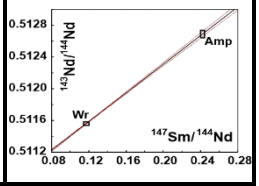
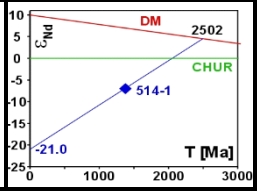
Sample P-517-5-21 is a metavolcanic rock from the base of the metavolcano-sedimentary sequence of the Cordinsky Suite. The Rb-Sr isochron for whole rock, two diopsides, and plagioclase minerals yields an age of 827 ± 17 Ma with an initial 87Sr/86Sr ratio of 0.72051 ± 0.00089. The 147Sm/144Nd vs. 143Nd/144Nd isochron for plagioclase and amphibole provides an age of 1363 ± 21 Ma with $\varepsilon Nd(1363) = -2.6$. The model TDM age based on the intersection of sample evolution and the depleted mantle (DM) line is 2642 Ma. The 827 Ma date is interpreted as the time of metamorphic differentiation of regionally metamorphosed strata formed around 1006–996 Ma, closely aligned with pre-ore metasomatic events of the gold-arsenopyrite-quartz paragenesis [2].

Sample P-514-1-21 is a metamorphosed picrobasaltic tuff from the lower Panimba Formation. Whole-rock and amphibole data on the 147Sm/144Nd vs. 143Nd/144Nd diagram define a concordant isochron with an age of 1377 ± 40 Ma and $\varepsilon Nd(1377) = -7.0$, indicating a significant crustal

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

contribution. The TDM model age of 2502 Ma corresponds to the time when the 143Nd/144Nd ratio in the sample matched that of the depleted mantle.

Table 1. Rb-Sr and 147Sm-143Nd ID-TIMS isotope systematics of whole-rock and mineral separates from the northern Rybinsk-Panimba Volcanic Belt.

бразец	Порода, минерал	вита/олща	Изотопная истема	озраст [млн лет], d t)	Графическое представление
-517-5	Метавулканит (Wr), диопсид (Di), амфибол Am, плагиоклаз (Pl)	Кординская вита, R	b-Sr	27±17, 0,00089	
			m- d	363±21, d 1363)= 2,6	
				M 2642, d 827) 13,4	
-514-1	Метаморфизованный туф (туфолава?) пикробазальта (Wr), амфибол Am	Панимбинская олща, R	m- d	377±40, d 1377) 7,0	
				M 2502, d 1377)= 7,0	

Примечания: R1 – Нижнерифейская система, 1350–1650 млн лет. IR - Initial Ratio. Wr - порода в целом. T_{DM-1st}, T_{DM-2st} – одностадийный и двухстадийный Nd модельный возраст. CHUR, DM – линии эволюции хондритового и деплетированного модельных резервуаров.

The obtained age data for intraplate volcanism and related rift metamorphism in the Ishimba-Tatar shear zone are consistent with Rb-Sr, 147Sm-144Nd, and U-Pb TIMS and SHRIMP-II zircon geochronology of the Burzyan (R1) and Yurmatan (R2) boundaries in the Southern Urals.

Conclusions:

Geological, petrogeochemical, and Rb-Sr and 147Sm-143Nd geochronological data support stratigraphic correlation between metavolcano-sedimentary sequences of the Cordinsky Suite (Mikhailov site) and picritic-ultramafic-basic metavolcanics of the Panimba Formation (Panimba site).

A key correlation criterion is the presence of a shared basal marker horizon of carbonaceous-mica schists with chloritoid. These overlie contrasting Paleoproterozoic carbonate-terrigenous rocks of the Ryazanov Suite. Differences include color, mineralogy, geochemistry, high alumina content, radioactivity, lack of carbonate, and enrichment in organic C and uranium. In the TAS diagram ($K_2O+Na_2O–SiO_2$), metavolcanic rocks form a trend from picrites and ultramafic-basic picrobasalts at the base of the Panimba Formation to corresponding units in the Mikhailov section.

The metamorphic transformation of protoliths occurred after 1370 Ma, with heterogeneity in both distribution and P-T conditions. The geochemical composition corresponds to ultramafic–basic picrobasalts and basalts. Their uniform stratigraphic position above a distinctive schist horizon enables revision of the previously assumed Neoproterozoic age of the Panimba Formation and aligns it with the Cordinsky Suite within the early Mesoproterozoic. This time boundary is interpreted as marking the breakup of Precambrian complexes along the western Siberian Craton. Similar magmatic and metamorphic events in the 1380–1350 Ma interval are recognized globally.

The established age of rift-related picrite-picrobasalt volcanism and metamorphism correlates with the formation of plagiogranites of the Nemtikhin Complex in the Yenisey Ridge and with the Mashak 1380 Ma global plume magmatism, both associated with extensional tectonic regimes during Nuna supercontinent breakup (Likhanov, 2022).

This research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-20018-П).

1. Kozlov P.S., Likhanov I.I. Geology of the Precambrian Complexes of the Northern Yenisey Ridge. Ekaterinburg: Ural Branch RAS, 2024. 328 p.
2. Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Vershinin A.E. The Tei Polymetamorphic Complex in Transangaria of the Yenisey Ridge – an Example of Combined Facies Zonation of Low- and Medium-Pressure Series // Doklady Akademii Nauk. 2011. Vol. 436. No. 4. P. 509–514.
3. Nozhkin A.D., Borisenko A.S., Nevolko P.A. Stages of Late Proterozoic Magmatism and Age Constraints for Gold Mineralization of the Yenisey Ridge // Geologiya i Geofizika. 2011. Vol. 52. No. 1. P. 158–181.
4. Likhanov I.I. Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisey Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12. No. 11. Article 402.
5. Likhanov I.I., Santosh M. A-type Granites in the Western Margin of the Siberian Craton: Implications for Breakup of the Precambrian Supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research. 2019. Vol. 328. P. 128–145.
6. Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich Metapelites for Thrust Loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // Journal of Metamorphic Geology. 2004. Vol. 22. No. 8. P. 743–762.
7. Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y. The Nature and Models of Metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p.

Дистанционный тектонофизический подход к прогнозу размещения полезных ископаемых (на примере Северной Якутии)

Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О.
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, г. Москва, minaev2403@mail.ru

Перспективы обнаружения новых золоторудных месторождений, в том числе крупных и сверхкрупных, в Якутии оцениваются сегодня очень высоко (Антонов, Гамянин, 2021; Волков, 2016). Основная часть уже известных крупных объектов расположена в юго-восточных секторах региона: это месторождения Дора-Пиль, Таллалах и Малотарынское в Верхоянско-Черском орогенном поясе, а также объекты Нежданинского рудного района, Дыбинского узла и Задержнинское в Южно-Верхоянском поясе. В отличие от этого, северные продолжения данных металлогенических зон Яно-Колымской орогенной области изучены слабо. Там, в северном сегменте Верхоянско-Черского пояса, известно только месторождение Кючус, а в северо-западной части Верхоянского пояса – лишь немногочисленные рудопроявления, среди которых выделяется Дьянди. Ключевой фактор такой неравномерной изученности – крайняя труднодоступность северных территорий для организации полевых работ. В связи с этим, особую роль приобретают дистанционные исследования.

Подавляющая часть золоторудных месторождений и проявлений северо-запада Верхояно-Колымской орогенной области имеет гидротермальный генезис. Как известно, разрывная тектоника контролирует формирование гидротермальных систем (Черезов и др., 1992). Это даёт основания считать разрывную тектонику одним из ведущих рудоконтролирующих факторов в пределах исследуемой территории.

Количество исследований, направленных на изучение каркаса разрывных нарушений Верхояно-Колымской орогенной области, крайне ограничено. Детальный анализ разломной тектоники и складчатых структур мезозойской Верхояно-Колымской системы представлен в работе Г.С. Гусева (Гусев, 1979). Согласно ей, большая часть картированных разломов сформировалась в позднем мезозое.

Предполагается, что благороднометалльное оруденение на исследуемой территории связано с влиянием аккреционно-коллизионных процессов формирования Южно-Анюйской сутуры и Новосибирско-Чукотского орогенного пояса (апт-альбское время) (Прокопьев и др., 2018). Учитывая, что оруденение контролируется разрывными структурами, можно сделать вывод, что окончательный морфологический облик разломы приобрели именно в конце раннего мела (125-105 млн. лет назад).

Подробно методика исследований изложена в работе (Минаев и др., 2024), поэтому ниже отметим только основные наиболее важные этапы. Авторами доклада на основе цифровой модели рельефа выделены линеаменты ручным и автоматическим способами. В целях дополнения известного каркаса разрывных нарушений, в соответствии с методикой, предложенной Д.В. Сивковым с соавторами (Сивков и др., 2020) построены схемы относительных удельных плотностей линеаментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами.

Полученные результаты в комплексе с литературными данными позволили провести тектонофизические реконструкции с использованием модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) для нескольких главных разломов в восточной и западной частях рассматриваемой области. Результаты реконструкций показали, что во всех случаях ось регионального сжатия имела восток-северо-восточную ориентировку (≈65°), что может говорить о единых условиях формирования рассматриваемых разломов и, в целом, соответствует гипотезе о связи их формирования в связи с процессами орогенеза и аккреционно-колизионными событиями формирования Южно-Анюйской сутуры и Новосибирско-Чукотского орогенного пояса.

Результаты реконструкции ориентировки оси главных сжимающих усилий в регионе для каждой из зон динамического влияния разрывных нарушений на предполагаемый период

рудообразования позволили визуализировать сегменты структур, в различной степени предрасположенные к сдвигу, участки концентрации и рассредоточения деформаций. Тенденция к сдвигу (μ) определённого структурного элемента (сегмента) разлома может быть вычислена как отношение сдвиговых (тангенциальных) напряжений к эффективным:

$$\mu = \frac{\tau_n}{\sigma_n}$$

где τ - касательное напряжение на плоскости разрыва, а σ_n - эффективные нормальные напряжения.

При этом наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур обладают $\mu \approx 0{,}6$ (Fuchs, Muller, 2001; Jaeger, Cook, 1979).

В результате сегменты рассматриваемых структур классифицированы от непроницаемых до высокопроницаемых (рис. 1А). За исключением нескольких рудопроявлений, расположенных в низменностях, где отсутствует возможность выделения достоверных линеаментов, все золоторудные объекты гидротермального генезиса расположены в условных зонах влияния структур проницаемых и повышенной проницаемости на апт-альбское время (рис.1Б), что подтверждает наши расчёты.

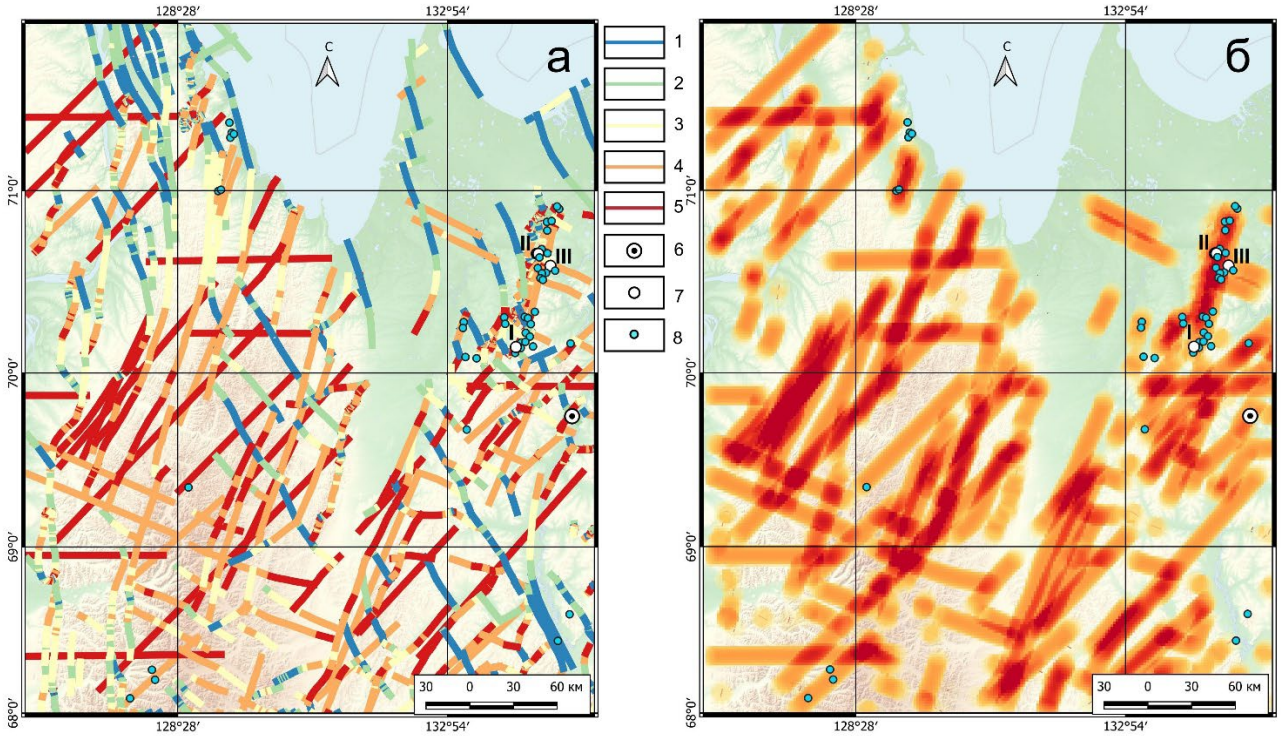


Рис. 1. Результаты реконструкции гидравлической активности сегментов тектонических элементов: А – классифицированные сегменты всей разломной сети Государственной геологической карты и трендов плотностей линеаментов; Б – схема зон влияния (оранжевые линии) сегментов разломов и сегментов трендов плотностей линеаментов проницаемых и повышенной проницаемости. Участки перекрытия зон влияния нескольких разломов окрашены красным. 1 – непроницаемые сегменты; 2 – слабопроницаемые сегменты; 3 – сегменты средней проницаемости; 4 – проницаемые сегменты; 5 – сегменты повышенной проницаемости, 6 – крупное золоторудное месторождение Кючус; 7 – мелкие золоторудные гидротермальные месторождения (I - Мастах; II – Эмись и Емельяновское; III – Кыллах); 8 – золоторудные гидротермальные рудопроявления.

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Для территории северо-западной части Верхояно-Колымской орогенной области проведён комплексный структурно-линеаментный анализ на основе различных

данных и научно-методических подходов, в том числе авторских, к выделению линеаментов с использованием цифровой модели рельефа, включая её разнонаправленную фильтрацию, и применением геоинформационных технологий.

2) На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П.Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры (ориентировки главных осей) регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика главных разломов для исследуемой территории на предполагаемый период рудообразования. Результаты палеореконструкций отвечают конкретным тектоническим событиям, выявленным ранее другими исследователями (Прокопьев и др., 2018).

3) Расчет показателя тенденции к сдвигу (транстенсии) с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые отвечают север-северо-восточным, северо-восточным, субширотным и запад-северо-западным ориентировкам.

4) С точки зрения прогноза размещения золоторудных месторождений, дальнейшие детализирующие работы необходимо сосредоточить на изучении зон влияния гидравлически активных разломов. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве флюидоподводящих в процессе гидротермального рудообразования.

Исследование выполнено в молодёжной лаборатории ИГЕМ РАН «Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований» в рамках темы государственного задания «Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей».

1. Антонов А.Е., Гамянин Г.Н. Месторождения стратегических металлов арктического региона // Золото и технологии. №1(51), 2021. (https://zolteh.ru/regions/sverkhkrupnye_mestorozhdeniya_zolota_rossii_i_uzbekistana_perspektivy_novykh_otkryti/)
2. Волков А.В. Золотое сердце Сибири // Золото и технологии. №2(32), 2016. С.42-48.
3. Гусев Г.С. Складчатые структуры и разломы верхояно-колымской системы мезозоид. Наука, 1979. 208 с.
4. Минаев В. А., Устинов С. А., Петров В. А., Свечеревский А. Д., Нафигин И. О. Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Таймыро-Североземельского орогена и её роли в рудообразовании // Исследование Земли из космоса. – 2024. – № 5. – С. 58-73. – DOI: 10.31857/S0205961424050048
5. Прокопьев А. В., Борисенко А. С., Гамянин Г. Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Трунилина В.А., Васюкова Е.А., Иванов А.И., Травин А.В., Королева О.В., Васильев Д.А., Пономарчук А.В. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика, 2018, Т. 59, № 10, С. 1542-1563. DOI 10.15372/GiG20181004.
6. Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линеаментного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 3-19.
7. Черезов А.М., Широких И.Н, Васьков А.С. Структура и зональность гидротермальных месторождений в разрывных зонах. Новосибирск, Наука. Сибирская издательская фирма, 1992, 104 с.
8. Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. P. 357–371.

9. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.4–368.
10. Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edit. 1979. 593 p.

*Remote Tectonophysical Approach to Forecasting the distribution of Mineral Resources (Case Study: Northern Yakutia)

Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Nafigin I.O.
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS), Moscow, Russia, minaev2403@mail.ru

The potential for discovering new gold deposits—including large and giant ones—in Yakutia is currently considered to be very high (Antonov, Gamyanin, 2021; Volkov, 2016). Most of the known major deposits are concentrated in the southeastern sectors of the region, such as the Dora-Pil, Tallalakh, and Malotarynskoye deposits in the Verkhoyansk-Chersky orogenic belt, as well as the Nezhdaninsky ore district, Dybyinsky knot, and Zaderezhinskoye in the South Verkhoyansk belt. In contrast, the northern extensions of these metallogenic zones within the Yano-Kolyma orogenic province remain poorly explored. Here, in the northern Verkhoyansk-Chersky belt, only the Kyuchus deposit is known, and in the northwestern Verkhoyansk belt, there are only a few known ore occurrences, among which Dyandi stands out. The key reason for this disparity in exploration coverage is the extreme inaccessibility of the northern territories for field investigations. This makes remote sensing methods particularly valuable.

Most of the gold deposits and occurrences in the northwestern Yano-Kolyma orogenic province are of hydrothermal origin. It is well established that fault tectonics play a major role in controlling hydrothermal systems (Cherezov et al., 1992), making faulting one of the primary ore-controlling factors in the study area.

Studies aimed at characterizing the fault framework of the Yano-Kolyma orogenic region are very limited. A detailed analysis of fault and fold structures of the Mesozoic Yano-Kolyma system is presented in the work of G. S. Gusev (Gusev, 1979), who concluded that most mapped faults formed during the Late Mesozoic.

It is presumed that precious metal mineralization in the study area is associated with accretion-collision processes during the formation of the South Anyui suture and the Novosibirsk-Chukotka orogenic belt (Aptian–Albian period) (Prokopev et al., 2018). Since ore mineralization is structurally controlled by faults, it can be inferred that these structures acquired their final morphology during the late Early Cretaceous (125–105 Ma).

The methodology used in this study is described in detail in Minaev et al. (2024); only the most significant stages are briefly outlined here. Based on a digital elevation model (DEM), lineaments were extracted using both manual and automated approaches. To supplement the known fault framework, lineament density maps by azimuthal intervals and trend analysis were generated using the method proposed by D. V. Sivkov and co-authors (Sivkov et al., 2020).

These results, together with published geological data, enabled tectonophysical reconstructions using the P. L. Hancock brittle fault zone model (Hancock, 1985) for several major faults in the eastern and western parts of the study area. The reconstructions show that in all cases, the axis of regional compression was oriented E-NE (~65°), indicating consistent stress conditions during fault formation. This supports the hypothesis that faulting was associated with orogenic and accretion-collision processes related to the development of the South Anyui suture and the Novosibirsk-Chukotka orogenic belt.

By reconstructing the orientation of the principal compressive stress axes within zones of dynamic influence of faults, structural segments with varying susceptibility to shear were identified, as well as areas of strain concentration and dispersion. The shear tendency (μ) of a given fault segment was estimated using:

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

$$\mu = \frac{\tau_n}{\sigma_n}$$

where τ is the shear stress and σ_n is the effective normal stress acting on the fault plane. The most hydraulically active segments typically have μ ≈ 0.6 (Fuchs, Müller, 2001; Jaeger, Cook, 1979).

As a result, the studied fault segments were classified according to permeability—from impermeable to highly permeable (Fig. 1A). With the exception of a few occurrences located in lowlands where reliable lineament mapping is not feasible, all known hydrothermal gold deposits fall within the calculated zones of influence of permeable and highly permeable fault segments for the Aptian–Albian period (Fig. 1B), confirming the accuracy of our model.

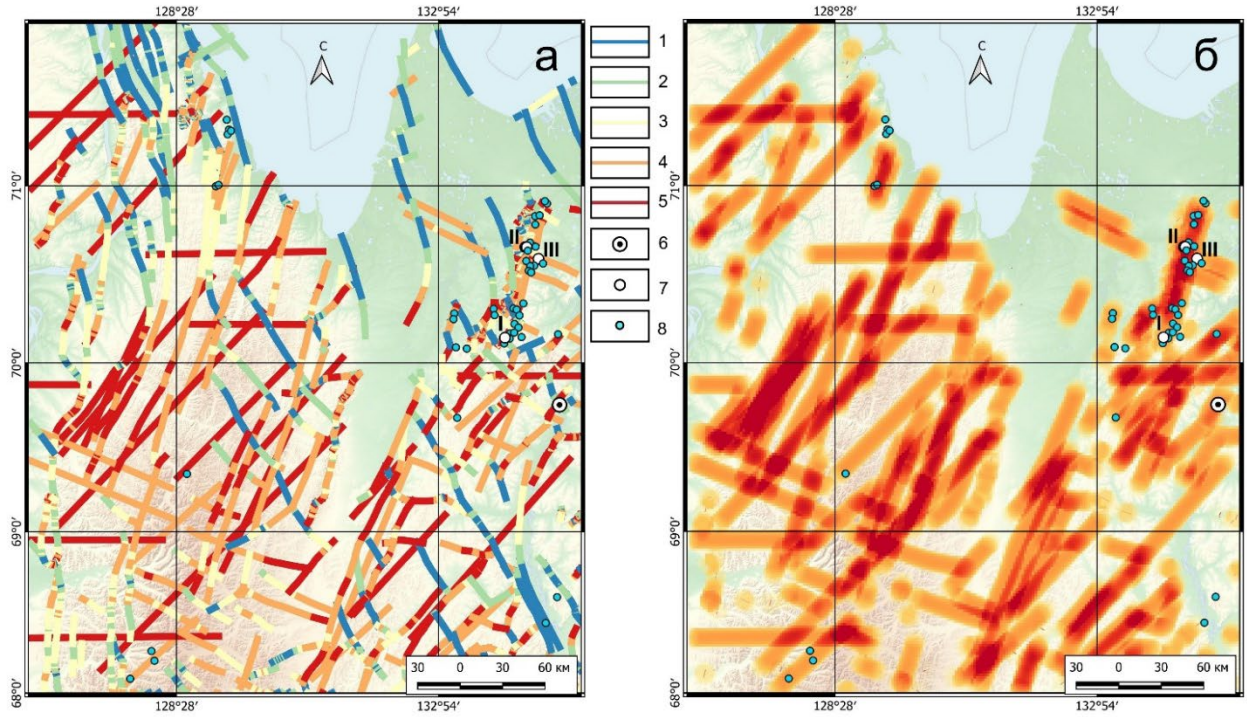


Fig. 1. Results of reconstructed hydraulic activity of tectonic segments: A – Classification of all fault segments from the State Geological Map and lineament density trends; B – Map showing zones of influence (orange lines) of permeable and highly permeable fault segments and lineament trends. Areas of overlap between multiple influence zones are marked in red.

Legend:1 – Impermeable segments; 2 – Low-permeability segments; 3 – Moderately permeable segments; 4 – Permeable segments; 5 – Highly permeable segments; 6 – Major gold deposit: Kyuchus; 7 – Small hydrothermal gold deposits (I – Mastakh; II – Emis and Emelyanovskoye; III – Kyllakh);8 – Hydrothermal gold occurrences

Conclusions:

1. A comprehensive structural and lineament analysis was performed for the northwestern part of the Yano-Kolyma orogenic province using various datasets and methodological approaches, including the authors' own techniques. These involve DEM-based lineament extraction with directional filtering and the use of GIS technologies.

2. Based on the Hancock fault zone model and the identified fault network, orientations of the principal stress axes and the kinematics of major faults during the inferred mineralization period were reconstructed. These paleostress reconstructions align with previously documented tectonic events (Prokopev et al., 2018).

3. Calculation of shear tendency (μ) for individual fault segments, taking into account the regional stress field, allowed identification of the most hydraulically active fault zones. These zones are oriented predominantly N–NE, NE, sublatitudinal, and W–NW.

4. From a predictive standpoint, further detailed exploration should focus on the zones influenced by hydraulically active faults, which likely served as fluid pathways during hydrothermal ore formation.

This research was carried out by the Youth Laboratory of IGEM RAS "Laboratory for Predictive Metallogenic Research" as part of the state assignment project "Application of Modern Methods for Assessment, Exploration, and Prediction of Mineral Deposits, including Strategic Resources, in the Arctic Zone of the Russian Federation to Expand the Mineral Resource Base and Support Transport Infrastructure Development."

1. Antonov A.E., Gamyanin G.N. Strategic Metal Deposits of the Arctic Region // Gold and Technologies. No. 1(51), 2021. [https://zolteh.ru/regions/...]
2. Volkov A.V. The Golden Heart of Siberia // Gold and Technologies. No. 2(32), 2016. pp. 42–48.
3. Gusev G.S. Fold Structures and Faults of the Verkhoyansk-Kolyma System. Nauka, 1979. 208 p.
4. Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Nafigin I.O. Regional Remote Analysis of Fault Tectonics in the Taimyr-Severnaya Zemlya Orogen and its Role in Ore Formation // Earth Research from Space. 2024. No. 5. pp. 58–73. DOI: 10.31857/S0205961424050048
5. Prokopev A.V. et al. Age Constraints and Geodynamic Settings of Deposits and Magmatic Rocks in the Verkhoyansk-Kolyma Fold Belt // Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59, No. 10, pp. 1542–1563. DOI: 10.15372/GiG20181004
6. Sivkov D.V., Chitalin A.F., Dergachev A.L. Application of Lineament Analysis to Predict Gold Mineralization in the Taryn Ore Field, Republic of Sakha (Yakutia) // Earth Research from Space. 2020. No. 1. pp. 3–19.
7. Cherezov A.M., Shirokikh I.N., Vaskov A.S. Structure and Zoning of Hydrothermal Deposits in Fault Zones. Novosibirsk, Nauka, Siberian Publishing House, 1992. 104 p.
8. Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: A Key to Tectonic Processes and Technological Applications // Naturwissenschaften. 2001. No. 88. pp. 357–371.
9. Hancock P.L. Brittle Microtectonics: Principles and Practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7, No. 3/4. pp. 437–457.
10. Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd Edition. 1979. 593 p.

Возраст, состав и условия формирования рудоносных толщ колчеданно-полиметаллического Озерного месторождения (Западное Забайкалье)

Минина О.Р.[1], Викентьев И.В.[2], Дамдинов Б.Б.[3], Бадмажапов Б.Б.[1], Ланцева В.С.[1]
[1]ГИН СО РАН, yaksha@rambler.ru; [2]ИГЕМ РАН, vikentevilya@gmail.com; [3]ЦНИГРИ damdinov@mail.ru

Озерное колчеданно-полиметаллическое месторождение, одно из самых крупных полиметаллических месторождений Евразии, находится в пределах Озернинского бор-барит-железо-медь-золото-свинцово-цинковом рудного узла Еравнинского рудного района Курбино-Еравнинской золото-уран-свинцово-цинковой минерагенической зоны Бурятии (Гордиенко, Нефедьев, 2015 и др.). В палеотектоническом плане этот район рассматривается в составе Удино-Витимской структурно-формационной зоны палеозоид, являющейся одним из краевых сегментов Центрально-Азиатского складчатого пояса в южном обрамлении Сибирского кратона (Беличенко, 1977; Руженцев и др., 2012 и др.). Бóльшую часть территории зоны занимают позднепалеозойские гранитоиды, среди которых вулканогенные и осадочные отложения сохранились в виде изолированных участков. В схеме стратиграфии палеозоя Удино-Витимской зоны до недавнего времени рассматривались три свиты: вулканогенная олдындинская ($Є_1$), терригенная химгильдинская ($Є_{1-2}$) и карбонатно-терригенная исташинская ($Є_3$-O_1) свиты и вулканогенная сурхебтинская толща (Є-О) (Беличенко, 1977 и др.). В результате исследований последних лет было показано, что в строении палеозоид зоны принимают участие как нижнепалеозойские ($Є–O_2$), так и средне- ($D–C_1$) и верхнепалеозойские ($C_2–P_1$) образования (Руженцев и др., 2012; Минина и др., 2023, 2024).

Озерное месторождение было открыто еще в 1963 году, но несмотря на высокую степень изученности, до сих пор остаются дискуссионными генезис, условия локализации, возраст руд, стадийность и РТХ-условия минералообразования. Среди точек зрения на происхождение руд преобладают две: вулканогенно-осадочная и гидротермально-метасоматическая. Большинство, начиная с первых исследователей, традиционно рассматривают Озерное месторождение в качестве типичного гидротермально-осадочного (Тарасова и др., 1972 и др.). Сторонники гидротермально-метасоматического генезиса связывают происхождение Озерного месторождения с эпигенетическими процессами, значительно оторванными от этапа седиментации, все типы руд рассматриваются как разные метасоматические фации единой гидротермальной системы. (Царев, 1978 и др.]. Время формирования месторождения и аналогичных ему проявлений определяется, соответственно, раннекембрийскими или мезозойскими.

Согласно данным предшествующих работ, руды локализованы в вулканогенно-карбонатно-терригенных породах нижнекембрийской олдындинской свиты, которая расчленена на две подсвиты. Нижняя подсвита, преимущественно вулканогенная, верхняя – вулканогенно-осадочная. Руды Озерного месторождения приурочены к озерной пачке верхней подсвиты, мощностью 550 м (Тарасова и др., 1972 и др.). В последние годы, в результате комплексного литологического, биостратиграфического и геохронологического изучения рудоносной озерной пачки, получены новые данные. Пачка представлена чередованием туфов, известковистых, кремнистых и углистых туффитов; слоистых пелитоморфных известняков, известняковых гравелитов, с прослоями и линзами в разной степени оруденелых туфоконглобрекчий и пластами полосчатых колчеданных руд. Новые палеонтологические данные (мшанки, водоросли, миоспоры) свидетельствуют о раннекаменноугольном, турнейском возрасте изученной в стенках карьера части разреза озерной пачки (Минина и др., 2023). Результаты U-Pb-геохронологических исследований детритовых цирконов из оруденелой туфоконглобрекчии этой пачки позволили ограничить нижний предел времени формирования пород как не древнее позднего кембрия. Озерная пачка по строению, составу и возрасту сопоставима с еравнинской серии ($D_3fm_3–C_1v$) (Минина и др., 2023). На водоразделе Ульзутуй–Известковый (около 12 км на северо-восток от Озерного месторождения)

еравнинская серия вмещает колчеданно-полиметаллические руды Ульзутуйского месторождения, считающегося аналогом Озерного месторождения (Минина и др., 2024).

В еравнинскую серию, мощностью более 2400 м, объединены две толщи - ульзутуйская и кыджимитская, выделенные из состава олдындинской свиты и охарактеризованные комплексами органических остатков (конодонты, брахиоподы, криноидеи, тентакулиты, водоросли, мшанки, строматопороидеи, кораллы, миоспоры) (Руженцев и др., 2012 и др.). Ульзутуйская толща ($D_3fm_3–C_1t$) представлена пестроцветными тефротурбидитами, реже известковистыми и алевритовыми турбидитами, представленными чередованием полимиктовых песчаников, туфопесчаников, туфоалевролитов, туфоаргиллитов, известковистых туффитов с маломощными прослоями витрокластических и кристаллокластических туфов. С туфотерригенными породами ассоциируют органогенно-обломочные, биокластовые и микритовые известняки. Для толщи характерно обилие крупных олистолитов (длиной от первых до 150 м, мощностью от 3 до 100 м), а также линз разнообломочных брекчий и конглобрекчий. Олистолиты и изометричные глыбы сложены нижнекембрийскими светлыми известняками с археоциатами и водорослями, андезитами и риолитами (Руженцев и др., 2012 и др.). Для вмещающих олистолиты пород характерны разномасштабные конседиментационные нарушения, обрывки слоев и прослои с нарушением напластования, «плавающие» обломки известняков, песчаников, туфопесчанников и туфоалевролитов, разнообразных туфов. С крупными олистолитами обычно ассоциируют средне-крупноглыбовые, валунные, конглобрекчий. Время накопления ульзутуйской толщи (конодонты, тентакулиты, строматопороидеи, водоросли, мшанки, проптеридофиты, миоспоры) ограничивается поздним фаменом – ранним турне (Минина и др., 2024). Мощность ее от 450 до 900 м. Кыджимитская толща (C_1v) сложена преимущественно сероцветными, зеленовато-серыми тефротурбидитами, представленными ритмоидным чередованием полимиктовых и вулканомиктовых песчаников, алевролитов, туфопесчаников, туфоалевролитов, туфоаргиллитов, туффитов, пепловых туфов, тонкозернистых кислых кристаллотуфов с прослоями и линзами органогенно-обломочных и биокластово-литокластических известняков, состоящих из биокластов и обломков разновозрастной фауны (археоциаты, трилобиты, хиолиты, конодонты, бахиоподы и др.). Содержит субвулканические тела и прослои вулканитов, представленных умеренно- и высококалиевыми базальтами, андезитами, дацитами и риолитами. Мощность толщи не менее 1500 м. Кыджимитская толща датирована ранним карбоном, визейским веком (мшанки, брахиоподы, водоросли, миоспоры) (Минина и др., 2024).

Еравнинская серия представлена комплексом фаций углубляющегося шельфа, склоновых с олистостромами и фациями подводных конусов выноса дистальной зоны вулканизма. Ведущими литологическими типами пород серии являются тефротурбидиты различного гранулометрического состава, формирование которых происходило в углубляющемся бассейне при активизации эксплозивной и вулканической деятельности в относительной близости к центрам извержений. В латеральном направлении наблюдается быстрая и четкая смена фаций: шельфовые, склоновые с комплексами грубообломочных микстит-олистостромовых образований, далее более глубоководные (тонкослоистые). С потоками обломочного материала на границе шельфа переносились органические остатки, экзотические обломки, валуны и крупные глыбы, содержащие разновозрастную фауну (Є, O, D_{1-2}). При этом отмечался высокий уровень терригенного сноса, отразившийся в формировании отложений значительной с мощности. Вулканогенные породы еравнинской серии (лавовые, кластолавовые и пирокластические фации) связаны с подводными излияниями и эксплозиями. Среди эффузивных фаций выделяются дациты, риолиты, слагающие лавовые покровы среди туфотерригенных пород еравнинской серии, и представляющие собой, скорее всего, подводные части склона вулканического конуса. Андезибазальты, базальты встречаются реже и отнесены к лавовым фациям потоков склона вулканического конуса. Пирокластические фации включают туфы андезитового, андезито-дацитового, дацитового и смешанного составов. Они близки к туфовым фациям удаленной и

промежуточной зон подводного вулканизма. Их накопление происходило в морских условиях, что подтверждается хорошей сортировкой кластического материала в тонкообломочных и псаммитовых туфах, слоистыми текстурами, присутствием в туфах обломков известняков, выдержанностью по простиранию.

Особенности пород свидетельствуют о том, что еравнинская серия формировалась в морских условиях открытого углубляющегося бассейна, примыкающего к зоне вулканизма. Вулканиты еравнинской серии и прорывающие их монцониты (, имеющие надсубдукционные характеристики, ассоциация вулканитов с тефротурбидитами, а также металлогеническая специализация (Cu и Zn) пород, свидетельствуют о формировании их в надсубдукционной обстановке активной континентальной окраины на границе Сибирского континента и Монголо-Охотского океана (Руженцев и др., 2012; Минина и др., 2024). Рудная минерализация была связана с процессами осадконакопления и вулканической деятельностью в позднем девоне – раннем карбоне. Подтверждением этому также может служить отсутствие рудной минерализации в олистолитах нижнекембрийских эффузивов и биогермных известняков (Минина и др., 2023). В рудообразовании значительное участие принимали эпигенетические гидротермально-метасоматические процессы (Викентьев и др., 2023). Мы полагаем, что на Озерном месторождении последовательно реализованы две модели – гидротермально-осадочная и метасоматическая, когда первичные гидротермально-осадочные руды были переотложены более поздними гидротермальными растворами. Перекристаллизация руд относится к более позднему метаморфическому этапу (Дамдинова и др., 2024). Таким образом, по нашим данным, формирование колчеданно-полиметаллических руд Озерного месторождения было связано с процессами осадконакопления и вулканической деятельности в позднедевонско-раннекаменноугольное время, с последующей регенерацией сингенетических сульфидных скоплений гидротермальными растворами и метаморфическим преобразованием руд.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского научного Фонда № 22-27-20141 и № 22-17-00069

1. Беличенко В.Г. Каледониды Байкальской горной области. Новосибирск: Наука, 1977. 134 с.
2. Викентьев И.В., Дамдинов Б.Б., Минина О.Р. Спирина А.В., Дамдинова Л.Б. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS–SEDEX–MV-тип – пример гигантского Озерного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений. 2023. Том 65. № 3. С. 201–236.
3. Гордиенко И.В., Нефедьев М.А. Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2015. Том 57. № 2. С. 114–124.
4. Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б., Викентьев И.В., Реутский В.Н. Условия перекристаллизации руд Озерного полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2024. Том 66. № 2. С. 178-190.
5. Минина О.Р., Гордиенко И.В., Дамдинов Б.Б, Ташлыков В.С., Гонегер Т.А., Скрипников М.С., Ланцева В.С., Хубанов В.Б., Кислов Е.В. Новые данные о возрасте рудовмещающих отложений Озерного полиметаллического месторождения // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 3. С. 1–16.
6. Минина О.Р., Ланцева В.С., Соболев И.Д., Викентьев И.В. Состав, возраст и обстановки седиментации рудовмещающей еравнинской серии Удино-Витимской зоны (Западное Забайкалье, Россия) // Литология и полезные ископаемые. 2024. № 1. С. 27–46.
7. Руженцев С.В., Минина О. Р., Некрасов Г. Е. Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. 2012. № 2. С. 3–28.
8. Тарасова Р.С., Близнюк М.В., Бабкин И.Н. О формационном типе н генезисе Озерного

свинцово-цинкового колчеданного месторождения // Геология и генезис эндогенных рудных формаций Сибири. М.: Наука, 1972.
9. Царев Д.И. Генезис Озерного колчеданно-цинкового месторождения в Забайкалье // Изв. АН СССР. 1983. С. 97-107.

*Age, Composition, and Formation Conditions of Ore-Bearing strata of the pyrite-polymetallic Ozernoe Deposit (Western Transbaikalia)

Minina O.R.[1], Vikentyev I.V.[2], Damdinov B.B.[3], Badmazhapov B.B.[1], Lantseva V.S.[1]
[1]GIN SB RAS, yaksha@rambler.ru; [2]IGEM RAS, vikentevilya@gmail.com; [3]TsNIGRI, damdinov@mail.ru

The Ozernoe pyrite-polymetallic deposit, one of the largest polymetallic deposits in Eurasia, is located within the Ozerninsky boron-barite–iron–copper–gold–lead–zinc ore cluster of the Eravninsky metallogenic district, part of the Kurbino-Eravninsky gold–uranium–lead–zinc metallogenic zone in Buryatia (Gordienko, Nefedyev, 2015, and others). In terms of paleotectonics, this region is considered part of the Udino-Vitim structural–formational zone of the Paleozoides, which represents a marginal segment of the Central Asian Fold Belt at the southern periphery of the Siberian Craton (Belichenko, 1977; Ruzhentsev et al., 2012, and others). Most of the territory is occupied by Late Paleozoic granitoids, with volcanogenic and sedimentary deposits preserved only in isolated blocks.

Previously, the Paleozoic stratigraphy of the Udino-Vitim zone included three formations: the volcanogenic Oldyndin Formation ($Є_1$), the terrigenous Khimgildin Formation ($Є_{1–2}$), and the carbonate–terrigenous Istashinsk Formation ($Є_3–O_1$), along with the volcanogenic Surkhebtin Suite ($Є–O$) (Belichenko, 1977 et al.). Recent studies, however, have demonstrated that the Paleozoides of the zone include not only Lower Paleozoic ($Є–O_2$) but also Middle ($D–C_1$) and Upper Paleozoic ($C_2–P_1$) units (Ruzhentsev et al., 2012; Minina et al., 2023, 2024).

The Ozernoe deposit was discovered as early as 1963. However, despite its high degree of exploration, questions remain regarding its genesis, localization conditions, ore age, stage development, and P–T–X conditions of mineral formation. Two dominant models are currently debated for the origin of the ores: a volcanogenic-sedimentary model and a hydrothermal–metasomatic model. Since its discovery, most researchers have traditionally regarded the Ozernoe deposit as a typical hydrothermal–sedimentary system (Tarasova et al., 1972, and others). Proponents of the hydrothermal–metasomatic model attribute the deposit's genesis to epigenetic processes significantly removed from the sedimentation stage, interpreting all ore types as distinct metasomatic facies within a unified hydrothermal system (Tsarev, 1978, and others). Accordingly, the formation age of the deposit and its analogues is interpreted as either Early Cambrian or Mesozoic.

According to previous studies, the ores are hosted in the volcanogenic–carbonate–terrigenous rocks of the Lower Cambrian Oldyndin Formation, which is subdivided into two subformations. The lower subformation, predominantly volcanogenic, is represented by the Gurvunur Member at the Ozernoe deposit, while the upper subformation consists of the volcanogenic–sedimentary Ozernaya Member. The ores of the Ozernoe deposit are confined to the Ozernaya Member (thickness ~550 m) (Tarasova et al., 1972, and others). In recent years, comprehensive lithological, biostratigraphic, and geochronological studies of the ore-bearing Ozernaya Member have yielded new data. The Ozernaya Member comprises alternating layers of tuffs, calcareous, siliceous, and carbonaceous tuffites; laminated pelitomorphic limestones, limestone gravellites, interbeds and lenses of variably mineralized tuff-conglomeratic breccias, and layers of banded pyrite ores. New paleontological findings (bryozoans, algae, miospores) indicate that the studied section of the Ozernaya Member is of Early Carboniferous (Tournaisian) age (Minina et al., 2023). U–Pb geochronological analysis of detrital zircons from the mineralized tuff-conglomeratic breccia constrains the maximum depositional age to no older than Late Cambrian. The Ozernaya member is comparable in structure, composition and age to the Eravninskaya series ($D_3fm_3–C_1v$) (Minina et al., 2023). On the Ulzutuy–Izvestkovy watershed (about 12 km northeast of the Ozernoye deposit), the Eravninskaya series contains pyrite-

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

polymetallic ores of the Ulzutuyskoye deposit, which is considered an analogue of the Ozernoye deposit (Minina et al., 2024).

The Eravninskaya series, with a thickness of more than 2400 m, combines two strata - Ulzutuyskaya and Kydzhimitskaya, separated from the Oldynda suite and characterized by complexes of organic remains (conodonts, brachiopods, crinoids, tentaculites, algae, bryozoans, stromatoporoids, corals, miospores) (Ruzhentsev et al., 2012; etc.). The Ulzutuyskaya strata (D_3fm_3–C_1t) is represented by variegated tephroturbidites, less often calcareous and silty turbidites, represented by alternation of polymictic sandstones, tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones, tuffaceous mudstones, calcareous tuffites with thin interlayers of vitroclastic and crystalloclastic tuffs. Organogenic-clastic, bioclastic and micritic limestones are associated with tuff-terrigenous rocks. The strata is characterized by an abundance of large olistolites (from a few to 150 m in length, from 3 to 100 m in thickness), as well as lenses of multi-clastic breccias and conglobreccias. Olistolites and isometric blocks are composed of Lower Cambrian light limestones with archaeocyaths and algae, andesites and rhyolites (Ruzhentsev et al., 2012, etc.). The rocks hosting the olistolites are characterized by different-scale synsedimentary disturbances, fragments of layers and interlayers with disturbances of bedding, “floating” fragments of limestones, sandstones, tuffaceous sandstones and tuffaceous siltstones, and various tuffs. Medium-large block, boulder, and conglobreccia are usually associated with large olistoliths. The accumulation time of the Ulzutuyskaya strata (conodonts, tentaculites, stromatoporoids, algae, bryozoans, propteridophytes, miospores) is constrained to the late Famennian – early Tournaisian (Minina et al., 2024). Its thickness is from 450 to 900 m.

The Kydzhimit Formation (C_1v) consists of rhythmic alternations of predominantly gray to greenish-gray polymictic and volcanomictic sandstones, siltstones, tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones, tuffaceous argillites, tuffites, ash tuffs, and fine-grained acidic crystal tuffs. These are interbedded with lenses and layers of pelitomorphic, organogenic–detrital, and bioclastic–lithoclastic limestones composed of bioclasts and fragments of fossil fauna of various ages (archaeocyaths, trilobites, hyoliths, conodonts, brachiopods, etc.). The formation also contains subvolcanic bodies and interbeds of volcanics represented by moderately and high-potassium basalts, andesites, dacites, and rhyolites. Its total thickness exceeds 1500 m. The Kydzhimit Formation is dated to the Early Carboniferous (Visean) based on the presence of bryozoans, brachiopods, algae, and miospores (Minina et al., 2024).

It has been established that the Eravninskaya Series represents a facies complex of a deepening shelf, slope environments with olistostromes, and submarine fan deposits in a distal volcanic setting. The dominant lithological types are tephroturbidites of varying grain size, formed in a deepening basin under intensified explosive and volcanic activity in relative proximity to eruption centers. Facies transitions are rapid and well defined laterally, from shelf to slope zones with coarse-grained olistostromal deposits, and further into deeper-water (thin-bedded) environments. Organic remains, exotic fragments, boulders and large blocks containing fauna of different ages (Є, O, $D_{1\text{-}2}$) were transported with flows of detrital material at the boundary of the shelf. At the same time, a high level of terrigenous demolition was noted, reflected in the formation of deposits of significant thickness.

Volcanic rocks of the Eravninskaya Series (lava, clastolava, and pyroclastic facies) are associated with submarine eruptions and explosive events. Among the effusive facies, dacites and rhyolites stand out, forming lava covers among the tuff-terrigenous rocks of the Eravninskaya series and most likely representing underwater parts of the slope of a volcanic cone. Basaltic andesites and basalts are less common and are classified as lava facies of flows of the slope of a volcanic cone. Pyroclastic facies include tuffs of andesite, andesite-dacite, dacite and mixed compositions. They are close to the tuff facies of the remote and intermediate zones of underwater volcanism. Their accumulation took place in marine conditions, which is confirmed by the good sorting of clastic material in fine-grained and psammitic tuffs, layered textures, the presence of limestone fragments in the tuffs, and consistency along the strike.

The characteristics of the rocks indicate that the Eravninskaya series was formed in marine conditions of an open, deepening basin adjacent to a volcanic zone. The volcanic rocks of the

Eravninskaya series and the monzonites that intrude them (having suprasubduction characteristics, the association of volcanics with tephroturbidites, as well as the metallogenic specialization (Cu and Zn) of the rocks, indicate their formation in a suprasubduction environment of the active continental margin at the boundary of the Siberian continent and the Mongolian-Okhotsk Ocean (Ruzhentsev et al., 2012; Minina et al., 2024). Ore mineralization was associated with sedimentation processes and volcanic activity in the Late Devonian - Early Carboniferous. This can also be confirmed by the absence of ore mineralization in the olistoliths of Lower Cambrian effusive rocks and biohermal limestones (Minina et al., 2023). Epigenetic hydrothermal-metasomatic processes played a significant role in ore formation (Vikentyev et al., 2023). We believe that two models were consistently implemented at the Ozernoye deposit: hydrothermal-sedimentary and metasomatic, when the primary hydrothermal-sedimentary ores were redeposited by later hydrothermal solutions. Recrystallization of the ores refers to a later metamorphic stage (Damdinova et al., 2024). Thus, according to our data, the formation of pyrite-polymetallic ores of the Ozernoye deposit was associated with sedimentation processes and volcanic activity in the Late Devonian-Early Carboniferous period, with subsequent regeneration of syngenetic sulfide accumulations by hydrothermal solutions and metamorphic transformation of ores.

This research was supported by the Russian Science Foundation (projects No. 22-27-20141 and No. 22-17-00069).

1. Belichenko V.G. Caledonides of the Baikal Mountain Region. Novosibirsk: Nauka, 1977. 134 p.
2. Vikentyev I.V., Damdinov B.B., Minina O.R., Spirina A.V., Damdinova L.B. Classification of Polymetallic Ore-Forming Processes and the Transitional VMS–SEDEX–MV Type: A Case Study of the Giant Ozernoe Deposit in Transbaikalia, Russia. // Geology of Ore Deposits. 2023. Vol. 65. No. 3. P. 201–236.
3. Gordienko I.V., Nefedyev M.A. Kurbino–Eravninsky Ore District of Western Transbaikalia: Geological–Geophysical Structure, Ore Deposit Types, Resource Potential, and Development Prospects. // Geology of Ore Deposits. 2015. Vol. 57. No. 2. P. 114–124.
4. Damdinova L.B., Damdinov B.B., Vikentyev I.V., Reutskiy V.N. Conditions of Ore Recrystallization at the Ozernoe Polymetallic Deposit (Western Transbaikalia, Russia). // Geology of Ore Deposits. 2024. Vol. 66. No. 2. P. 178–190.
5. Minina O.R., Gordienko I.V., Damdinov B.B., Tashlykov V.S., Goneger T.A., Skripnikov M.S., Lantseva V.S., Khubanov V.B., Kislov E.V. New Data on the Age of Ore-Hosting Deposits of the Ozernoe Polymetallic Deposit. // Lithology and Mineral Resources. 2023. No. 3. P. 1–16.
6. Minina O.R., Lantseva V.S., Sobolev I.D., Vikentyev I.V. Composition, Age, and Sedimentary Environment of the Ore-Hosting Eravninskaya Series of the Udino–Vitim Zone (Western Transbaikalia, Russia). // Lithology and Mineral Resources. 2024. No. 1. P. 27–46.
7. Ruzhentsev S.V., Minina O.R., Nekrasov G.E., Aristov V.A., Golionko B.G., Doronina N.A., Lykhin D.A. Baikal–Vitim Fold System: Structure and Geodynamic Evolution. // Geotectonics. 2012. No. 2. P. 3–28.
8. Tarasova R.S., Bliznyuk M.V., Babkin I.N. On the formation type and genesis of the Ozernoye lead-zinc pyrite deposit. // Geology and Genesis of Endogenous Ore Formations of Siberia. Moscow: Nauka, 1972.
9. Tsarev D.I. Genesis of the Ozernoye pyrite-zinc deposit in Transbaikalia. // Bulletin of the USSR Academy of Sciences. 1983. P. 97–107.

Анализ спутниковых данных ДЗЗ для прогноза полиметаллической минерализации в пределах Савва-Борзинского рудного узла (юго-восточное Забайкалье)

Нафигин И.О., Лапаев Д.С., Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А.
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН), г. Москва, estera-st@mail.ru

Подходы к поискам и прогнозу твердых полезных ископаемых требуют повышения эффективности и снижения затрат на ранних стадиях геологоразведочного процесса. Особенно актуально это в труднодоступных и слабоизученных районах, где проведение традиционных полевых работ сопряжено с логистическими и экономическими трудностями. Одним из перспективных направлений решения этой задачи является применение методов анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Ишмухаметова и др., 2023).

Спутниковые данные позволяют получать масштабную, многоспектральную и мультивременную информацию о земной поверхности, которая может быть использована для выявления косвенных признаков минерализации. Использование спектральных методов обработки и пространственного анализа даёт возможность выявлять зоны гидротермальных изменений, пространственно и генетически связанных с рудными телами (Chen Q et al., 2022).

Целью настоящего исследования является создание прогнозно-поисковой модели полиметаллической минерализации в пределах Савва-Борзинского рудного узла с использованием комплекса мультивременных и мультисенсорных данных спутникового ДЗЗ. В рамках работы ставится задача обоснованного применения методов спектрального анализа и нечеткой логики для построения модели, отражающей благоприятные условия локализации минерализации и позволяющей выделять приоритетные участки для последующих полевых исследований (Нафигин и др., 2023).

Савва-Борзинский рудный узел, входящий в структуру Приаргунской структурно-формационной зоны, расположен на территории юго-восточного Забайкалья и представляет собой область с высоким потенциалом обнаружения полиметаллической и золото-серебряной минерализации. Геологическое строение узла определяется чехлом вулканогенно-осадочных толщ верхнепротерозойско-нижнекембрийского возраста, представленных чередованием туфов, алевролитов, песчаников, кремнистых сланцев, известняков и доломитов, а также интрузивами основного и кислого состава. Район характеризуется выраженной тектонической зональностью: субмеридиональные и субширотные разломы выполняют роль рудоконтролирующих структур (Назаров и др., 2017; Калашников и др., 2019).

Минерализация преимущественно связана с зонами метасоматических изменений (серицитизация, хлоритизация, карбонатизация) и приурочена к областям интенсивной тектонической нарушенности (катаклазированых и милонизированных пород). Ранее выявленные объекты полиметаллической и золоторудной специализации (рудопроявления Владимирское, Харганатуйское, Савва-Борзинское и др.) демонстрируют генетическую связь с зонами мощной тектонической переработки, что обуславливает необходимость их комплексного дистанционного картирования.

По результатам геологоразведочных работ 2017–2019 гг. (Назаров и др., 2017; Калашников и др., 2019) в пределах узла выделен ряд аномальных участков, на которых выявлены признаки перспективности золото-полиметаллической минерализации. Однако детальные исследования многих из них затруднены труднодоступностью территории, а также высокой фрагментированностью полевых данных. Это предопределяет целесообразность применения дистанционных методов анализа, позволяющих систематизировать разнородные геоданные и формировать целостные прогнозные схемы для обоснования перспективных участков.

В качестве исходных данных использовались безоблачные сцены, полученные с космических аппаратов ДЗЗ Landsat-8/OLI (LC08 L1TP 124025 20171021 20171106 01 T1) на 21 октября 2017 года, Sentinel-2/MSI (S2B MSIL2A 20201024T030809 N0214 R075 T50UNB

20201024T055737) на 24 октября 2020 года и Terra/ASTER (AST L1T 03109132006031351 20230414093609 20364) на 13 сентября 2006 года.

Предобработка включала crosstalk-коррекцию для ASTER (устранение перекрёстных искажений в SWIR и TIR-диапазонах) (Maghsoudi Moud et al, 2021), радиометрическую и атмосферную коррекцию по методу FLAASH с использованием моделей MODTRAN (Servera et al., 2022), а также топографическую коррекцию методом SCS+C с применением ЦМР FABDEM (Ma et al., 2021). Растительность и водные объекты маскировались на основе вычисления индексов NDVI и NDWI (Huang et al., 2021). Эти этапы обеспечили физически корректные спектральные характеристики, необходимые для последующего анализа ДЗЗ.

Для выделения зон, связанных с гидротермально-метасоматической минерализацией, использовался спектральный анализ с применением методов: отношения каналов (BR) (Wambo et al., 2020); относительной глубины полосы поглощения (RBD) (Masoumi et al., 2021); главных компонент (PCA) (Greenacre et al., 2022) и его селективной модификации — SPCA, также известной как CROSTA-технология (Frutuoso et al., 2021).

Обработка спутниковых данных позволила выделить тематические слои, отражающие пространственное распределение зон гидротермальных изменений, а также участков, характеризующихся повышенным содержанием оксидов железа и спектральными признаками глинистых минералов. Выделенные аномалии показали устойчивую корреляцию с известными рудными объектами, литологическими разновидностями пород и зонами тектонических нарушений.

На заключительном этапе, с целью создания прогнозно-поисковой модели, выбирались наиболее релевантные тематические слои и интегрировались в единую прогнозную схему на основе нечеткой логики (Khan et al., 2022). В рамках прогнозно-поисковых задач такой подход широко зарекомендовал себя для построения схем интенсивности проявления признаков рудной минерализации (Нафигин и др., 2023).

Полученная модель позволила выявить несколько локальных участков с комплексом благоприятных геологических признаков. Эти участки характеризуются повышенными значением интенсивности совокупности тематических слоев (индикаторов) локализации минерализации. Кроме того, идентифицирован ряд ранее не отмеченных аномалий, расположенных вблизи контактных зон интрузивных тел и вдоль зон глубинных разломов.

Предложенный подход обеспечивает существенное сокращение объёмов наземных работ на этапе региональных исследований и позволяет более точно планировать детальные поисковые работы. Он также может быть эффективно использован в других слабоизученных регионах с аналогичными климатическими и геоморфологическими условиями, где затруднено проведение полевых работ и ограничен объём полученной в результате разноплановых наземных съёмок геологической информации.

Проведённые исследования подтверждают эффективность мультивременного и мультисенсорного анализа спутниковых данных ДЗЗ в сочетании с методами спектральной обработки и нечеткой логики для решения прогнозно-поисковых задач в пределах Савва-Борзинского рудного узла. Разработанная прогнозная модель продемонстрировала высокую степень корреляции выявленных аномальных зон с размещением известных рудных объектов и закартированных областей гидротермально-метасоматических преобразований вмещающих пород, а также позволила выявить ранее не установленные участки, обладающие спектральными признаками потенциальной рудоносности.

Предложенный подход может быть успешно применён в слабоизученных и труднодоступных регионах с разреженным растительным покровом и сложной геоморфологией. Он способствует повышению информативности дистанционных данных, снижению объёмов и повышению эффективности дорогостоящих полевых геологоразведочных работ. Методика обладает потенциалом масштабирования и адаптации для других территорий с сопоставимыми природно-географическими условиями.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Ишмухаметова В. Т., Нафигин И. О., Устинов С. А., Лапаев Д. С., Минаев В. А., Петров В. А. Выявление зон гидротермально-измененных пород с использованием данных WorldView-2 на участке Талман (Талманская площадь, юго-восточное Забайкалье, Россия) // Исследования Земли из космоса. 2023. №. 5. С. 58-70, DOI: 10.31857/S0205961423040048.
2. Калашников В.А. Отчет о результатах работ по объекту № 640-54. Поисковые работы с на золото-полиметаллическое оруденение в пределах Савва-Борзинского рудного узла (Забайкальский край). — М.: АО «Росгео», 2019. Книга 1. 239 с.
3. Назаров А.А. Отчет о результатах работ по объекту № 630-17 (111-23). Поисковые работы с оценкой перспектив золото-полиметаллического оруденения основных рудных районов и узлов Приаргунской структурно-формационной зоны (Забайкальский край). — М.: АО «Росгео», 2017. Книга 1. 262 с.
4. Нафигин И.О., Ишмухаметова В.Т., Устинов С.А., Минаев В.А., Петров В.В. Оценка пригодности территорий для проведения детального геолого-минералогического картирования на основе статистических методов обработки данных дистанционного зондирования КА Landsat-8: на примере Юго-Восточного Забайкалья, Россия // Исследования Земли из космоса. 2023. №. 2. С. 61-83, DOI: 10.31857/S0205961423010086.
5. Chen Q., Zhao Z., Zhou J., Zhu R., Xia J., Sun T., Zhao X., Chao J. ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China // Remote Sensing. 2022. vol. 14. no. 5. pp. 1253, DOI: 10.3390/rs14051253.
6. Frutuoso R., Lima A., Teodoro A. C. Application of remote sensing data in gold exploration: targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal // Arabian Journal of Geosciences. 2021. vol. 14. Application of remote sensing data in gold exploration. no. 6. pp. 459, DOI: 10.1007/s12517-021-06786-0.
7. Greenacre M., Groenen P., Hastie T., Iodice D'Enza A., Markos A., Tuzhilina E. Principal component analysis // Nature Reviews Methods Primers. 2022. vol. 2. pp. 100, DOI: 10.1038/s43586-022-00184-w.
8. Huang S., Tang L., Hupy J. P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing // Journal of Forestry Research. 2021. vol. 32. no. 1. pp. 1-6, DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
9. Khan M. J., Kumam W., Alreshidi N. A. Divergence measures for circular intuitionistic fuzzy sets and their applications // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2022. vol. 116. pp. 105455, DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105455.
10. Ma Y., He T., Li A., Li S. Evaluation and Intercomparison of Topographic Correction Methods Based on Landsat Images and Simulated Data // Remote Sensing. 2021. vol. 13. no. 20. pp. 4120, DOI: 10.3390/rs13204120.
11. Maghsoudi Moud F., Van Ruitenbeek F., Hewson R., Van Der Meijde M. An Approach to Accuracy Assessment of ASTER Derived Mineral Maps // Remote Sensing. 2021. vol. 13. no. 13. pp. 2499, DOI: 10.3390/rs13132499.
12. Masoumi M., Honarmand M., Salimi A. Integration of concentration-area fractal model and relative absorption band depth method for mapping hydrothermal alterations using ASTER data // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2021. vol. 23. pp. 100519, DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100519.
13. Servera V. J., Rivera-Caicedo J. P., Verrelst J., Munoz-Mari J., Sabater N., Berthelot B., Camps-Valls G., Moreno J. Systematic Assessment of MODTRAN Emulators for Atmospheric Correction // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. vol. 60. pp. 1-17, DOI: 10.1109/TGRS.2021.3071376.
14. Wambo T. J. D., Pour A. B., Ganno S., Asimow P. D., Zoheir B., Salles R. D. R., Nzenti J. P., Pradhan B., Muslim A. M. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon // Ore Geology Reviews. 2020. vol. 122. pp. 1-26, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103530.

*Analysis of remote sensing satellite data for forecasting polymetallic mineralization within the Savva-Borzinsky ore cluster (southeastern Transbaikalia)

Nafigin I.O., Lapaev D.S., Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A.
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS),
estera-st@mail.ru

Modern approaches to the exploration and forecasting of solid mineral deposits require enhanced efficiency and reduced costs, especially at the early stages of the geological survey process. This is particularly relevant in remote and poorly studied regions, where traditional fieldwork is limited by logistical and economic constraints. One promising solution to this problem is the application of Earth Remote Sensing (RS) data analysis methods (Ishmukhametova et al., 2023).

Satellite data provide large-scale, multispectral, and multitemporal information on the Earth's surface, which can be used to detect indirect signs of mineralization. Spectral processing methods and spatial analysis allow for the identification of hydrothermal alteration zones that are spatially and genetically associated with ore bodies (Chen Q et al., 2022).

The aim of this study is to develop a predictive exploration model for polymetallic mineralization within the Savva-Borzinsky ore cluster using a complex of multitemporal and multisensor RS datasets. The task involves the reasoned application of spectral analysis methods and fuzzy logic to construct a model reflecting favorable mineralization conditions and to identify priority sites for follow-up field investigations (Nafigin et al., 2023).

The Savva-Borzinsky ore cluster, located within the Priargunsk structural-formational zone of southeastern Transbaikalia, is considered highly prospective for polymetallic and gold-silver mineralization. Its geological structure is defined by a cover of Upper Proterozoic–Lower Cambrian volcano-sedimentary sequences, represented by alternating tuffs, siltstones, sandstones, siliceous shales, limestones, and dolomites, as well as mafic and felsic intrusive bodies. The area exhibits pronounced tectonic zoning, with submeridional and sublatitudinal faults playing a key ore-controlling role (Nazarov et al., 2017; Kalashnikov et al., 2019).

The mineralization is primarily associated with zones of metasomatic alteration (sericitization, chloritization, carbonatization) and occurs in areas of intense tectonic deformation (cataclastic and mylonitic rocks). Previously discovered polymetallic and gold-bearing objects (e.g., Vladimirovskoe, Kharganatui, Savva-Borzinskoe occurrences) show genetic links to zones of strong tectonic reworking, underscoring the need for their integrated remote mapping.

According to the results of geological surveys conducted in 2017–2019 (Nazarov et al., 2017; Kalashnikov et al., 2019), several anomalous zones were delineated within the cluster, indicating prospects for gold-polymetallic mineralization. However, detailed investigations have been hampered by the area's inaccessibility and the fragmented nature of field data. This highlights the importance of remote sensing methods, which allow for the systematization of heterogeneous geodata and the development of coherent predictive frameworks to justify further exploration efforts.

The input datasets included cloud-free scenes from the following satellite platforms: Landsat-8/OLI (LC08 L1TP 124025 20171021 20171106 01 T1), acquired on October 21, 2017; Sentinel-2/MSI (S2B MSIL2A 20201024T030809 N0214 R075 T50UNB 20201024T055737), acquired on October 24, 2020; Terra/ASTER (AST L1T 03109132006031351 20230414093609 20364), acquired on September 13, 2006.

Preprocessing included crosstalk correction for ASTER (to remove SWIR and TIR artifacts) (Maghsoudi Moud et al., 2021), radiometric and atmospheric correction using the FLAASH method with MODTRAN models (Servera et al., 2022), and topographic correction using the SCS+C method with the FABDEM digital elevation model (Ma et al., 2021). Vegetation and water bodies were

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

masked based on NDVI and NDWI index calculations (Huang et al., 2021). These steps ensured physically consistent spectral characteristics required for subsequent analysis.

To identify zones associated with hydrothermal–metasomatic mineralization, spectral analysis was applied using the following methods: Band Ratio (BR) (Wambo et al., 2020); Relative Band Depth (RBD) (Masoumi et al., 2021); Principal Component Analysis (PCA) (Greenacre et al., 2022); Selective PCA, also known as the CROSTA technique (Frutuoso et al., 2021).

The processing of satellite data resulted in thematic layers reflecting the spatial distribution of hydrothermal alteration zones, areas enriched in iron oxides, and those with spectral signatures of clay minerals. The identified anomalies showed strong correlation with known ore occurrences, specific lithological units, and fault zones.

At the final stage, the most relevant thematic layers were integrated into a unified predictive model using fuzzy logic (Khan et al., 2022). This approach has proven effective in exploration for generating intensity maps of ore mineralization indicators (Nafigin et al., 2023).

The resulting model revealed several local zones characterized by a favorable set of geological indicators. These sites exhibit elevated cumulative intensities of thematic layers (indicators) associated with mineralization. Additionally, a number of previously unknown anomalies were identified near intrusive contact zones and along deep fault systems.

The proposed methodology significantly reduces the need for ground-based work during regional surveys and enables more targeted planning of detailed exploration. It can also be applied effectively in other underexplored regions with similar climatic and geomorphological challenges, where field operations are limited and existing geological data are sparse.

The results of this study confirm the effectiveness of multitemporal and multisensor remote sensing analysis in combination with spectral methods and fuzzy logic for mineral exploration in the Savva-Borzinsky ore cluster. The developed predictive model demonstrated strong correlation between detected anomalies and the distribution of known ore objects and mapped hydrothermal–metasomatic alteration zones in host rocks, while also revealing new potentially mineralized areas.

This approach enhances the value of remote sensing data, reduces the volume and cost of field exploration, and is scalable and adaptable to other regions with comparable physical-geographic conditions.

This study was conducted as part of the state assignment of IGEM RAS.

1. Ishmukhametova V.T., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Lapaev D.S., Minaev V.A., Petrov V.A. (2023). Identification of hydrothermally altered zones using WorldView-2 data in the Talman area (southeastern Transbaikalia, Russia). Remote Sensing of Earth from Space, (5), 58–70. https://doi.org/10.31857/S0205961423040048
2. Kalashnikov V.A. (2019). Exploration for gold-polymetallic mineralization within the Savva-Borzinsky ore cluster, Transbaikalia. Rosgeo Report, Book 1, 239 p.
3. Nazarov A.A. (2017). Assessment of gold-polymetallic mineralization in major ore districts of the Priargunsk zone, Transbaikalia. Rosgeo Report, Book 1, 262 p.
4. Nafigin I.O., Ishmukhametova V.T., Ustinov S.A., Minaev V.A., Petrov V.V. (2023). Suitability analysis of territories for detailed geological mapping using statistical processing of Landsat-8 data: a case study from southeastern Transbaikalia, Russia. Remote Sensing of Earth from Space, (2), 61–83. https://doi.org/10.31857/S0205961423010086
5. Chen Q. et al. (2022). ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China. Remote Sensing, 14(5), 1253. https://doi.org/10.3390/rs14051253
6. Frutuoso R. et al. (2021). Remote sensing for gold exploration: hydrothermal alteration mapping using Landsat 8 in northern Portugal. Arabian Journal of Geosciences, 14(6), 459. https://doi.org/10.1007/s12517-021-06786-0
7. Greenacre M. et al. (2022). Principal component analysis. Nature Reviews Methods Primers, 2, 100. https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w

8. Huang S. et al. (2021). NDVI usage in modern remote sensing. Journal of Forestry Research, 32(1), 1–6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1
9. Khan M.J. et al. (2022). Divergence measures for circular intuitionistic fuzzy sets. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 116, 105455. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105455
10. Ma Y. et al. (2021). Topographic correction methods for Landsat imagery. Remote Sensing, 13(20), 4120. https://doi.org/10.3390/rs13204120
11. Maghsoudi Moud F. et al. (2021). Accuracy assessment of ASTER mineral maps. Remote Sensing, 13(13), 2499. https://doi.org/10.3390/rs13132499
12. Masoumi M. et al. (2021). Fractal model and RBD method integration for alteration mapping using ASTER. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 23, 100519. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100519
13. Servera V.J. et al. (2022). MODTRAN emulators for atmospheric correction. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1–17. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3071376
14. Wambo T.J.D. et al. (2020). High-potential gold zones using Landsat-8 and ASTER: Ngoura-Colomines, Cameroon. Ore Geology Reviews, 122, 103530. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530

Рудопроявление «Никелевый ручей» Волчьетундровского габбро-анортозитового массива (Кольский полуостров, Мончегорский рудный район)

Орсоев Д.А.[1], Веливецкая Т.А.[2], Хромова Е.А.[1], Высоцкий С.В.[2], Чащин В.В.[3]
[1]ГИН СО РАН, orsoev44@mail.r; [2]ДВГИ ДВО РАН, svys@mail.ru; [3]ГИ КНЦ РАН, v.chashchin@ksc.ru

Волчьетундровский массив слагает среднюю часть комплекса габбро-анортозитов Главного хребта, включающего массивы Чуна-Волчьих-Лосевых и Медвежьих тундр. Этот комплекс входит в состав Мончегорского рудного района, вытянут в субмеридиональном направлении на расстояние 80 км при ширине от 1-2 до 15-20 км, маркируя тектонический шов между двумя главными геологическими структурами региона: Кольским блоком на востоке и Беломорским подвижным поясом на западе (рис. 1). Собственно Волчьетундровский массив имеет протяженность ~24 км при ширине от 1 до ~4 км. Западный контакт массива с породами Беломорского пояса тектонический, а восточный – интрузивный с образованием на контакте краевой зоны массива гибридных гиперстеновых диоритов в результате термального воздействия основной магмы на вмещающие архейские гнейсы Кольского блока. Формирование пород Волчьетундровского массива происходило в интервале (U-Pb метод, циркон) 2463 – 2473 млн лет (Чащин и др., 2012).

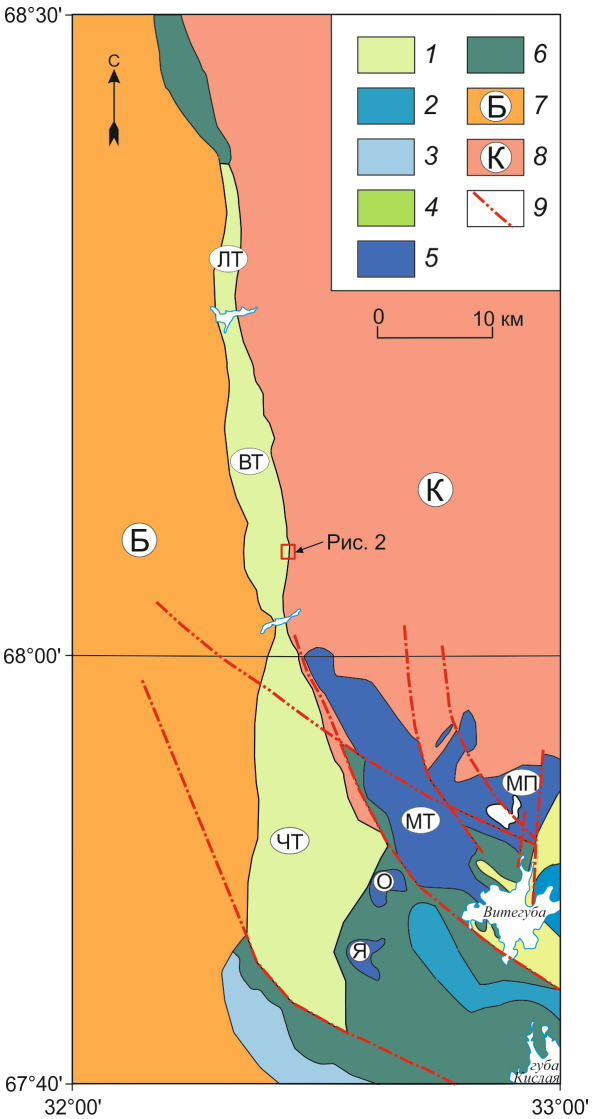


Рис. 1. Геологическая схема зоны сочленения Кольского блока и Беломорского подвижного пояса (Мончегорский рудный район).

1 – вулканогенно-осадочные образования палеопротерозойской Имандро-Варзугской рифтогенной зоны; 2-5 – палеопротерозойские интрузивные комплексы: 2 – имандровский расслоенных интрузий, 3 – габброидов Нярк-тундры, 4 - автономных габбро-анортозитов Главного хребта Чуна (ЧТ), Волчьих (ВТ), Лосевых и Медвежьих (ЛТ) тундр, 5 – мончегорский расслоенных интрузий: Мончегорский плутон (МП), Мончетундровский массив (МТ), Островский массив (О), массив г. Ягельной (Я); 6 – вулканогенные образования позднеархейского Терско-Аллареченского зеленокаменного пояса; ранне- позднеархейские метаморфические и ультраметаморфические образования: 7 - Беломорского подвижного пояса (Б) и 8 - Кольского блока (К); 9 – разрывные нарушения.

Участок рудопроявления «Никелевый ручей» находится на западном берегу озера Верхнее Волчье в восточной части Волчьетундровского массива и приурочено к зоне постепенного перехода его габброидов во вмещающие гранат-полевошпат-кварцевые гранулитоподобные породы Кольского блока (рис. 2). Эта зона шириной 200-350 м сложена в различной степени измененными габброноритами и норитами, во многих случаях отвечающими по составу гиперстеновым диоритам (Дубровский, Микляев, 1975).

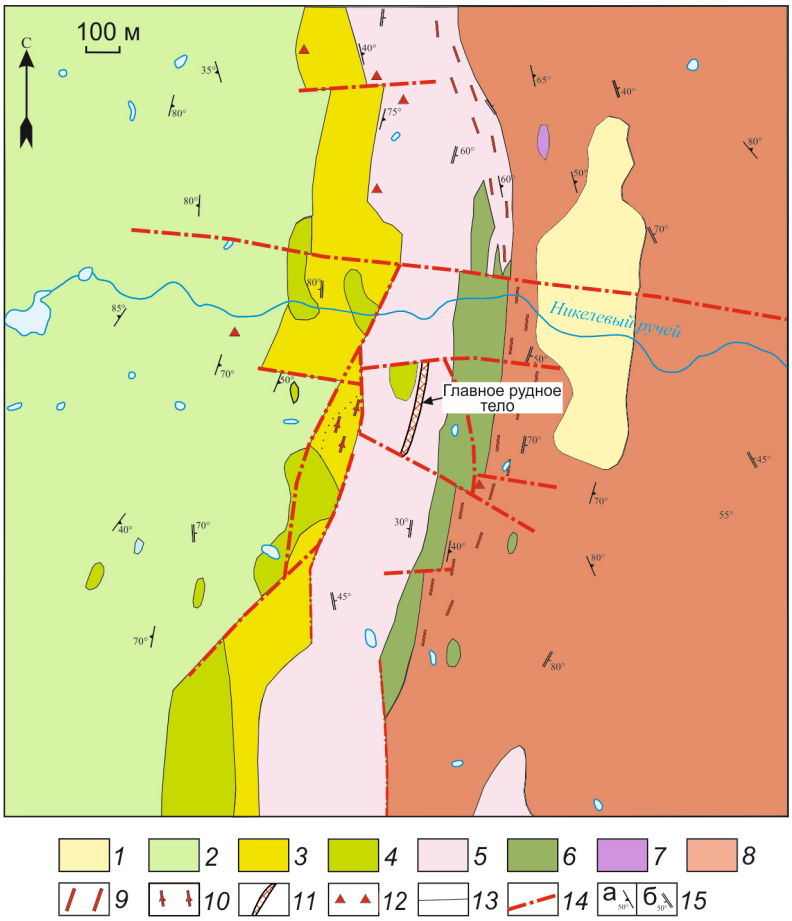


Рис. 2. Схема геологического строения участка рудопроявления «Никелевый Ручей» (по данным М.Л. Сахновского и др. 1968 г., с изменениями авторов). Местоположение участка см. рис. 1.

1 – четвертичные отложения; 2-6 – породы Волчьетундровского габбро-анортозитового массива: 2 – лейкогаббро и анортозиты, 3 - мелко- и среднезернистые породы краевой зоны, 4 – крупнозернистые габброноритыкраевой зоны, 5 – измененные нориты и габброноритыдо гиперстеновых диоритов эндоконтактовой зоны, 6 - габброноритыи нориты участками с оливином; 7 - измененные ультраосновные породы; 8 – метаморфические и ультраметаморфические образования Кольского блока; 9 – катаклазиты; 10 – катаклазиты с сульфидной минерализацией; 11 – гнездово-прожилково-вкрапленное и брекчиевидное

сульфидное Cu-Ni оруденение в бластомилонитах (главное рудное тело); 12 – сульфидная минерализация; 13 – геологические границы; 14 – тектонические нарушения; 15 – элементы залегания: а - трахитоидность, гнейсовидность и сланцеватость, б – полосчатость.

На природу происхождения гиперстеновых диоритов не существует единой точки зрения. Так, А.А.Полканов (1936) относил эти диориты не к интрузивным габбро-анортозитам Волчьетундровского массива, а к комплексу гиперстеновых «норито-гнейсов» архейских образований Кольского блока. Другие геологи (Д.В. Шифрин, 1940 г.), наоборот, считали, эти породы измененными приконтактовыми габброноритами, входящими в состав массива. Эту точку зрения также поддержали Н.Г. Добрынина и М.Л. Сахновский (1970 г.), разделив породы на гибридные гиперстеновые диориты, которые наращивают разрез массива, и гиперстеновые гнейсы, образовавшиеся за счет толщи архейских гнейсов. Позднее к такому же выводу на основе более детальных минералогических и петрохимических исследований пришли (Дубровский, Микляев, 1975), что подтверждается и нашими исследованиями. Следует отметить, что возникновение диоритов в контактовых областях вообще характерно для многих расслоенных базит-ультрабазитовых массивов (например, Садбери, Лукиндинский, Веселкинский, Кувалорогский, Дукукский и многие др.). На участке рудопроявления, кроме того, вдоль восточной части эндоконтактовой зоны отмечается довольно крупное тело габброноритов и норитов (Восточное норитовое тело), местами содержащих оливин и спорадическую бедную сульфидную вкрапленность.

Эндоконтактовые измененные нориты и габбронориты подвержены интенсивной метаморфической и тектонической переработке с проявлениями процессов милонитизации, катаклаза, эклогитизации, амфиболизации, биотитизации и окварцевания, которые, в частности, привели к образованию гранатсодержащих бластомилонитов. К одной из таких зон приурочено основное Cu-Ni сульфидное оруденение (Главное рудное тело). Рудовмещающее тело бластомилонитов имеет пластообразную форму, протягивается в субмеридиональном направлении примерно на 360 м, имеет крутое восточное падение 70-80°. Мощность тела в верхней части достигает 8 м и примерно на глубине 210 м оно выклинивается. Бластомилониты сложены гранатом альмандин-пиропового состава, ортопироксеном (En 59.2-76.4, Fs 23.6-40.7, Wo 0-0.6), плагиоклазом ($An_{33-48}Ab_{50-62}Or_{0.3-2}$) кварцем, силлиманитом. Отмечаются в небольших количествах калиевый полевой шпат, клинопироксен (диосид), биотит, Ca-амфибол (магнезиогастингсит), хлорит, и сидерит. Спорадически встречаются хромистая шпинель, монацит и торит. Обнаружен очень редкий фосфат Ce - рабдофан ($Ce(PO_4)\cdot H_2O$.

Руды представлены вкрапленными, вкрапленно-прожилковыми и брекчиевидными разновидностями. Последние состоят из разнообразных по размерам обломков измененных габброидов (гранат-гиперстеновые диориты) и сульфидного цемента. Главными рудными минералами являются никельсодержащий моноклинный пирротин (5-70 %), пирит (от ед. зерен до 15 %), пентландит (до 2-3 %). Среди второстепенных и редких отмечается халькопирит (до 1 %), сфалерит, кубанит, молибденит, ильменит, рутил. Кроме того, обнаружен палладиевый мелонит. Структура аллотриоморфнозернистая. Все разновидности руд, по данным поисковых работ, характеризуются крайне низкими содержаниями Ni (0.51-0.79 мас. %) и Cu (0.04-0.16 мас. %), при вариации соотношения Ni к Cu от 8.4:1 до 16.9:1. Содержания Ni и Cu уменьшаются с глубиной и на флангах рудного тела.

Сульфидная минерализация Восточного норитового тела характеризуется преобладанием халькопирита над пентландитом. Содержание халькопирита – 2-5 %, пентландита - от единичных зерен до 1 %, кубанита - до 3 %, борнита – от единичных зерен до 0.5 %, пирротина – до 3 %. Кроме того, отмечаются пирит, ковеллин, ильменит и магнетит. По условиям локализации, минеральному составу основным геохимическим параметрам и практической значимости оруденение в бластомилонитах Никелевого ручья принадлежит к другому генетическому типу по сравнению с оруденением Восточного норитового тела и рудами Мончеплутона.

Как показали изотопные исследования, сульфиды (пирротин, пентландит, пирит, халькопирит) из вмещающих рудное тело гиперстеновых диоритов характеризуются очень низкими значениями величины δ34S (-0.01 - -0.03 ‰), тогда как сульфиды из бластомилонитов имеют более широкий интервал значений δ34S от -0.93 до +0.88 ‰, что соответствует в обоих случаях диапазону значений серы (δ34S=0±2 ‰) мантийного происхождения (рис. 3). Особую ценность представляет обнаружение изотопной аномалии серы Δ33S. Ее значения изменяются в пределах от -0.10 до -0.20 ‰ в сульфидах из руд и от -0.10 до -0.17 ‰ в сульфидах из гиперстеновых диоритов, что явно выходит за пределы мантийного диапазона Δ33S (см. рис. 3).

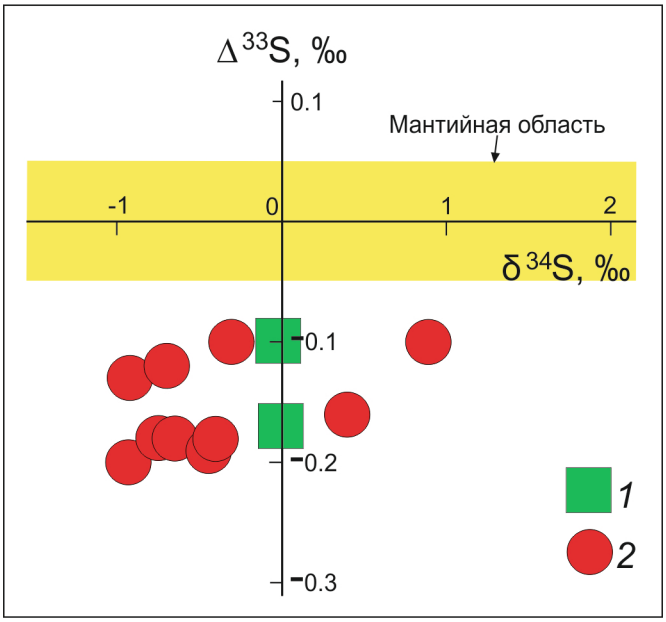


Рис. 3. Мультиизотопные данные серы для сульфидов руд и пород рудопроявления «Никелевый ручей».

1 – эндоконтактовые измененные нориты и габбронориты (гиперстеновые диориты); 2 – руды в бластомилонитах.

Эти данные свидетельствуют о том, что помимо мантийной серы заметный вклад в формировании сульфидов вносила сера, прошедшая цикл фотохимического преобразования в архейской бескислородной атмосфере. Предполагается, что изотопно-аномальная сера могла накапливаться в архейских осадочных порода, в виде сульфидных и сульфатных минералах в приповерхностных морских условиях при окислительно-восстановительных процессах с участием атмосферной серы (Веливецкая и др., 2024; Ono, 2017). Таким образом, присутствие изотопно-аномальной сера в сульфидах эндоконтактовых диоритов можно объяснить процессами ассимиляции корового вещества исходной базитовой магмой. Несмотря на последующие метаморфические и тектонические события, метка масс-независимого фракционирования серы сохранилась и была привнесена в породы Волчьетундровского массива. К такому же выводу пришли А. Беккер с соавторами (Bekker et al., 2016) при изучении изотопов серы в сульфидах Мончегорского плутона и вмещающих архейских гнейсов.

Гомогенный изотопный состав серы-34 и -33 в изученных сульфидных минералах указывает на достаточно интенсивное перемешивание серы различных источников еще до отделения сульфидной жидкости от своей силикатной матрицы.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ГИН СО РАН им. Н.Л. Добрецова по проекту АААА-А17-117011650013-4.

1. Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В., Высоцкий С.В., Яковенко В.В. Изотопная аномалия серы в магматической сульфидной минерализации Мончегорского плутона как свидетельство процессов субдукции в архее // Вестник ДВО РАН. 2024. № 5. С. 40-49.
2. Дубровский М.И., Микляев А.Н. Геология, вещественный состав и генезис «гиперстеновых диоритов» восточного предгорья Главного хребта // Основные и ультраосновные породы Кольского полуострова и их металлогения. Апатиты: изд. Кольского филиала АН СССР, 1975. С. 91-107.
3. Чащин В.В., Баянова Т.Б., Елизарова И.Р., Серов П.А. Волчьетудровский массив комплекса автономных анортозитов Главного хребта, Кольский полуостров: геологические, петрогеохимические и изотопно-геохронологические исследования // Петрология. 2012. Т.20. № 5. С. 514-540.
4. Bekker A., Grokhovskaya T.L., Hiebert R., Sharkov E.V., Bui T.H., Stadnek K.R., Chashchin V.V., Wing B.A. Multiple sulfur isotope and mineralogical constrains on the genesis of Ni-Cu-PGE magmatic sulfide mineralization of the Monchegorsk Igneous Complex, Kola Peninsula, Russia // Miner. Deposita. 2016. V. 51. P. 1035-1053.
5. Ono S. Photochemistry of sulfur dioxide and the origin of mass-independent isotope fractionation in earth’s atmosphere // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2017. Vol. 45. P. 301-329/

*«Nickel Stream» Mineral Occurrence of the Volchyetundrovsky Gabbro-Anorthosite Massif (Kola Peninsula, Monchegorsk Ore District)

Orsoev D.A.[1], Velivetskaya T.A.[2], Khromova E.A.[1], Vysotsky S.V.[2], Chashchin V.V.[3]
[1]GIN SB RAS, orsoev44@mail.ru; [2]FEGI FEB RAS, svys@mail.ru; [3]GI KSC RAS, v.chashchin@ksc.ru

The Volchyetundrovsky massif constitutes the central portion of the gabbro-anorthosite complex of the Main Ridge, which also includes the Chuna-Volchyi-Losevy and Medvezhyi Tundra massifs. This complex is part of the Monchegorsk ore district, extending in a submeridional direction for approximately 80 km, with a width ranging from 1–2 to 15–20 km, and marks the tectonic suture between two major geological structures: the Kola Block to the east and the Belomorian mobile belt to the west (Fig. 1). The Volchyetundrovsky massif itself stretches ~24 km, with a width from 1 to ~4 km. Its western contact with the Belomorian rocks is tectonic, while the eastern contact is intrusive, forming a marginal zone of hybrid hypersthene diorites as a result of thermal interaction between the mafic magma and the enclosing Archean gneisses of the Kola Block. U-Pb zircon dating indicates the formation of the massif's rocks occurred between 2463 and 2473 Ma (Chashchin et al., 2012).

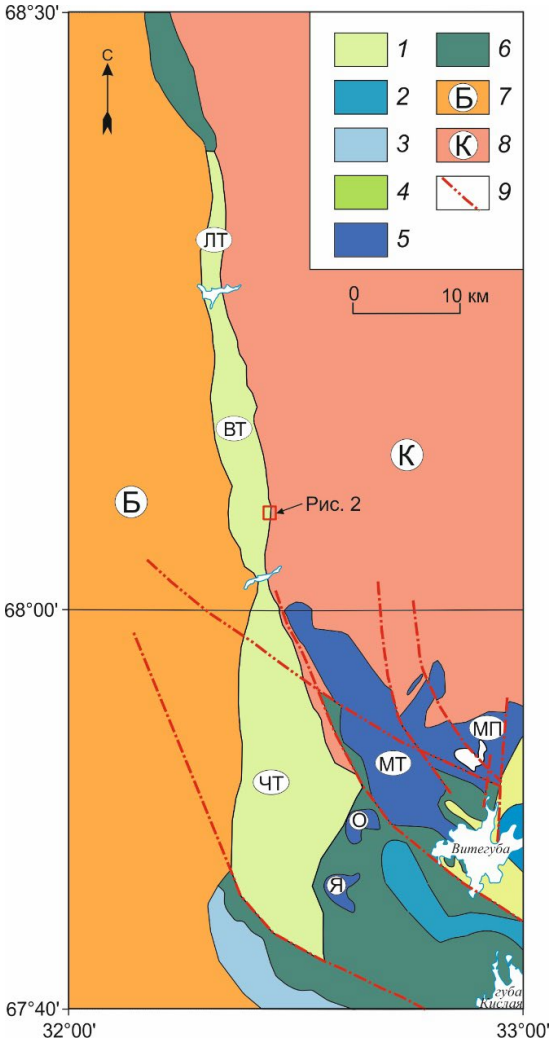


Fig. 1. Geological scheme of the suture zone between the Kola Block and the Belomorian mobile belt (Monchegorsk ore district).

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

1 – volcanogenic-sedimentary rocks of the Paleoproterozoic Imandra-Varzuga rift zone; 2–5 – Paleoproterozoic intrusive complexes: 2 – Imandra layered intrusions; 3 – Nyark-tundra gabbroids; 4 – autonomous gabbro-anorthosites of the Main Ridge: Chuna (ChT), Volchyetundrovsky (VT), Losevy and Medvezhyi (LT) tundras; 5 – Monchegorsk layered intrusions: Monchegorsk pluton (MP), Monchetundra massif (MT), Ostrovsky massif (O), Mount Yagelnaya massif (Ya); 6 – volcanic rocks of the Late Archean Tersko-Allarechensky greenstone belt; 7 – Early–Late Archean metamorphic and ultrametamorphic rocks: 7 – Belomorian mobile belt (B), 8 – Kola Block (K); 9 – faults.

The Nickel Stream occurrence is located on the western shore of Upper Volchye Lake in the eastern part of the Volchyetundrovsky massif and is spatially associated with a transitional zone between the massif's gabbroids and enclosing garnet-feldspar-quartz granulite-like rocks of the Kola Block (Fig. 2). This transition zone, 200–350 m wide, is composed of variably altered gabbro-norites and norites, in many cases corresponding compositionally to hypersthene diorites (Dubrovsky, Miklyaev, 1975).

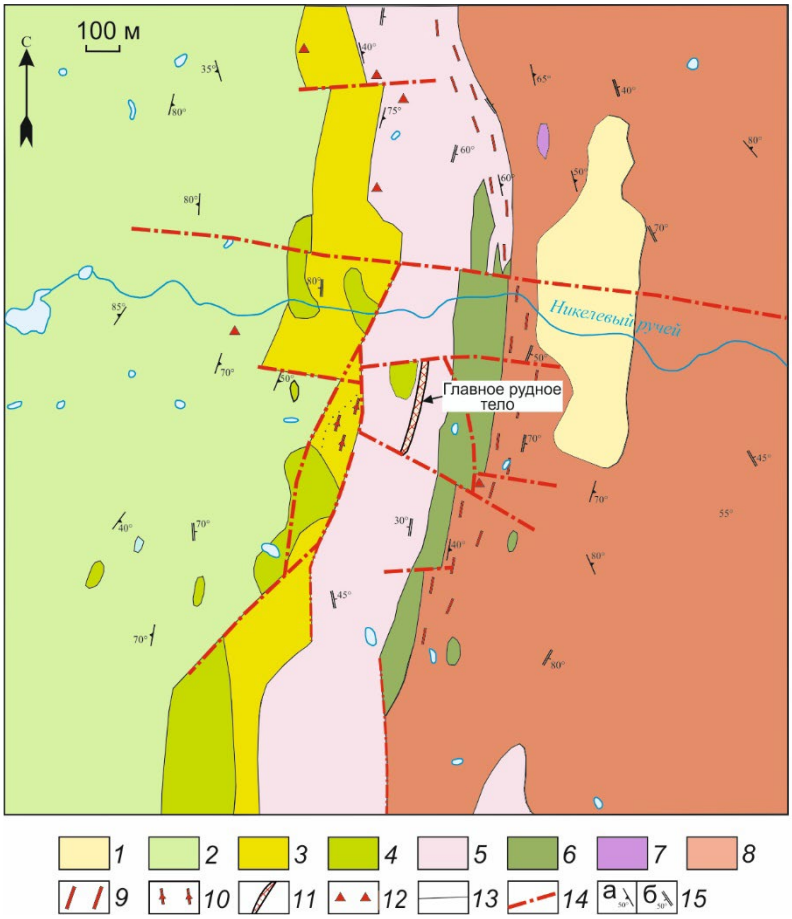


Fig. 2. Geological map of the Nickel Stream mineral occurrence (based on M.L. Sakhnovsky et al., 1968, modified by the authors). See Fig. 1 for location.

1 – Quaternary deposits; 2–6 – rocks of the Volchyetundrovsky gabbro-anorthosite massif: 2 – leuconorites and anorthosites; 3 – fine- to medium-grained rocks of the marginal zone; 4 – coarse-grained gabbro-norites of the marginal zone; 5 – altered norites and gabbro-norites of the endocontact zone (hypersthene diorites); 6 – gabbro-norites and norites locally with olivine; 7 – altered ultramafic rocks; 8 – metamorphic and ultrametamorphic rocks of the Kola Block; 9 – cataclasites; 10 – cataclasites with sulfide mineralization; 11 – nest-vein-disseminated and brecciated Cu-Ni sulfide mineralization in blastomylonites (main ore body); 12 – sulfide mineralization; 13 – geological boundaries; 14 – tectonic faults; 15 – structural elements: a – trachytoidal, gneissic, and schistose foliation; b – banding.

There is no consensus regarding the origin of the hypersthene diorites. A.A. Polkanov (1936) considered these rocks part of the Archean "norite-gneiss" complex of the Kola Block. In contrast, D.V. Shifrin (1940) and later N.G. Dobrynina and M.L. Sakhnovsky (1970) interpreted them as altered contact gabbro-norites of the massif. This view, supported by mineralogical and petrochemical studies (Dubrovsky, Miklyaev, 1975), is corroborated by our research. The formation of diorites in contact zones is typical for many layered mafic-ultramafic intrusions (e.g., Sudbury, Lukindinsky, Veselkinsky, Kuvalorogsky, Dukuksky). A large gabbro-norite and norite body, the Eastern Norite Body, containing sporadic disseminated sulfides and olivine, is also identified in the endocontact zone.

Endocontact altered norites and gabbro-norites are subjected to intense metamorphic and tectonic reworking, including mylonitization, cataclasis, eclogitization, amphibolization, biotitization, and silicification, resulting in garnet-bearing blastomylonites. The main Cu-Ni sulfide mineralization (Main Ore Body) is associated with one such zone. The ore body has a lenticular form, extends ~360 m in a submeridional direction, dips steeply eastward (70–80°), reaches a thickness of 8 m in the upper part, and pinches out at ~210 m depth. The blastomylonites are composed of garnet (almandine-pyrope), orthopyroxene (En59.2–76.4, Fs23.6–40.7, Wo0–0.6), plagioclase (An33–48Ab50–62Or0.3–2), quartz, and sillimanite. Minor phases include K-feldspar, clinopyroxene (diopside), biotite, Ca-amphibole (magnesiohastingsite), chlorite, and siderite. Chromite, monazite, and thorite are sporadically present. The rare phosphate Ce-mineral rhabdophane ($Ce(PO_4)\cdot H_2O$) was identified.

Ores are represented by disseminated, vein-disseminated, and brecciated types. The latter consist of clasts of altered gabbroids (garnet-hypersthene diorites) in a sulfide cement. Major sulfide minerals include Ni-bearing monoclinic pyrrhotite (5–70%), pyrite (up to 15%), and pentlandite (up to 2–3%). Minor and rare minerals include chalcopyrite (up to 1%), sphalerite, cubanite, molybdenite, ilmenite, and rutile. Palladium-bearing melonite was also detected. The texture is allotriomorphic-granular. Ni contents are low (0.51–0.79 wt.%) as are Cu (0.04–0.16 wt.%), with Ni/Cu ratios ranging from 8.4:1 to 16.9:1. Ni and Cu concentrations decrease with depth and toward the flanks.

Sulfide mineralization in the Eastern Norite Body is characterized by chalcopyrite dominance over pentlandite. Chalcopyrite content ranges from 2–5%, pentlandite from trace to 1%, cubanite up to 3%, bornite trace to 0.5%, and pyrrhotite up to 3%. Pyrite, covellite, ilmenite, and magnetite are also present. The mineralization in the blastomylonites differs genetically and geochemically from that in the Eastern Norite Body and Monchepluton ores.

Isotopic analyses show that sulfides (pyrrhotite, pentlandite, pyrite, chalcopyrite) from enclosing hypersthene diorites have very low $\delta^{34}S$ values (−0.01 to −0.03‰), while sulfides from blastomylonites range from −0.93 to +0.88‰. Both fall within the typical mantle $\delta^{34}S$ range (0±2‰). Anomalies in sulfur-33 ($\Delta^{33}S$) were also recorded: −0.10 to −0.20‰ in ores, and −0.10 to −0.17‰ in enclosing diorites (Fig. 3), exceeding the mantle range.

These data suggest that, alongside mantle sulfur, a significant contribution came from sulfur subjected to photochemical cycling in the Archean anoxic atmosphere. It is proposed that isotopically anomalous sulfur was incorporated into Archean sedimentary rocks, forming sulfide and sulfate minerals under redox conditions involving atmospheric sulfur (Velivetskaya et al., 2024; Ono, 2017). Thus, its presence in the endocontact diorites likely reflects crustal assimilation by the parent mafic magma. Despite later metamorphic and tectonic overprints, the signature of mass-independent sulfur fractionation was retained and introduced into the Volchyetundrovsky massif. A similar conclusion was reached by Bekker et al. (2016) for sulfides in the Monchegorsk pluton and enclosing Archean gneisses.

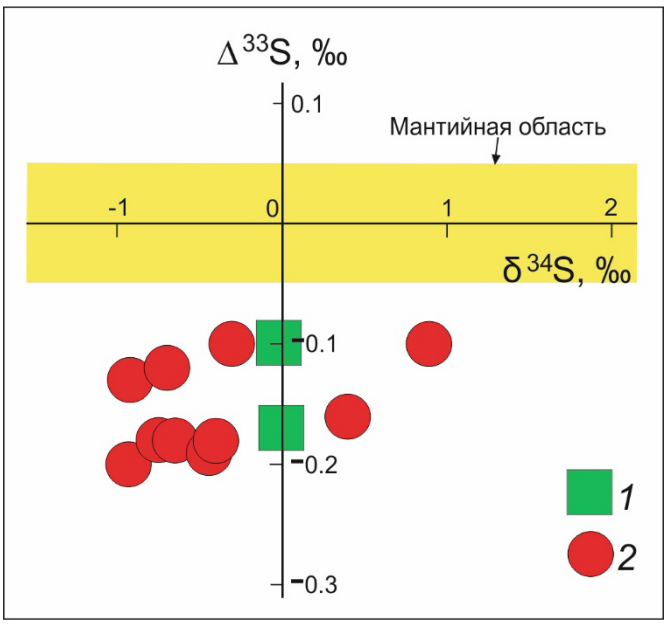


Fig. 3. Multiple sulfur isotope data for sulfides from ores and host rocks of the Nickel Stream occurrence.

1 – endocontact altered norites and gabbro-norites (hypersthene diorites); 2 – ores in blastomylonites.

The homogeneous $\delta^{34}S$ and $\Delta^{33}S$ isotopic composition in studied sulfides indicates thorough sulfur mixing from multiple sources before sulfide liquid separation from the silicate melt.

This study was conducted within the framework of the State Assignment of the N.L. Dobretsov GIN SB RAS (project no. AAAA-A17-117011650013-4).

1. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Vysotsky S.V., Yakovenko V.V. Sulfur isotope anomaly in magmatic sulfide mineralization of the Monchegorsk pluton as evidence of subduction processes in the Archean // Bulletin of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. 2024. No. 5. P. 40–49.
2. Dubrovsky M.I., Miklyaev A.N. Geology, composition, and genesis of “hypersthene diorites” of the eastern foothills of the Main Ridge // Basic and Ultramafic Rocks of the Kola Peninsula and Their Metallogeny. Apatity: Kola Branch of the USSR Academy of Sciences, 1975. P. 91–107.
3. Chashchin V.V., Bayanova T.B., Elizarova I.R., Serov P.A. Volchyetundrovsky massif of the autonomous anorthosite complex of the Main Ridge, Kola Peninsula: geological, petrological, and isotope-geochronological studies // Petrology. 2012. Vol. 20. No. 5. P. 514–540.
4. Bekker A., Grokhovskaya T.L., Hiebert R., Sharkov E.V., Bui T.H., Stadnek K.R., Chashchin V.V., Wing B.A. Multiple sulfur isotope and mineralogical constraints on the genesis of Ni-Cu-PGE magmatic sulfide mineralization of the Monchegorsk Igneous Complex, Kola Peninsula, Russia // Mineralium Deposita. 2016. Vol. 51. P. 1035–1053.
5. Ono S. Photochemistry of sulfur dioxide and the origin of mass-independent isotope fractionation in Earth’s atmosphere // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2017. Vol. 45. P. 301–329.

Рудоконтролирующие структуры Восточной Сибири

Павленко Ю.В.
Чита, payurva@mail.ru

В Восточной Сибири - природном регионе, включающим территорию Средней Сибири, Прибайкалья и Забайкалья, в результате Государственной геологической съёмки масштаба 1:1 000 000 (третье поколение) в этом веке получена новая фундаментальная геологическая информация, обеспечивающая развитие геологической науки, общих знаний о геологическом строении и минерагении огромного региона, а также разработку и реализацию стратегических вопросов изучения и использования недр. Одним из реальных практических результатов этих огромных по значимости исследований является возможность картирования четырёх типов обзорных (континентальных) и региональных рудоконтролирующих структур.

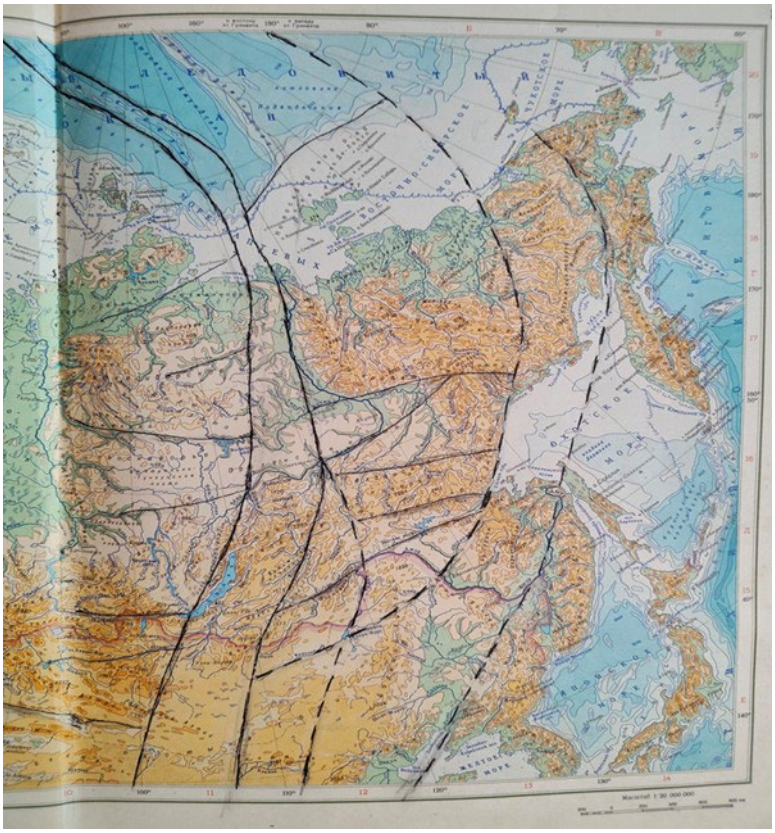


Рис. 1. Разрывные структуры восточной части Евроазиатского континента.

К основным обзорным преимущественно субмеридиональным структурам относится крупная Азиатская зона трансконтинентального пассивного рифта (ТПР), выделенная с учётом литературных данных и морфоструктуры поверхности азиатского континента и три относительно маломощных протяжённых разрыва, вероятно сколового характера, обозначенных на рис. 1 пунктирными линиями. Зона ТПР развивалась на границе тектонических плит, в которой проявлены процессы деформации, вулканизма, магматизма и рудогенеза. Для зоны характерны нечёткие дивергентные границы, осложнённые «оперяющими» (трансформными) сдвиговыми и согласными с зоной приграничными разрывными структурами. Эта зона является древней границей между сегментом Центральной Азии и Тихоокеанским подвижным поясом (Шерман, 1978). Для зоны характерны деформации растяжения, пониженная мощность коры, менее вязкая астеносфера, максимальный тепловой поток, активный вулканизм, развиты система впадин, ограниченных серией сбросов, многочисленные разрывы, интенсивная складчатость (Суворов, 2004). Протяжённостью зона ТПР более 12000 км, ширина 120-500 км, она сочленяется, вероятно,

через второстепенные структуры Северного Ледовитого океана со структурами Атлантического срединно-океанического хребта. В этом океане в рифтовой зоне спрединговой хребта Гаккеля, разграничивающего глубоководные впадины Нансена и Амундсена, развиты многочисленные поперечные (трансформные) разломы (Пущаровский, 2004). На юге, в Индийском океане, Азиатская зона ТПР заканчивается крупным меридиональным Восточно-Индоокеанским линейным тектоно-вулканическим хребтом, протяжённостью 5000 км (Пущаровский, 2004). В целом, зона ТПР является связующим звеном между Восточно-Индоокеанским хребтом и рифтогенными структурами, Северного Ледовитого океана. Практическая значимость зоны ТПР определяется, прежде всего, её высокой водообильностью. В зоне и на прилегающих к ней территориях располагаются минеральные истоки, истоки и крупные притоки великих азиатских рек – Лены, Амура, Хуанхэ, Янцзы, Меконг, Селенги, а также озера Байкал и Хубсугул, крупные месторождения углеводородов, алмазов, золота, урана, меди и рядовые месторождения многих полезных ископаемых.

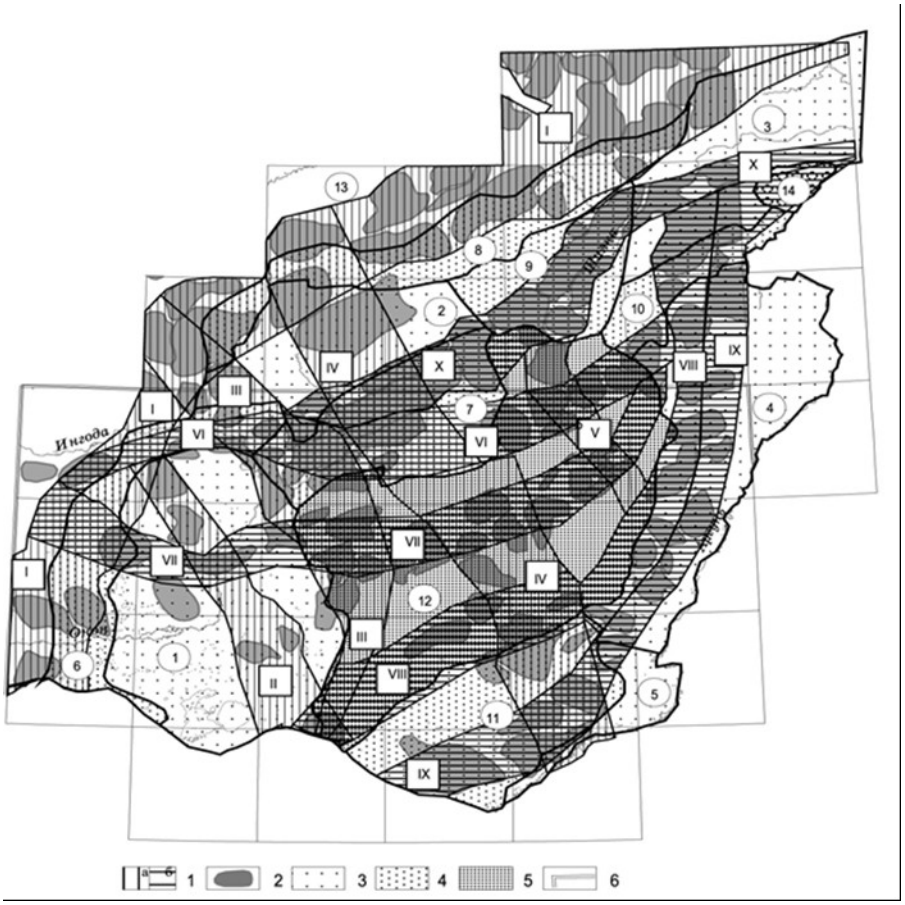


Рис.2. Линейные зоны тектономагматической активизации докембрийского кристаллического фундамента в региональных структурах земной коры Юго-Восточного Забайкалья: 1 – зоны тектономагматической активизации субмеридионального (а) и субширотного – до субмеридионального (б) направлений, уточненные по полям экстенсивности. 2 – рудные узлы; 3 – 5 – мегаблоки со средней глубиной залегания кровли диорит - метаморфического слоя, км: 3 – 0-3; 4 – 5-6; 5 – 8-10 (по Г.А. Генко и Ю.А. Филипченко). 6 – контур площади листа М-50.

Архитектуру поверхности Еврозийского континента украшают несколько относительно молодых региональных разломов альпийского геотектонического цикла. Морфоструктура земной поверхности этого цикла отражает состояние недр планеты, происходящие в них процессы последнего геотектонического цикла и их взаимодействие с космо-экзогенными явлениями (Уфимцев, 2004). Наиболее ёмкими показателями современного состояния этих

процессов выражены особенностями речной сети. Геолого-минерагенические особенности сколовых разломов не приводятся, однако на территории Восточной Сибири для прилегающего к зоне ТПР Аргуно-Хуанхэ-Ямцзынского разлома отмечена парагенетическая связь промышленного уранового и редкоземельного (месторождение Баян-Обо) оруденения. Эти региональные разломы обусловлены развитием внутриплитных источников глубинного магматизма, связанного с формированием мантийных плюмов в пределах континентальной коры.

Региональные рудоконтролирующие структуры представлены крупнейшей на планете Восточно-Забайкальская протерозойской астроблемой (90 км^2) и несколькими субширотными рудоконтролирующими разрывами вероятно трансформной природы. Астроблема - триггер-фактор эндогенного оруденения крупного горнорудного региона России. Кольцеобразно-блоковая структура земной коры Юго-Восточного Забайкалья до глубины 15-20 км прямо указывает на формирование импактной структуры, которая проявляется в закономерном пространственном размещении многочисленных мультиметалльных месторождений 45 рудных формаций - производных импактно-магматического, импактно-гидротермального, импактно-метаморфического генетических типов (Павленко, 2021). Они связаны с процессами мезозойской океанизации земной коры. В астроблеме рудовмещающей является система из 9 флюидопроницаемых зон, развитых на основе импактных разрывов. Аномально большой глубиной и проницаемостью для рудоносных растворов являются участки пересечения, сочленения зон. В них локализовано оруденение в ранге рудных районов (структуры четвёртого порядка), рудных узлов (структуры пятого порядка), рудных полей и месторождений (структуры соответственно шестого и седьмого порядков) (рис. 2). В Юго-Восточном Забайкалье установлено более 130 разновозрастных геологических формаций, в том числе 18 рудогенерирующих и рудообразующих, поэтому минерагенические факторы и рудные формации представляют исключительно сложную, неоднозначно интерпретируемую информацию (Павленко, 2009). Недавнее землетрясение в этом районе указывает на его продолжающуюся эндогенную активность, а выходы газов на поверхность – на высокую проницаемость разрывных структур. С астроблемой связаны золото – полиметаллически – флюорит – урановая Аргунская и Агинская субпровинции Монголо-Забайкальской минерагенической провинции. Выделены 3 минерагенических зоны (области) с 14 рудными районами и 200 крупными, средними и мелкими месторождениями 22 видов полезных ископаемых. Огромные, далеко не познанные, природные особенности характеризуют этот регион как уникальную рудоносную провинцию планеты, история открытия, геологических исследований и освоение которого составляет ценнейшее достояние и России, и мира. Современные минеральные ресурсы Восточного Забайкалья и её астроблемы представляют крупнейший кладезь стратегических, остродефицитных и высоколиквидных полезных ископаемых, способный обеспечить наращивание российского капитала многие годы.

Большую практическую значимость имеет система своеобразных относительно локальных трансформных разломов сдвигового характера Восточной Сибири, прямо связанная с формированием зоны ТПР (рис. 1). По многим причинам оперяющие рифтинг локальные разломы развивались большей частью в соответствии с геологическими обстановками территорий их локализации. На данной стадии изученности разломы не являются «трансформными» по причине их недоразвитости. Наиболее изучена система разломов Пришилкинского структурно-формационного комплекса (СФК), расположенная по левобережью Ингоды, Шилки, Амура (рис. 3). С этим комплексом, прослеживаемым на 850 км при ширине 100–130 км связано оруденение 6 рудных районов и 33 рудных узлов 18 рудоносных формаций. Пришилкинский СФК – крупная зона концентрации тектонических движений, полиметаморфических, гидротермально-метасоматических и магматических процессов (Павленко, 2017). СФК формировался в разноплановой тектонической обстановке на границах Селенгино-Яблоневой складчатой системы, Монголо-Охотской складчатой области и Алдано-Станового щита - крупных частей соответственно Байкальского, Амурского и Алдано-Станового геоблоков активной части литосферы. Этот геологический феномен

обусловил формирование богатого набора преимущественно дефицитных видов полезных ископаемых, привлекая внимание нескольких поколений геологов. Система сформировалась как чешуйчатый надвиг, по которому кристаллические породы северного блока надвинуты на южный блок. Плоскости надвигов падают на северо-запад под углами 15–75°. По тектонитам участками развиты кварцевые, кварц-турмалиновые метасоматиты, часто в них локализуются позднемезозойские дайки и жилы кварца, иногда рудоносные.

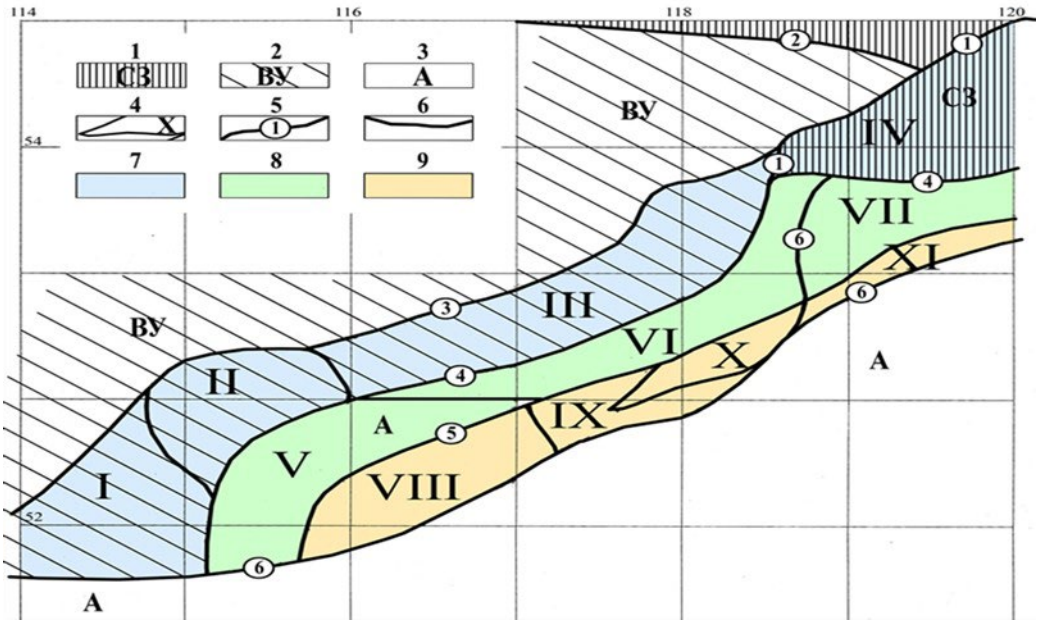


Рис.3. Разрывные структуры юго-западной части Пришилкинского структурно-формационного комплекса [8]:1–3- структурно - формационные зоны: 1 – Западно-Становая, 2 – Витимо-Урюмская (Селенга-Витимский мегаблок), 3 – зоны Амурского геоблока; 4 - блоки геологической неоднородности. 5 – глубинные разрывные нарушения: 1 - Тунгиро-Моготский, 2 – Джилинда – Могочинский, 3 – Нерчинско – Нерчуганский, 4 – Дарасун – Могочинский (фрагмент Монголо-Удского шва), 5 – Могоча- Бушулейский, 6 – Монголо-Охотский с северной и восточной ветвями, 6– прочие разрывные структуры.; 7-9 – тектонические пластины: 7 - Северная (Дарасун-Могочинская), 8 – Центральная (Могоча-Бушулейская), 9- Южная (Монголо-Охотская).

Около десятка «оперяющих» локальных «рифтогенных» сдвиговых разломов представляют большой практический интерес на полезные ископаемые. Их разнообразие – следствие неоднородности проявления не только геологических процессов, продуктивных формаций, но и массы других факторов, интерпретация которых представляет сложнейшую научную проблему. Использование ИИ внесёт весомый вклад в создание универсальных типовых моделей прогнозируемых геологических объектов, подготовку современных кадров, образовательных программ, улучшит управление природными ресурсами, а это новые знания о Земле в целом.

1. Павленко Ю.В. Восточно-Забайкальская астроблема. Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2021. Т. 27. № 8. С. 48-60 .
2. Павленко Ю.В. Глубинное строение и минерагения Юго-Восточного Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2009. – 200 с.
3. Павленко Ю.В. Пришилкинская минерагеническая зона Восточного Забайкалья и Верхнего Приамурья: монография. Чита: ЗабГУ. 2017. 155 с.
4. Пущаровский Ю.М. Тектоника океанов. Тектоника плит. Планета Земля. Энцикл. спр. Т. Тектоника и геодинамика. Ред. Красный Л. И., Петров О. В., Блюман Б. А. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. С. 226-232.

5. Суворов А.И. Шовные зоны. Тектоника плит. Планета Земля. Энцикл. спр. Т. Тектоника и геодинамика. Ред. Красный Л. И., Петров О. В., Блюман Б. А. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. С. 638-639.
6. Уфимцев Г.Ф. Морфоструктура Земли. Тектоника плит. Планета Земля. Энцикл. спр. Т. Тектоника и геодинамика. Ред. Красный Л. И., Петров О. В., Блюман Б. А. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. С. 55-59.
7. Шерман С.И. (отв. ред.) Трансазиатская континентальная зона Вебирс / Вост.-Сиб. фил. Сиб. отд-ния АН СССР. Иркутск: [б. и.], 1978. 52 с.

*Ore-Controlling Structures of Eastern Siberia

Pavlenko Yu.V.
Chita, payurva@mail.ru

In Eastern Siberia—a natural region encompassing Central Siberia, Pribaikalye, and Transbaikalia—new fundamental geological data have been obtained this century through the 1:1,000,000 scale State Geological Mapping (third generation). These results significantly contribute to the advancement of geological science, general understanding of regional geological structure and metallogeny, and the strategic development and utilization of subsurface resources. One of the key practical outcomes of these major investigations is the possibility of mapping four types of large-scale (continental) and regional ore-controlling structures.



Fig. 1. Fault structures of the eastern part of the Eurasian continent.

Among the main large-scale, predominantly submeridional structures is the extensive Asian zone of the Transcontinental Passive Rift (TPR), delineated based on literature data and the morphostructure of the Asian continent's surface, along with three relatively narrow, extended faults likely of strike-slip character (shown as dashed lines in Fig. 1). The TPR zone developed along a tectonic plate boundary, marked by deformation, volcanism, magmatism, and ore formation. It features diffuse divergent boundaries complicated by “feathering” (transform) strike-slip and border-parallel fault structures. This zone represents an ancient boundary between the Central Asian segment and the Pacific mobile belt (Sherman, 1978). It is characterized by extensional deformation, reduced crustal thickness, less viscous asthenosphere, maximum heat flow, active volcanism, a system of basins bounded by normal faults, numerous fractures, and intense folding (Suvorov, 2004). The TPR extends over 12,000 km in length and 120–500 km in width, possibly connecting via secondary

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

structures in the Arctic Ocean with the Mid-Atlantic Ridge. In the Arctic, the spreading ridge of the Gakkel Ridge (separating the Nansen and Amundsen basins) features many transverse (transform) faults (Pushcharovsky, 2004). To the south, in the Indian Ocean, the TPR terminates at the major meridional East Indian Ocean tectono-volcanic ridge (~5,000 km long) (Pushcharovsky, 2004). Overall, the TPR serves as a tectonic bridge between the East Indian Ridge and the rift structures of the Arctic Ocean. Its practical significance primarily lies in its high groundwater abundance. Within and adjacent to this zone are the headwaters and major tributaries of Asia's great rivers—Lena, Amur, Huang He, Yangtze, Mekong, and Selenga—as well as Lake Baikal, Lake Khövsgöl, and large deposits of hydrocarbons, diamonds, gold, uranium, copper, and numerous other mineral resources.

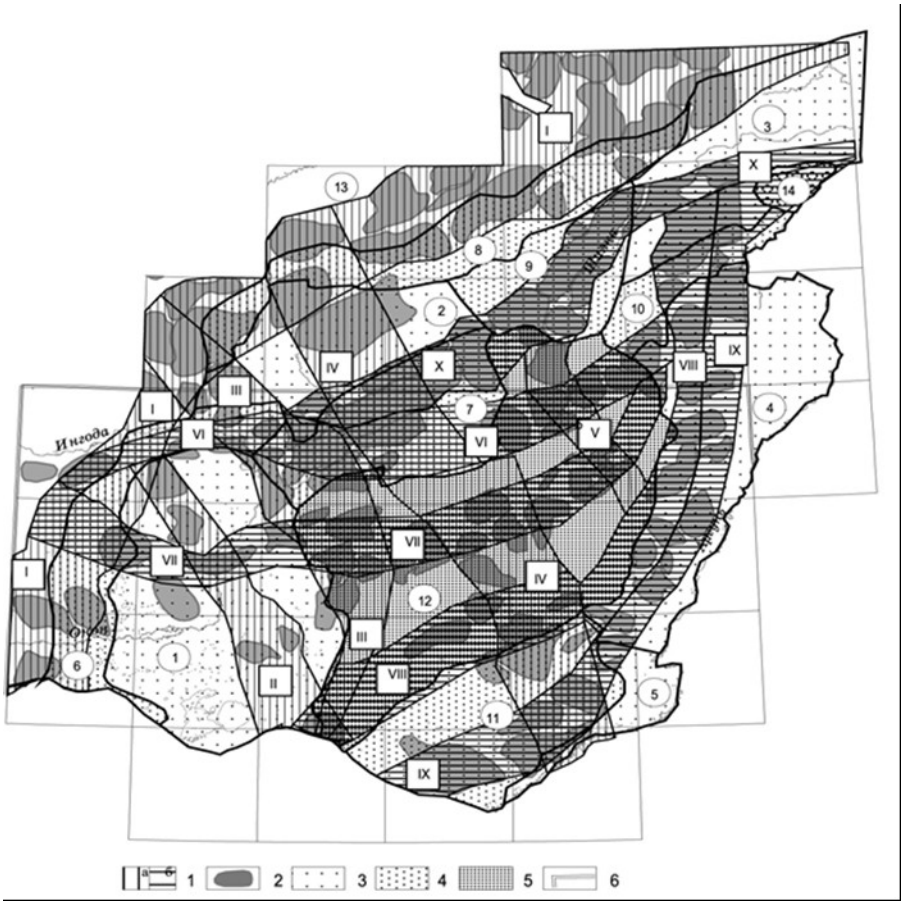


Fig. 2. Linear zones of tectonomagmatic reactivation of the Precambrian crystalline basement within regional crustal structures of southeastern Transbaikalia:

1 – zones of tectonomagmatic activation: submeridional (a), and sublatitudinal to submeridional (b) orientations, refined by extension fields; 2 – ore clusters; 3–5 – megablocks with average roof depths of the diorite-metamorphic layer, km: 3 – 0–3; 4 – 5–6; 5 – 8–10 (based on G.A. Genko and Yu.A. Filipchenko); 6 – map sheet boundary M-50.

The architecture of the Eurasian continent's surface is shaped by several relatively young regional faults of the Alpine geotectonic cycle. The morphostructure of this cycle reflects the Earth's internal state, recent geodynamic processes, and their interactions with cosmic and exogenous phenomena (Ufimcev, 2004). These processes are best revealed in the features of modern river networks. While the metallogenic characteristics of strike-slip faults are not detailed, in Eastern Siberia the Argun-Huang He-Yamztsyn fault, adjacent to the TPR, is noted for its genetic association with economic uranium and rare earth mineralization (e.g., Bayan Obo). These regional faults arise from intraplate sources of deep magmatism related to mantle plume formation within the continental crust.

Regional ore-controlling structures include the East Transbaikalian Proterozoic astrobleme (90 km²)—one of the largest on the planet—and several sublatitudinal, likely transform ore-controlling

faults. The astrobleme serves as a trigger for endogenic ore formation in one of Russia's major metallogenic regions. The ring-block structure of the crust down to depths of 15–20 km points to the development of an impact structure, manifesting in the systematic spatial distribution of numerous polymetallic deposits of 45 ore formation types derived from impact-magmatic, impact-hydrothermal, and impact-metamorphic genetic processes (Pavlenko, 2021). These are associated with Mesozoic crustal oceanization. The astrobleme hosts a system of 9 fluid-conductive zones formed along impact faults. Intersections and junctions of these zones, possessing exceptional depth and permeability for ore-forming fluids, are where ore deposits localize—forming ore districts (4th-order structures), ore clusters (5th-order), ore fields and deposits (6th and 7th orders respectively) (Fig. 2). Over 130 geological formations of various ages are identified in southeastern Transbaikalia, including 18 ore-generating and ore-forming types, rendering the metallogenic and ore formation data highly complex and ambiguously interpretable (Pavlenko, 2009). A recent earthquake and surface gas emissions in the area indicate ongoing endogenic activity and high permeability of fault systems. The astrobleme is associated with the gold-polymetallic–fluorite–uranium Argun and Aginsk subprovinces of the Mongol-Transbaikalian metallogenic province. Three metallogenic zones (regions) with 14 ore districts and 200 large, medium, and small deposits of 22 types of mineral resources are identified. The region's vast, yet poorly understood natural features establish it as one of Earth's unique metallogenic provinces. The history of its discovery, investigation, and development is a major asset for both Russia and the world. Eastern Transbaikalia and its astrobleme hold immense strategic, critical, and highly marketable mineral reserves, capable of sustaining national economic growth for many years.

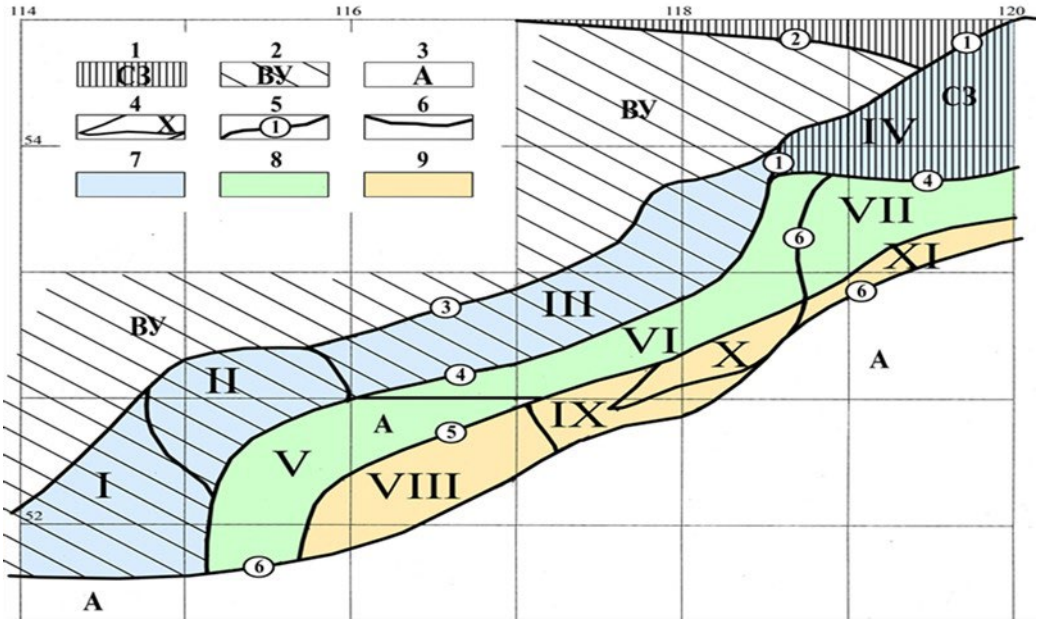


Fig. 3. Fault structures of the southwestern Prishilkinsky structural-formational complex:

1–3 – structural-formational zones: 1 – Western Stanovoy, 2 – Vitim-Uryum (Selenge-Vitim megablock), 3 – zones of the Amur geoblock; 4 – geological heterogeneity blocks; 5 – deep-seated faults: 1 – Tungiro-Mogotsky, 2 – Dzhilinda–Mogochinsky, 3 – Nerchinsko–Nerchugansky, 4 – Darasun–Mogochinsky (fragment of the Mongol-Ud suture), 5 – Mogocha–Bushuleysky, 6 – Mongol-Okhotsk with northern and eastern branches; 6 – other faults; 7–9 – tectonic plates: 7 – Northern (Darasun–Mogocha), 8 – Central (Mogocha–Bushuley), 9 – Southern (Mongol–Okhotsk).

Another practically significant element is a system of relatively local transform strike-slip faults in Eastern Siberia, directly related to the TPR zone (Fig. 1). Due to various geological factors, these feathering local faults evolved according to the tectonic environments of their regions. At the current stage, these faults cannot be classified as mature transform faults due to their underdevelopment. The most studied is the system of the Prishilkinsky structural-formational complex (SFC), located along the left bank of the Ingoda, Shilka, and Amur rivers (Fig. 3). This complex extends 850 km in length

and 100–130 km in width and hosts ore mineralization across six ore districts and 33 ore clusters representing 18 ore-bearing formations. The Prishilkinsky SFC is a major zone of tectonic movement concentration, polyphase metamorphism, hydrothermal-metasomatic, and magmatic activity (Pavlenko, 2017). It formed in a diverse tectonic setting at the junction of the Selenge-Yablonovo fold system, the Mongol-Okhotsk fold belt, and the Aldan-Stanovoy Shield—major parts of the Baikal, Amur, and Aldan-Stanovoy lithospheric blocks. This geologic phenomenon contributed to the development of a rich assortment of mostly critical mineral deposits, attracting generations of geologists. The system formed as a thrust-stack structure, with crystalline rocks of the northern block thrust over the southern block. The thrust planes dip northwestward at angles of 15–75°. Quartz and quartz-tourmaline metasomatites developed along tectonites, often accompanied by Late Mesozoic quartz dikes and veins, occasionally mineralized.

Approximately a dozen feathering local “riftogenic” strike-slip faults hold significant practical interest for mineral exploration. Their diversity stems from heterogeneity in geological processes, productive formations, and many other factors—making interpretation a complex scientific challenge. Implementing AI technologies can significantly aid in developing universal models for predicting geological objects, training future geoscientists, improving educational programs, and enhancing resource management—thus contributing to a deeper understanding of the Earth.

1. Pavlenko Yu.V. East Transbaikalian Astrobleme. Bulletin of Transbaikal State University. 2021. Vol. 27, No. 8. P. 48–60.
2. Pavlenko Yu.V. Deep structure and metallogeny of Southeastern Transbaikalia. Chita: Chita State University, 2009. 200 p.
3. Pavlenko Yu.V. Prishilkinsky metallogenic zone of Eastern Transbaikalia and Upper Priamurye: monograph. Chita: Zabaikal State University, 2017. 155 p.
4. Pushcharovsky Yu.M. Tectonics of oceans. Plate tectonics. Planet Earth. Encyclopedia. Vol. Tectonics and Geodynamics. Eds. Krasny L.I., Petrov O.V., Blyuman B.A. St. Petersburg: VSEGEI, 2004. P. 226–232.
5. Suvorov A.I. Suture zones. Plate tectonics. Planet Earth. Encyclopedia. Vol. Tectonics and Geodynamics. Eds. Krasny L.I., Petrov O.V., Blyuman B.A. St. Petersburg: VSEGEI, 2004. P. 638–639.
6. Ufimcev G.F. Earth’s morphostructure. Plate tectonics. Planet Earth. Encyclopedia. Vol. Tectonics and Geodynamics. Eds. Krasny L.I., Petrov O.V., Blyuman B.A. St. Petersburg: VSEGEI, 2004. P. 55–59.
7. Sherman S.I. (ed.) Transasian Continental Zone. East Siberian Branch, Siberian Division, USSR Academy of Sciences. Irkutsk, 1978. 52 p.

Фанерозойские магматические комплексы и металлогения Аргунского блока (ЮВ Забайкалье, Китай, Монголия)

Петров В.А., Андреева О.В., Кайгородова Е.Н., Козловский А.М.
ИГЕМ РАН, drvladpetrov@mail.ru

Аргунский блок, как тектоническая и металлогеническая структура, входит в состав Центрально-Азиатского подвижного пояса (ЦАПП), включая в себя территории России (ЮВ Забайкалье), части СВ Китая и Восточной Монголии. Этот важный горнорудный регион всегда привлекал внимание многочисленных исследователей, но одно из ведущих мест принадлежит трудам академика С.С. Смирнова. На примере Восточного Забайкалья им было выдвинуто и обосновано понятие о рудных поясах (с северо-запада на юго-восток: золото-молибденовый, олово-вольфрамовый и полиметаллический), и было показано, что каждый из них обладает свойственным только ему геологическим строением и характером проявления магматизма, а неоднократно проявленные стадии минерализации происходили на фоне вспышек разномасштабного трещинообразования с преимущественно северо-восточным простиранием региональных разрывов (Смирнов, 1944). Поскольку в 40-х годах XX века изотопное датирование по существу отсутствовало, в дальнейшем эта первичная схема неоднократно подвергалась уточнениям, которые детализировали первоначальную поясовую схему. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных магматизму и металлогении этого региона, почти все они ограничены пределами упомянутых государств и не имеют трансграничного характера. Предлагаемый нами доклад представляет первую попытку совокупного анализа тектоно- и флюидно-магматических проявлений на территории Аргунского блока, имея в виду тот объем минералого-геохимических, изотопных и изотопно-геохронологических данных, которые получены исследователями трех стран.

Наш подход состоит в том, что эволюция сопряженных процессов в геологической истории формирования магматических комплексов Аргунского блока и их металлогеническая специализация рассматривается через призму пяти крупных тектоно-магматических циклов (ТМЦ): неопротерозойского (завершился около 600 млн лет назад), сформировавшего фундамент блока, каледонского (~520–410 млн лет назад), герцинского (~360–220 млн лет назад), раннемезозойского (220–170 млн лет) и позднемезозойского (~160–100 млн лет назад). Завершающий ТМЦ разделен на два события: средне-позднеюрское и позднеюрское-раннемеловое. Обоснование выделения ТМЦ в истории развития территории дано в (Петров и др., 2017).

В пределах Аргунского блока широко распространены неопротерозойские и палеозойские гранитоиды, мезозойские вулканические и интрузивные породы преимущественно среднего и кислого составов, часто с субщелочным уклоном. Неопротерозойские магматические образования в российской части в основном представлены кислыми породами (гранодиориты, кварцевые монцониты, граниты), а в зарубежной отмечены также габброиды, монцодиориты, монцониты, граниты. Протерозойские магматические породы относятся к известково-щелочной и субщелочной сериям, они, как правило, демонстрируют отрицательные аномалии Nb, Ta, P и Ti, но при этом характеризуются обогащением LREE относительно HREE, Pb, Cs и U. Породы каледонского ТМЦ, по данным китайских коллег, представлены средне-позднеордовикскими гранитоидами и габброидами (455-465 млн лет), но имеют крайне ограниченное распространение в ЮВ Забайкалье. Эти породы показывают значительное обогащение Ba, Th, U и обеднение HFSE (Nb, Ta, Ti, P, Y).

Интенсивность проявления магматических и рудно-метасоматических процессов в позднем палеозое заметно возрастает, что связано с обширными внедрениями гранитоидов позднепермского возраста, которые в ЮВ Забайкалье (ундинский комплекс) занимают значительные площади. Они также широко развиты на территории Монголии, но гораздо слабее в китайской части Аргунского блока. Для ундинских гранитов фундамента Стрельцовской кальдеры U-Pb-методом по циркону получены оценки возраста в 244±2 и

255±1 млн лет. Однако, проявления рудной минерализации в связи с обоими палеозойскими ТМЦ невелики и не играют существенной роли в общей металлогении региона.

Тектоно-магматическая активность триас-раннеюрского времени ознаменовала начало эпохи активного рудообразования в регионе. Раннемезозойский (триас-ранняя юра) ТМЦ проявлен на территории Аргунского блока неравномерно, на российской его части магматизм этого времени проблематичен и плохо подтвержден изотопно-геохронологическими данными. В китайской части Аргунского блока интрузивные породы раннего и среднего триаса представлены широким диапазоном от габбро до гранитов, в основном диоритами, кварцевыми диоритами, гранодиоритами, монцогранитами и сиеногранитами. К этому времени приурочено некоторое возрастание роли основного интрузивного магматизма. Раннеюрские вулканические породы в Аргунском блоке представлены в основном высококалиевыми известково-щелочными трахибазальт-базальтами, базальтовыми андезитами и андезитами, а риолиты присутствуют только спорадически. Для всех магматических пород характерно обогащение LREE, отсутствие Eu-аномалии, отрицательные Ta и Nb аномалии, положительные аномалии Pb, Cs, Sr. В китайской части Аргунского блока в ассоциации с жильными и экструзивными грано- и сиенитогранитами известны весьма крупные месторождения Cu-Mo порфирового типа (Вунугетушань, Бадагуань, Тайпинчуань и др.) возрастом 226-180 млн. лет. В ЮВ Забайкалье месторождения этого возраста немногочисленны и, в основном, локализованы в скарнах, где относительно них имеют наложенный характер (месторождения Кличкинского рудного поля, Железный Кряж, Андрюшкинское и др.).

Наиболее интенсивные проявления магматизма и рудообразования связаны с завершающим позднемезозойским ТМЦ (позднеюрское-раннемеловое время). В ЮВ Забайкалье подавляющая часть рудных месторождений сформировалась в очень короткий промежуток времени приблизительно между 170$\underline{+}$5 и 130$\underline{+}$5 млн лет. Рудные месторождения этих рядов сосредоточены в определенных металлогенических поясах и тектонических блоках, формируя в целом линейно-поясовую картину со сложным мозаично-блоковым наполнением. Месторождения J3-K1 возраста группируются соответственно этим поясам в следующие ассоциации: Mo-Cu-Au с возрастом 163-144 млн. лет; Pb-Zn-Ag-Au 144-135 млн. лет; Sn-W-Li-Ta-Nb-Be 145-134 млн. лет; U-CaF_2 около135 млн. лет.

В целом, Аргунский блок, судя по петрогеохимическим особенностям вулкано-плутонических комплексов, имеет сложную историю развития, которое в позднем мезозое определялось, вероятно, существованием смешанного геодинамического режима: остаточного коллизионного с интенсивными тектоническими деформациями в условиях сжатия, и менее напряженного рифтогенного. С этими контрастными обстановками связано формирование двух магматических серий и взаимосвязанных с ними групп рудных месторождений и семейств метасоматитов.

В подвижных участках остаточной коллизии в условиях повышенной магмато-флюидной проницаемости земной коры мог происходить быстрый подъем магматических масс и формирование цепочек вулканических кальдер, осадочно-вулканогенных прогибов и внедрение интрузивных тел субщелочного гранитоидного шахтаминского комплекса так называемого магнетитового типа (Бескин, Алексеева, 2016). На поздних стадиях развития этих поясов происходили массовые излияния и субвулканические экструзии кислых дифференциатов магматической латитовой (Таусон, 1982) серии в виде потоков лав, игнимбритов и разнообразных субвулканических тел. Крупные промышленные месторождения U, Pb, Zn, Au, Ag, Cu, Mo и флюорита отчетливо тяготеют к этим вулканическим поясам (Стрельцовское и Дорнотское рудные поля) и жильным дериватам средне-позднеюрских гранитоидов (месторождения Шахтаминское, Бугдаинское, Цав в Восточной Монголии, серия Ag- и Au-Pb-Zn месторождений китайской части Аргунского блока), то есть к областям проявления контрастного (бимодального) вулканизма и повышенной флюидно-магматической проницаемости. Для локализованных в этих зонах месторождений характерен широкий спектр метасоматитов (от скарнов до аргиллизитов

разных фаций) при отсутствии грейзенов. Низкотемпературные метасоматиты (березиты и гидрослюдизиты) сопутствуют большинству из известных в регионе и на сопредельных территориях Китая и Монголии месторождений и создают обширные ареалы гидротермальных преобразований, которые совпадают с полиметаллическим, золото-молибденовым и уран-флюоритовым поясами Аргунского блока на территории ЮВ Забайкалья (Андреева и др., 2020). С некоторым временным лагом (10-20 млн лет) относительно внедрения гранитоидов шахтаминского комплекса в более стабильных и жестких блоках земной коры, где в условиях растяжения проявлена рифтогенная стадия развития территории, последовательная магматическая дифференциация гранитоидных магм привела к формированию редкометальных гранитов, в том числе Li-F типа, а также малоглубинных экструзий онгонитов и онгориолитов (Коваленко, 1977), относящихся к кукульбейскому комплексу. Редкометальные гранитоиды кукульбейского комплекса локализованы в участках консолидированной коры, которые характеризуются пониженными значениями силы тяжести и спокойными отрицательными величинами магнитного поля (Лишневский, Бескин, 1994). Интенсивное развитие в массивах кукульбейского комплекса метасоматитов грейзеновой формации объясняется, видимо, высокими содержаниями HF во флюидах лейкократовых гранитов, что и обеспечило их высокую кислотность. Имея в виду относительно стабильные геотектонические режимы формирования редкометальных гранитных интрузий, можно предполагать, что кристаллизация этих гранитоидов происходила в условиях тектонически слабо нарушенной среды. Это предотвращало в большинстве случаев быстрое проникновение флюидов во вмещающие породы и смешение их с метеорными водами.



Рис. 1 Принципиальная схема распространения магматизма, оруденения и околорудного метасоматоза в позднемезозойских структурах Аргунского блока (для территории ЮВ Забайкалья).

Таким образом, на территории Аргунского блока в течение позднемезозойского ТМЦ выявлены две ветви развития магматических и рудообразующих процессов, и, соответственно, два тренда гидротермальных преобразований (рис.). Одна ветвь, проявленная в подвижных

проницаемых зонах с остаточным режимом коллизии, ассоциирует с посторогенным магматизмом окисленного (или магнетитового) типа (гранитоиды шахтаминского комплекса, бимодальные субщелочные комплексы эффузивов шадоронской и приаргунской серий). Здесь на рудных месторождениях проявлена вся последовательность метасоматитов кроме грейзенов: от наиболее высокотемпературных скарнов и калишпатовых ореолов порфировых Cu-Mo месторождений до низкотемпературных фаций аргиллизитов. Другая ветвь, связанная с редкометальными гранитами (кукульбейский комплекс), представлена в основном грейзенами при подчиненном развитии березитов и аргиллизитов. Флюидно-магматические системы двух выделенных ветвей характеризуются своей металлогенической специализацией: с системой окисленного типа ассоциируют месторождения Pb, Zn, Au, Cu, Mo, U, Ag и флюорита, а с системой восстановленного типа (редкометальные граниты) связаны месторождения Ta, Nb, W, Sn, Be и, менее, флюорита.

Редкометальные Li-F граниты, аналогичные кукульбейским, и, соответственно, генетически связанные с ними Sn, W, Li, Ta, Nd, Be месторождения, пока не известны на китайской территории Аргунского блока. Вместе с тем на российской части блока остаются неясными масштабы проявлений T3-J1 магматизма, к которому приурочены крупные порфировые Cu-Mo месторождения Дербуганского пояса вдоль северо-западной границы Большого Хингана (Zhang et al., 2014; Mi et al., 2017; Wang et al., 2024).Отсутствие или слабое развитие магмато-гидротермальных процессов в триасе ЮВ Забайкалья, возможно, соответствует явлениям общего омоложения тектоно-магматических событий ЦАПП на северо-восток в сторону Тихого океана. Также не исключено, что «следы» магмато-гидротермальных процессов были редуцированы инверсией тектонических движений, вызванных перестройкой поля напряжений-деформаций в T3-J2 время (Delvaux et al., 1995). Эти вопросы трансграничной металлогении требуют дальнейшего изучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ №13.1902.24.44 (Соглашение № 075-15-2024-641).

1. Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Мезозойские кислые магматиты Юго-Восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76-104
2. Бескин С.М., Алексеева А.К. Медно-порфировое оруденение России: перспективы и площади. М.: Научный мир, 2016. 78 с.
3. Коваленко В.И. Петрология и геохимия редкометальных гранитов. Новосибирск: Наука, 1977. 205 с.
4. Лишневский Э.Н., Бескин С.М. Аномальное магнитное поле как фактор металлогенического районирования областей гранитоидного магматизма // Бюлл. МОИП. Отд. Геол. 1994. Т. 69. Вып. 5. С. 47-58.
5. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Тектоно-магматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445-469.
6. Смирнов С.С. Очерк металлогении Восточного Забайкалья. Л.: Госгеолиздат, 1944. 91 с.
7. Таусон Л.В. Геохимия и металлогения латитовых серий // Геология рудных месторождений. 1982. № 3. С. 3-14.
8. Delvaux D., Moeys R., Spatel G., Melnikov A., Ermikov V. Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics. 1995. Vol. 252. P. 61-101.
9. Mi K., Liu Z., Li C., Liu R., Wang J., Peng R. Origin of the Badaguan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, isotope geochemistry and geochronology // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 81. Part 1. P. 154-172.
10. Wang Q., Yang Y., Fu Q., Zhang Z., Guo X., Wu T., Chai L., Zhou Y., An Y. Origin and geological implications of monzogranites and rhyolitic porphyries in the Wunugetu porphyry

copper-molybdenum deposit, Northeast China: Evidence from zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry // Minerals. 2024. Vol. 14. 310. P. 1-21
11. Zhang L., Gao B., Li W., Chen Z., Asamoah Sakyi P., Jin X. Early Mesozoic tectono-magmatic activity and mineralization in Northeast China: evidence from Re-Os to U-Pb studies of the Taipingchuan porphyry Cu-Mo deposit in the Derbugan metallogenic belt // International Geology Review. 2014. Vol. 56. Iss. 15. P. 1837-1851.

*Phanerozoic Magmatic Complexes and Metallogeny of the Erguna Block (SE Transbaikalia, China, Mongolia)

Petrov V.A., Andreeva O.V., Kaigorodova E.N., Kozlovsky A.M.
IGEM RAS, drvladpetrov@mail.ru

The Erguna Block, as a tectonic and metallogenic structure, forms part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), encompassing territories of southeastern Transbaikalia in Russia, northeastern China, and eastern Mongolia. This important metalliferous region has long attracted the attention of many researchers, with the foundational concept of ore belts proposed by academician S.S. Smirnov. Based on the example of eastern Transbaikalia, he identified and substantiated three NW–SE-trending ore belts—gold-molybdenum, tin-tungsten, and polymetallic—each characterized by distinct geological structures, magmatic associations, and episodic mineralization stages associated with recurrent NE-trending fracturing and regional faulting (Smirnov, 1944). Due to the absence of isotopic dating techniques in the 1940s, this initial belt model has undergone multiple refinements, improving its resolution. Despite the abundance of research on the magmatism and metallogeny of this region, most studies are constrained within national borders and lack cross-border synthesis. This report represents the first attempt to provide an integrated analysis of tectono- and fluid-magmatic processes across the entire Erguna Block using mineralogical-geochemical, isotopic, and geochronological data collected by researchers from all three countries.

Our approach views the evolution of magmatic complexes and their metallogenic specialization within the Erguna Block through the framework of five major tectono-magmatic cycles (TMC): Neoproterozoic (ending ~600 Ma, forming the basement), Caledonian (~520–410 Ma), Hercynian (~360–220 Ma), Early Mesozoic (220–170 Ma), and Late Mesozoic (~160–100 Ma). The final TMC is subdivided into Middle–Late Jurassic and Late Jurassic–Early Cretaceous stages, as justified in Petrov et al. (2017).

The Erguna Block hosts extensive Neoproterozoic and Paleozoic granitoids, and predominantly intermediate to felsic Mesozoic volcanic and intrusive rocks, often with subalkaline tendencies. Neoproterozoic rocks in the Russian segment consist mainly of felsic varieties (granodiorites, quartz monzonites, granites), while the foreign segments also feature gabbroids, monzodiorites, and monzonites. These magmatic rocks belong to calc-alkaline and subalkaline series, typically showing negative anomalies in Nb, Ta, P, and Ti, and enrichments in LREE relative to HREE, as well as in Pb, Cs, and U. Caledonian magmatism, well-characterized in Chinese studies, includes Middle–Late Ordovician granitoids and gabbroids (455–465 Ma) but is scarcely present in southeastern Transbaikalia. These rocks are enriched in Ba, Th, and U and depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti, P, Y).

Magmatic and ore-related processes intensified during the Late Paleozoic, marked by widespread intrusion of Late Permian granitoids, particularly the Undinsky complex in southeastern Transbaikalia and analogous rocks in Mongolia (less prominent in China). Zircon U–Pb dating of granites from the basement of the Streltsovka caldera yielded ages of 244 ± 2 and 255 ± 1 Ma. However, mineralization linked to Paleozoic TMCs is generally limited and of minor metallogenic significance.

A major metallogenic epoch commenced with Triassic–Early Jurassic tectono-magmatic activity. The Early Mesozoic TMC (Triassic–Early Jurassic) is unevenly developed across the Erguna Block; its presence in Russian Transbaikalia is poorly supported by isotopic-geochronological data. In contrast, the Chinese segment contains a broad array of Triassic intrusive rocks, from gabbros to granites, dominated by diorites, quartz diorites, granodiorites, monzogranites, and syenogranites. This period saw a relative increase in mafic magmatism. Early Jurassic volcanic rocks include high-K calc-alkaline trachybasalt–basaltic andesites, andesites, and rare rhyolites. These rocks exhibit LREE

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

enrichment, no Eu anomaly, negative Ta and Nb anomalies, and positive Pb, Cs, and Sr anomalies. In China, major porphyry Cu–Mo deposits (e.g., Wunugetushan, Badaguan, Taipingchuan) dated at 226–180 Ma are associated with vein and extrusive granitic rocks. In southeastern Transbaikalia, mineralization of this age is limited and mostly overprinted in skarn deposits (e.g., deposits in the Klichkinsky ore field, Zhelezny Krazh, Andryushkinskoye).

The most intense magmatic and metallogenic events occurred during the Late Mesozoic TMC (Late Jurassic–Early Cretaceous). Most ore deposits in southeastern Transbaikalia formed within a narrow timeframe of ~170 ± 5 to 130 ± 5 Ma. These deposits cluster in distinct metallogenic belts and tectonic blocks, outlining a linear-belt pattern with a complex mosaic-block structure. Deposits dated to J3–K1 are classified into the following associations: Mo–Cu–Au (163–144 Ma); Pb–Zn–Ag–Au (144–135 Ma); Sn–W–Li–Ta–Nb–Be (145–134 Ma); U–CaF_2 (~135 Ma)

The Erguna Block exhibits a complex developmental history, and during the Late Mesozoic it likely experienced a mixed geodynamic regime: residual collisional with high tectonic stress and compressive deformation, alongside a more relaxed riftogenic environment. These contrasting settings led to the formation of two magmatic series and associated ore deposit types and metasomatic assemblages.



Fig. 1. Conceptual model of magmatism, mineralization, and associated metasomatism in Late Mesozoic structures of the Erguna Block (SE Transbaikalia).

In mobile, permeable collisional zones, rapid magma ascent formed volcanic calderas, sedimentary-volcanic depressions, and intrusions of subalkaline granitoids from the magnetite-type Shakhtaminsky complex (Beskin, Alekseeva, 2016). Later, massive extrusions of evolved felsic magmas (latite series; Tauson, 1982) occurred as lava flows, ignimbrites, and subvolcanic bodies. Large deposits of U, Pb, Zn, Au, Ag, Cu, Mo, and fluorite are spatially associated with these volcanic belts (e.g., Streltsovka and Dornot fields) and subvolcanic derivatives of Middle–Late Jurassic granitoids (e.g., Shakhtaminskoye, Bugdainskoye, Tsav in eastern Mongolia, and Ag- and Au–Pb–Zn deposits in the Chinese Erguna Block). These are typified by bimodal volcanism, high fluid-magma permeability, and metasomatic zones (from skarns to various argillic facies), but lacking

greisens. Low-temperature metasomatites (beresites, hydromuscovite rocks) commonly accompany regional deposits in Russia, China, and Mongolia, forming broad hydrothermal alteration halos that coincide with the polymetallic, Au–Mo, and U–fluorite belts of the Erguna Block (Andreeva et al., 2020). With a time lag of 10–20 Ma following the Shakhtaminsky intrusions, continued granitic differentiation in more stable crustal blocks during rifting produced rare-metal granites, including Li–F types and shallow extrusives (ongonites, ongorhyolites) of the Kukulbey complex. These granites occur in consolidated crustal domains characterized by negative gravity anomalies and subdued magnetic fields (Lishnevsky, Beskin, 1994). The intense greisen development in Kukulbey granites likely results from HF-rich fluids, giving them high acidity. These relatively stable geotectonic regimes inhibited fluid penetration and mixing with meteoric waters, preserving magmatic signatures.

In summary, the Late Mesozoic TMC of the Erguna Block displays two distinct evolutionary trends in magmatism and ore formation, each with its own hydrothermal overprint (see Fig. 1). The first, in permeable mobile zones under residual collisional settings, features oxidized (magnetite-type) post-orogenic magmatism (Shakhtaminsky granitoids, bimodal Shadoronskaya and Priargunskaya effusives), and ore-related metasomatism (skarns, K-feldspar zones, argillic alterations). The second, associated with rare-metal granites of the Kukulbey complex, features dominant greisens with subordinate beresites and argillic alterations. These two fluid–magmatic systems exhibit distinct metallogenic specializations: The oxidized system hosts deposits of Pb, Zn, Au, Cu, Mo, U, Ag, and fluorite; The reduced (rare-metal granite) system is associated with Ta, Nb, W, Sn, Be, and to a lesser extent, fluorite.

Li–F rare-metal granites akin to the Kukulbey complex, and their associated Sn, W, Li, Ta, Nd, Be deposits, have not yet been identified in the Chinese Erguna Block. Conversely, the extent of T3–J1 magmatism in Russian Transbaikalia remains unclear—this magmatism is linked to major porphyry Cu–Mo deposits along the NW boundary of the Greater Khingan Belt (Zhang et al., 2014; Mi et al., 2017; Wang et al., 2024). The scarcity or absence of Triassic magmatic–hydrothermal activity in southeastern Transbaikalia may reflect a general northeastward rejuvenation of tectono-magmatic events within the CAOB toward the Pacific. Alternatively, tectonic inversion and stress-field reorganization during T3–J2 (Delvaux et al., 1995) may have obliterated earlier signs. These issues in transboundary metallogeny merit further investigation.

This study was supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education, grant No. 13.1902.24.44 (Agreement No. 075-15-2024-641).

1. Andreeva O.V., Petrov V.A., Poluektov V.V. Mesozoic acidic magmatites of SE Transbaikalia: petrogeochemistry, metasomatism, and ore formation // Geology of Ore Deposits. 2020. Vol. 62. No. 1. P. 76–104.
2. Beskin S.M., Alekseeva A.K. Porphyry copper mineralization of Russia: prospects and target areas. Moscow: Nauchny Mir, 2016. 78 p.
3. Kovalenko V.I. Petrology and geochemistry of rare-metal granites. Novosibirsk: Nauka, 1977. 205 p.
4. Lishnevsky E.N., Beskin S.M. Anomalous magnetic field as a metallogenic zoning factor in granitoid magmatism areas // Bull. MOIP. Geol. Sect. 1994. Vol. 69. Issue 5. P. 47–58.
5. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. Tectono-magmatic cycles and geodynamic environments of ore-forming systems in Southern Priargunye // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59. No. 6. P. 445–469.
6. Smirnov S.S. Outline of the metallogeny of Eastern Transbaikalia. Leningrad: Gosgeolizdat, 1944. 91 p.
7. Tauson L.V. Geochemistry and metallogeny of latite series // Geology of Ore Deposits. 1982. No. 3. P. 3–14.
8. Delvaux D. et al. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics. 1995. Vol. 252. P. 61–101.

9. Mi K. et al. Origin of the Badaguan porphyry Cu–Mo deposit, Inner Mongolia, NE China // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 81. Part 1. P. 154–172.
10. Wang Q. et al. Origin and geological implications of monzogranites and rhyolitic porphyries in the Wunugetu Cu–Mo deposit, NE China // Minerals. 2024. Vol. 14. No. 310. P. 1–21.
11. Zhang L. et al. Early Mesozoic tectono-magmatic activity and mineralization in NE China // International Geology Review. 2014. Vol. 56. Issue 15. P. 1837–1851.

Опыт визуализации временных металлогенических рядов (на примере ЮВ Забайкалья)

Петров В.А., Устинов С.А., Минаев В.А., Нафигин И.О., Гришков Г.А.
ИГЕМ РАН, drvladpetrov@mail.ru

Эволюция рудоносных геологических структур Аргунского блока в пределах ЮВ Забайкалья рассматривается нами в контексте смены геодинамических режимов пяти крупных тектоно-магматических циклов (ТМЦ): неопротерозойского (завершился около 600 млн лет назад), сформировавшего фундамент блока, каледонского (~520–410 млн лет назад), герцинского (~360–220 млн лет назад), раннемезозойского (220–170 млн лет) и позднемезозойского (~160–100 млн лет назад). С позднемезозойскими внутриплитными активизационными процессами связано формирование субщелочных магматитов шахтаминского комплекса с Au-, Cu-Mo-, Pb-Zn-Ag-металлогенической специализацией, вулканоплутонических комплексов кальдерных построек с Mo-U-, Pb-Zn и флюоритовыми рудами, и редкометальных гранитов кукульбейского комплекса с Sn-W-Li-Ta спектром минерализации (Петров и др., 2017).

Важными задачами в рамках создания ГИС проекта размещения минеральных систем рудных месторождений в Аргунском блоке было установление, формализация и нормирование количественных параметров выделенных структурных критериев. Они представляют собой разнородные данные, включая положение и ориентировку линейных структур различных рангов, структуры центрального типа (Устинов и др., 2024), пространственно-геометрические и пространственно-плотностные параметры этих структур, области их динамического влияния и тектонофизические параметры, отражающие кинематику смещений и стиль деформаций на период рудообразования. Для каждого критерия было проведено определение функции принадлежности, которая характеризует интервал значений параметров от 0 до 1. Это необходимо в виду того, что количественные значения критериев находятся в различных интервалах, отличающихся друг от друга иногда на порядки. Соответственно, функция принадлежности позволяет провести «нормирование» полученных значений и осуществить их корректное сравнение друг с другом. На основе экспертной оценки, анализа литературных и статистических данных для каждого критерия определены весовые коэффициенты. Они использованы для учета «важности» каждого критерия при оценке вероятности наличия рудного объекта.

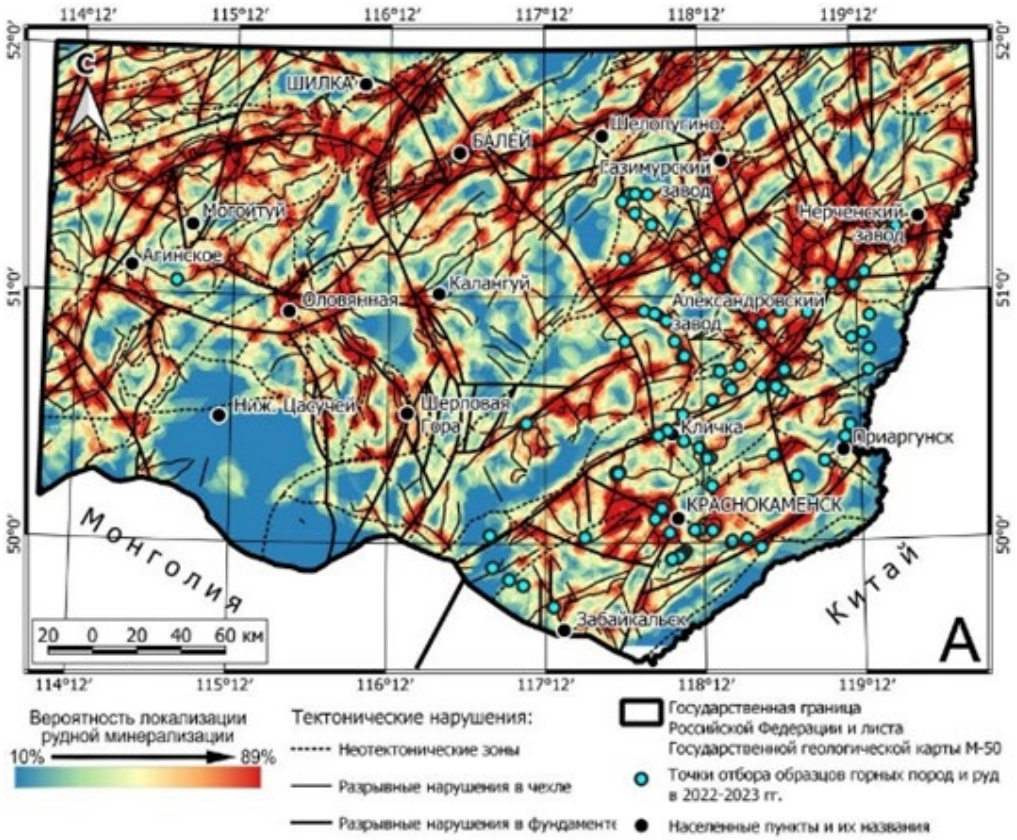


Рис. 1. Весовая структурная прогнозно-поисковая модель минеральных систем месторождений (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит) для территории ЮВ Забайкалья (лист ГГК М-50). Использована база данных по 1239 месторождениям и рудопроявлениям.

Итогом этой работы является комплексная структурная весовая прогнозно-поисковая модель территории ЮВ Забайкалья (рис. 1), для создания которой использована пространственная информация о морфогенетических параметрах обнаруженных и заверенных разрывных структур, результаты тектонофизической интерпретации их кинематики, а также обоснованные весовые коэффициенты.

Данная модель создает основу для проектирования прогнозно-минерагенических исследований на различные типы полезных ископаемых и легко может быть дополнена специализированной информацией о геофизических и геохимических полях и других данных в зависимости от искомого типа рудной минерализации.

Важным инструментом верификации региональной прогнозно-поисковой модели, помимо реконструированной структурно-тектонической обстановки, является анализ не только пространственного положения, но и времени формирования минеральных систем месторождений. В работе Б.Л. Рыбалова (2000) на основании обобщения материалов по металлогении ЮВ Забайкалья сделан вывод от том, что все развитые здесь месторождения позднемезозойской эпохи образуют три эволюционных ряда: золото-молибденовый (170±5-150±5 млн лет), редкометально-полиметаллически-урановый (140±5-130±5 млн лет) и фтор-золото-серебряный (120±5-110±5 млн лет). Рудные месторождения этих рядов сосредоточены в определенных металлогенических поясах и тектонических блоках.

Современные ГИС технологии позволяют визуализировать эти выводы. Для этого по выборке 1239 месторождений и рудопроявлений юго-восточного Забайкалья (лист ГГК М-50) была проведена работа по привязке выделенных Б.Л. Рыбаловым рядов с формированием тепловых карт размещения объектов (рис. 2).

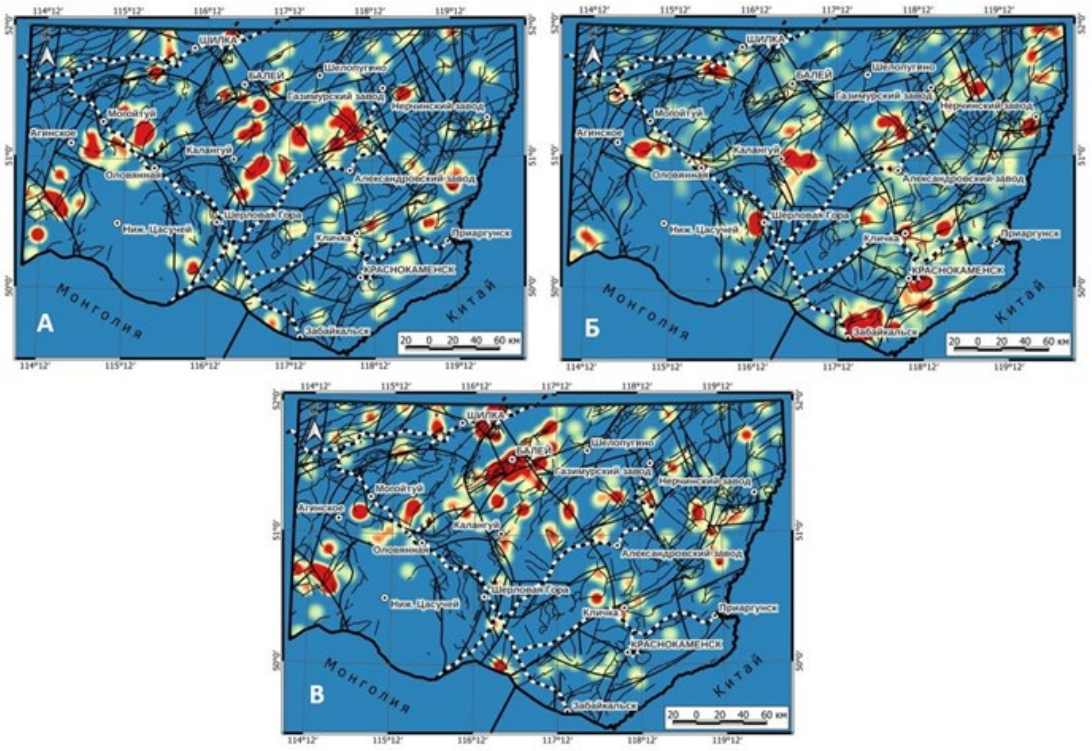


Рис. 2. Тепловые карты размещения рудных объектов золото-молибденового (А), редкометально-полиметаллически-уранового (Б) и фтор-золото-серебряного (В) рядов. Карты отражают пространственную плотность оруденения (количество рудных объектов на единицу площади по С.С. Смирнову). Красные области – максимальная плотность (сближенность) рудных объектов, синие области – отсутствие объектов. Для визуализации рассматривалось количество рудных объектов в окне радиусом 10 км.

Сравнительный анализ структур тепловых карт и весовой прогнозно-поисковой модели показывает их хорошую сходимость. Более того, сравнительный анализ распределения плотности рудных объектов эволюционных рядов, выделенных Б.Л. Рыбаловым, и схемы распределения кластеров, перспективных на рудную минерализацию, созданную на основе статистических методов обработки мультиспектральных характеристик рудосопровождающих метасоматитов и ГИС-моделирования с использованием алгоритмов нечеткой логики (Nafigin et al., 2022; Гришков и др., 2023, 2024; Petrov et al., 2025), также показывают хорошую сходимость. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что прогнозно-поисковая модель минеральных систем рудных месторождений в Аргунском блоке верифицирована как по пространственному, так и по временному параметрам. Наряду с этим совпадение в пространстве областей с максимальной плотностью рудных объектов, принадлежащих к различным эволюционным рядам, может указывать на наличие узлов долговременной циркуляции металлоносных флюидов с образованием минералообразующих систем месторождений с комплексными рудами.

Таким образом на основе моделей рудообразующих систем создан ГИС проект, в котором собраны и проанализированы обширные данные по геологии, металлогении, геодинамике, тектонике, минералогии, геохимии и структурно-геологическим особенностям Аргунского блока в пределах ЮВ Забайкалья. Полученные результаты позволили создать структурную весовую прогнозно-поисковую модель, отражающую наиболее перспективные площади для постановки прогнозно-минерагенических исследований масштаба 1:200000 – 1:50000. Целесообразность и перспективность использования этой модели подтверждается хорошей сходимостью со схемами пространственного распределения трех эволюционных рядов рудных месторождений позднемезозойского возраста, а также со схемами распределения мультиспектральных характеристик рудосопровождающих метасоматитов,

составленных по материалам дистанционного зондирования Земли. Данный поход целесообразно использовать для постановки прогнозно-минерагенических исследований на дефицитные виды стратегического минерального сырья в других регионах, включая территории со сложными климатическими и ландшафтными условиями, а также в прилегающих к ЮВ Забайкалью областях Китая и Монголии.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А. Разработка методики автоматического выделения линеаментов на основе нейросетевого подхода // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86-97.
2. Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Минаев В.А., Петров В.А. Подход к созданию пространственных прогнозно-поисковых моделей месторождений на основе сверточных нейронных сетей (на примере территории юго-восточного Забайкалья) // Наука и технологические разработки. 2024. Т. 103. № 2. С. 75-90
3. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Тектоно-магматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445-469.
4. Рыбалов Б.Л. Эволюционные ряды позднемезозойских рудных месторождений Восточного Забайкалья // Геология рудных месторождений. 2000. Том 42. № 4. С. 377-388.
5. Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Нафигин И.О., Яровая Е.В. Дешифрирование и интерпретация структур центрального типа на территории юго-восточного Забайкалья для прогноза рудообразующих систем // Геология рудных месторождений. 2024. Т. 66. № 4. С. 329-362.
6. Nafigin I.O., Ishmukhametova V.T., Ustinov S.A., Minaev V.A., Petrov V.A. Geological and mineralogical mapping based on statistical methods of remote sensing data processing of Landsat-8: a case study in the Southeastern Transbaikalia, Russia // Sustainability. 2022. Vol. 14 (9242). 25 p.
7. Petrov V.A., Ustinov S.A., Minaev V.A. Methodological aspects of predictive mineragenic studies using earth remote sensing data // Russian Journal of Earth Science. 2025. 25. ES3001. 14 p.

*Experience in Visualizing Temporal Metallogenic Series (Case Study: Southeastern Transbaikalia)

Petrov V.A., Ustinov S.A., Minaev V.A., Nafigin I.O., Grishkov G.A.
IGEM RAS, drvladpetrov@mail.ru

The evolution of ore-bearing geological structures within the Erguna Block in Southeastern Transbaikalia is considered in the context of changing geodynamic regimes across five major tectono-magmatic cycles (TMC): Neoproterozoic (culminating ~600 Ma), which formed the block's basement; Caledonian (~520–410 Ma); Hercynian (~360–220 Ma); Early Mesozoic (220–170 Ma); and Late Mesozoic (~160–100 Ma). The Late Mesozoic intraplate activation processes led to the formation of subalkaline magmatic rocks of the Shakhtaminsky Complex with Au-, Cu-Mo-, and Pb-Zn-Ag metallogenic specializations, volcanic-plutonic complexes of caldera structures associated with Mo-U, Pb-Zn, and fluorite ores, and rare-metal granites of the Kukulbey Complex with Sn-W-Li-Ta mineralization (Petrov et al., 2017).

A key task in developing the GIS-based project for mapping mineral systems of ore deposits in the Erguna Block was the establishment, formalization, and normalization of quantitative parameters for structural criteria. These include diverse data: positions and orientations of linear structures at various hierarchical levels, central-type structures (Ustinov et al., 2024), their spatial-geometric and spatial-density attributes, dynamic influence zones, and tectonophysical parameters that reflect the kinematics of displacements and deformation styles during ore formation. Each criterion was associated with a membership function ranging from 0 to 1, which normalized the varied numerical ranges and allowed for coherent comparison. Based on expert assessments, literature analysis, and statistical data, weighting coefficients were assigned to each criterion to reflect their relative importance in predicting the probability of ore occurrence.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

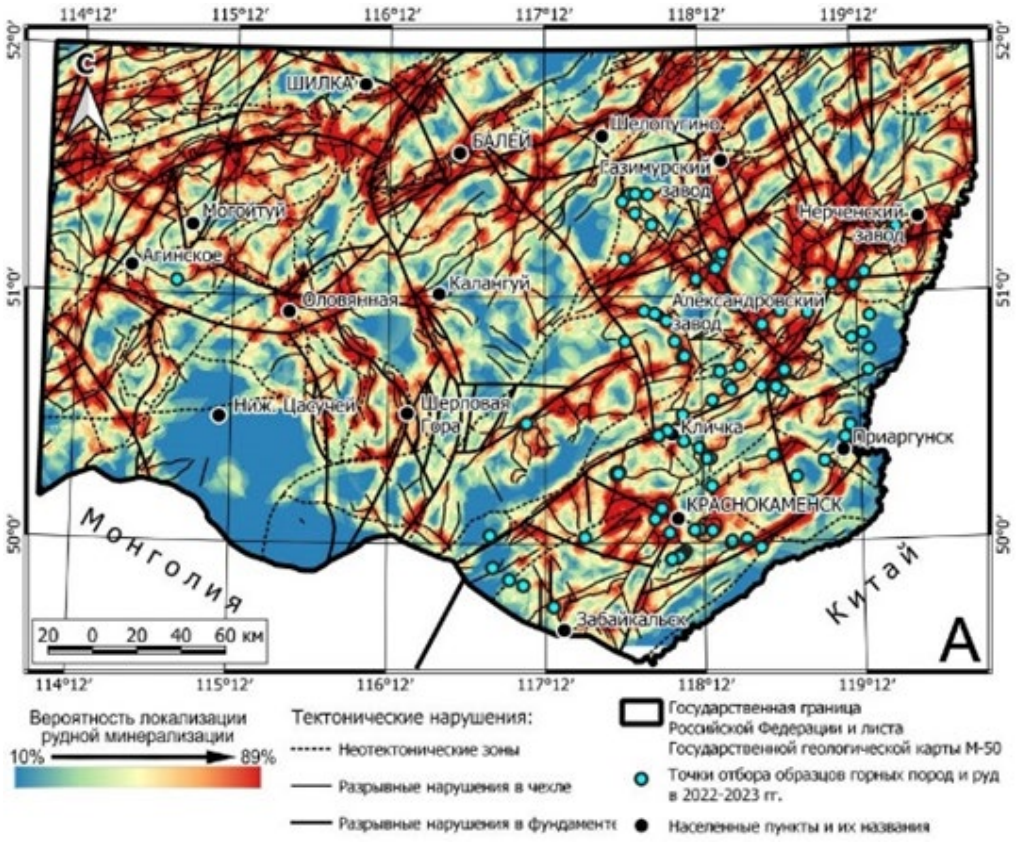


Fig. 1. Weighted structural predictive model of mineral systems for Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, and fluorite deposits in Southeastern Transbaikalia (1:1,000,000 map sheet M-50), based on a database of 1,239 deposits and occurrences.

The result was an integrated structural weighted predictive model for Southeastern Transbaikalia (Fig. 1), incorporating spatial data on morphogenetic parameters of verified fault structures, tectonophysical interpretation of fault kinematics, and justified weighting coefficients. This model provides a framework for designing predictive-metallogenic studies targeting various types of mineral resources and can be supplemented with geophysical, geochemical, and other data relevant to specific ore types.

A critical tool for verifying the regional predictive model—beyond the reconstructed structural-tectonic framework—is the analysis of not only the spatial but also the temporal parameters of mineral system formation. According to B.L. Rybalov (2000), all major deposits of Late Mesozoic age in Southeastern Transbaikalia fall into three evolutionary series: Gold-molybdenum (170±5 to 150±5 Ma), Rare-metal–polymetallic–uranium (140±5 to 130±5 Ma), and Fluorite–gold–silver (120±5 to 110±5 Ma).

The deposits of these series are localized within specific metallogenic belts and tectonic blocks.

Modern GIS technologies enable effective visualization of these findings. A spatial analysis was performed using the dataset of 1,239 deposits and occurrences in Southeastern Transbaikalia (map sheet M-50), generating heat maps for each of Rybalov's evolutionary series (Fig. 2).

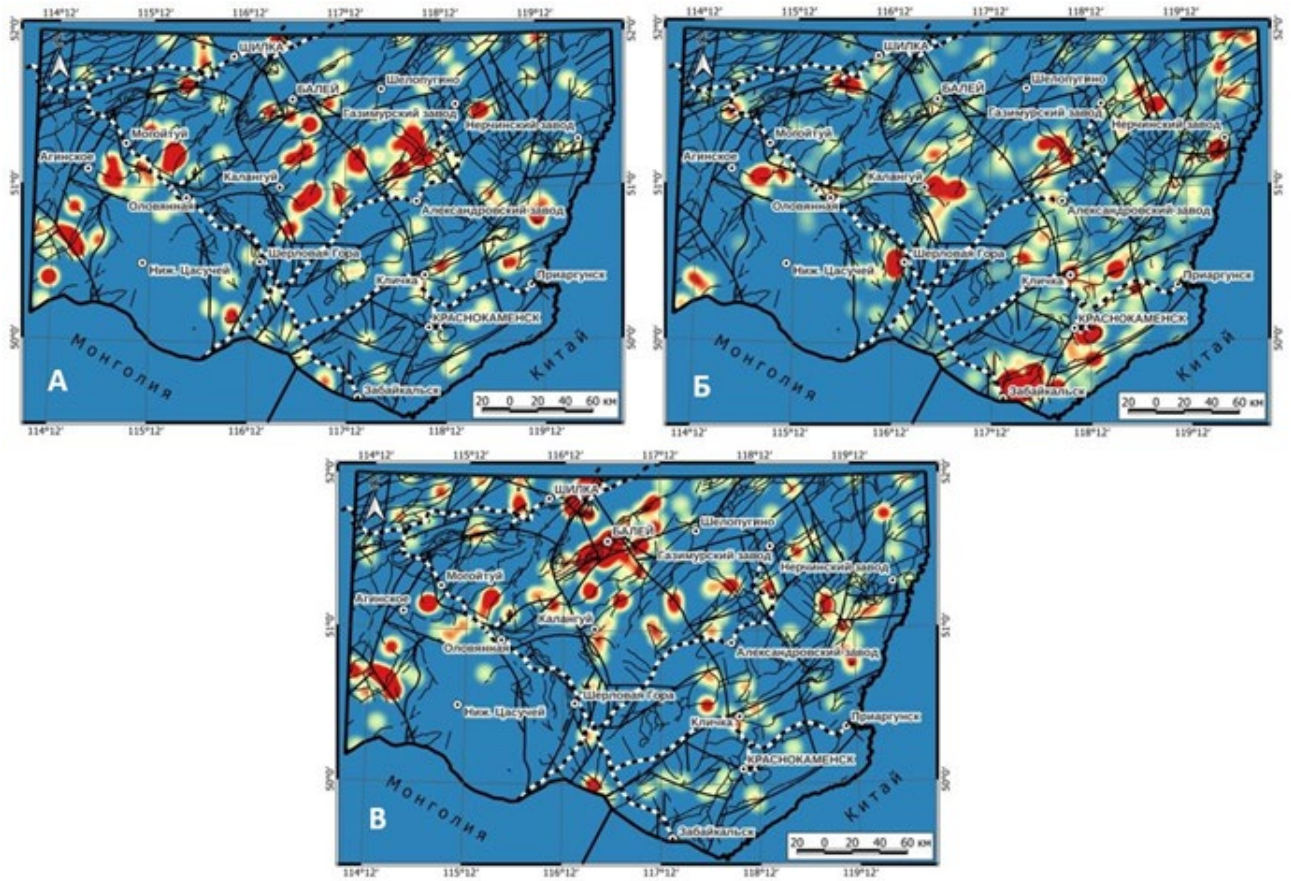


Fig. 2. Heat maps of deposit density for (A) gold-molybdenum, (B) rare-metal–polymetallic–uranium, and (C) fluorite–gold–silver evolutionary series. Red areas indicate high deposit density; blue areas indicate absence. Density calculated within a 10 km radius window.

A comparative analysis of the heat map patterns and the weighted predictive model shows good agreement. Furthermore, a comparison of deposit density distributions for the Rybalov series with cluster distribution models based on multispectral characteristics of ore-associated metasomatites and fuzzy logic–driven GIS modeling (Nafigin et al., 2022; Grishkov et al., 2023, 2024; Petrov et al., 2025) also demonstrates strong convergence. This confirms that the predictive model for mineral systems in the Erguna Block is validated in both spatial and temporal dimensions.

Additionally, spatial coincidence of high-density zones across different evolutionary series may indicate long-term metal-bearing fluid circulation nodes—mineral-forming systems with composite ore assemblages.

Based on these mineralization system models, a GIS project has been developed that compiles and analyzes extensive data on geology, metallogeny, geodynamics, tectonics, mineralogy, geochemistry, and structural geology of the Erguna Block in Southeastern Transbaikalia. The resulting structural weighted predictive model identifies the most promising areas for metallogenic studies at 1:200,000–1:50,000 scales. Its relevance and effectiveness are supported by its congruence with distribution patterns of Late Mesozoic ore evolutionary series and remote sensing–derived multispectral metasomatic features. This approach is recommended for predictive-metallogenic studies targeting critical strategic mineral resources in other regions, particularly those with harsh climate and terrain, as well as adjacent parts of China and Mongolia.

This work was supported by the state research program of IGEM RAS.

1. Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A. Development of a method for automatic lineament extraction using neural networks // Earth Research from Space. 2023. No. 6. P. 86–97.

2. Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Minaev V.A., Petrov V.A. Approach to creating spatial predictive models of mineral deposits using convolutional neural networks (case study: SE Transbaikalia) // Science and Technology Development. 2024. Vol. 103. No. 2. P. 75–90.
3. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. Tectono-magmatic cycles and geodynamic settings of ore-forming systems in South Priargunye // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59. No. 6. P. 445–469.
4. Rybalov B.L. Evolutionary series of Late Mesozoic ore deposits in Eastern Transbaikalia // Geology of Ore Deposits. 2000. Vol. 42. No. 4. P. 377–388.
5. Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Nafigin I.O., Yarovaya E.V. Deciphering and interpretation of central-type structures in Southeastern Transbaikalia for predicting ore-forming systems // Geology of Ore Deposits. 2024. Vol. 66. No. 4. P. 329–362.
6. Nafigin I.O. et al. Geological and mineralogical mapping using statistical methods of Landsat-8 remote sensing data: A case study from Southeastern Transbaikalia, Russia // Sustainability. 2022. Vol. 14 (9242). 25 p.
7. Petrov V.A., Ustinov S.A., Minaev V.A. Methodological aspects of predictive metallogenic research using Earth remote sensing data // Russian Journal of Earth Science. 2025. Vol. 25. ES3001. 14 p.

К вопросу о вертикальном и временном диапазоне эндогенного рудообразования (на примере минералообразующих систем урановых месторождений)

Петров В.А., Пэк А.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Мальковский В.И.,
Устинов С.А., Минаев В.А.
ИГЕМ РАН, drvladpetrov@mail.ru

Одни из основных выводов, изложенных в «Красной книге» за 2024 год (Uranium…, 2025), состоит в том, что до 2050 года и в последующий период запасов урана будет достаточно как для постоянного использования в ядерной энергетике, так и для ее роста, но для обеспечения наличия урана на рынке понадобятся серьезные и своевременные инвестиции в новые геологоразведочные работы, добычу и технологии переработки. Этот вывод в определенной мере оппонирует более ранним аналитическим документам (Energy…, 2022), согласно которым в период 2010-2020 гг. потребность в природном уране покрывалась добычей, с 2020 г. наметился дефицит уран-добывающих мощностей, а в дальнейшем вероятен сценарий снижения добычи и появление дефицита мощностей из-за вывода из эксплуатации рудников в связи с истощением запасов. Вне зависимости от прогнозов следует учитывать тот факт, что время от открытия месторождений до начала их освоения (карьер, шахта, подземное выщелачивание) неуклонно растет от 5-10 лет в 1950-1960-х годах до 20-40 лет сейчас.

Поэтому для обеспечения воспроизводства МСБ урана потребуется больше ресурсов особенно в части внедрения новых технологий поисков и разведки глубокозалегающих «скрытых» рудных тел. На это ориентированы прогнозно-минерагенические исследования (ПМИ) масштаба 1:200000-1:50000, которые следует отнести к новому виду среднемасштабных региональных работ (Машковцев, Петров, 2023). По своим задачам ПМИ отвечают существовавшим ранее общим поискам масштаба 1:50000, но по целеполаганию и методическим подходам существенно отличаются от них, т.к. направлены на выявление определенного геолого-промышленного типа месторождений. Это сопряжено с созданием геолого-генетических моделей, основанных на минерально-системном подходе, реализующим парадигму «источник → транспорт → отложение» с акцентом на изучение генезиса, состава и свойств рудоносных флюидов.

Известно, что концепция минеральных систем была предложена в работе (Wyborn et al., 1994) в качестве мультидисциплинарного подхода, ориентированного на анализ ключевых геологических факторов, обеспечивающих формирование и сохранность месторождений. Особое внимание при этом уделяется процессам мобилизации рудных компонентов из их источника, транспортирования и аккумуляции в более концентрированной форме, а также сохранности в последующей геологической истории. Методология минеральных систем используется при анализе условий формирования урановых месторождений различных генетических типов, сформированных в разнообразных геодинамических обстановках (Descriptive uranium…, 2020).

В приложении к металлогении урана она была сформулирована в (Skirrow et al., 2009) для группировки минеральных систем по параметрам, которые отражают общие черты в процессах формирования урановых месторождений. Основное внимание при этом было уделено условиям флюидного массопереноса. Однако практика применения этого подхода показала, что одной из нерешенных фундаментальных проблем уранового рудогенеза является часто наблюдаемое в ураноносных минеральных системах смешение рудообразующих флюидов магматогенной, метаморфогенной и метеорной природы. Так, например, в формировании крупнотоннажных месторождений вулканогенного типа, относимых к системам, связанным с магматизмом, принимают участие не только магматические и магмато-гидротермальные флюиды, но также метеорные и морские воды. Это «роднит» ураноносные вулканогенные минеральные системы (магматогенные) с осадочными и приповерхностными системами, включающими калькреты, месторождения песчаникового типа и типа структурных несогласий.

Определение причин и закономерностей, а также путей и условий перемещения рудоносных растворов напрямую связано с пространственно-временной реконструкцией тектонодинамических обстановок, благоприятных для локализации месторождений. Этот вопрос был сформулирован как один из ключевых в теории и практике учения о рудных месторождениях еще в середине прошлого века (Основные проблемы…, 1953). Тем не менее до настоящего времени одним из наиболее сложных и слабоизученных факторов остается флюидодинамическая обстановка рудообразования особенно в части гидродинамической связи между глубинными (рудоподводящими) и приповерхностными (рудораспределяющими и рудовмещающими) структурами минералообразующих систем месторождений. В одной из последних работ по данному вопросу (Chi et al., 2022) рассмотрены три типа систем: магмато-гидротермальные, структурно контролируемые гидротермальные с неопределенными источниками флюидов и гидротермальные, связанные с осадочными бассейнами. Показана роль т.н. «артериальных» (рудоподводящих) разломов, вдоль которых происходит «перекачка» рудоносных растворов из нижних в верхние части минералообразующих систем, в том числе за счет клапанного гидродинамического механизма течения внутриразломных рудоносных флюидов и соучастия в рудогенезе сейсмогеодинамических и термоконвективных процессов (Sibson, 2019).

В связи вопросом о вертикальном и временном диапазоне рудообразования следует опереться на работы специалистов Экспедиции № 1 ИГЕМ АН СССР по выяснению роли эндогенных и экзогенных факторов в формировании разновозрастных промышленных урановых руд в различных геодинамических обстановках. Результаты этих исследований являются не только крупным достижением в области создания теоретических основ уранового рудогенеза, но и основой для дальнейшей разработки вопросов о механизмах транспорта ураноносных флюидов в вертикальном и временном диапазонах с учетом солидарного развития флюидодинамических и сейсмогеодинамических процессов в сочетании с тепломассопереносом и структурообразованием под влиянием напорных флюидов. Этот подход, отраженный в ряде исследований авторов доклада (например, Петров и др., 2014, 2022; Пэк и др., 2020; Petrov et al., 2022, 2023 и др.), согласуется с представлениями о вариациях флюидопроницаемости пород, происходящих на фоне изменений их напряженно-деформированного состояния, вызванных сейсмогеодинамическими воздействиями (Sibson, 2019; Cox, 2020). Полагаем, что эти взаимосвязи обладают универсальным характером, т.к. проявляются не только в минеральных системах урановых месторождений различного генезиса, но и в месторождениях других полезных ископаемых (Злобина и др., 2020).

Детальный анализ результатов развиваемых в ИГЕМ РАН изысканий приводит к следующим выводам:

1. В настоящее время задача о вертикальном и временном диапазоне эндогенного рудообразования (на примере минералообразующих систем урановых месторождений) далека от своего решения;

2. Телескопированное проявление рудогенеза в одних и тех же «структурных ловушках» через значительные промежутки времени, измеряемые миллионами, а в случае месторождений несогласия – миллиардом лет, требует детальной реконструкции взаимосвязи структурообразующих и флюидодинамических процессов на основе комплекса современных методов и оборудования;

3. Минерально-системный подход к формированию геолого-генетических моделей урановых месторождений, реализующий парадигму «источник → транспорт →отложение», должен учитывать эволюцию в вертикальном и временном диапазонах путей и механизмов миграции рудоносных растворов в процессе солидарного развития флюидодинамических и сейсмогеодинамических процессов с учетом тепломассопереноса и структурообразования под влиянием напорных флюидопотоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Злобина Т.М., Петров В.А., Прокофьев В.Ю., Абрамов С.С., Котов А.А., Вольфсон А.А., Лексин А.Б. Сейсмогенная природа флюидодинамических структурных парагенезов Уряхского золоторудного поля (Северо-Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 4. С. 291-320.
2. Машковцев Г.А., Петров В.А. Пути совершенствования научно-методических основ поисковых работ на твердые полезные ископаемые // Сборник докладов «Актуальные проблемы поисковой геологии». 22-24.11.2022. М.: ФГБУ «ВИМС», 2023. С. 195-208.
3. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях / А.Г. Бетехтин, Ф.И. Вольфсон, А.Н. Заварицкий, Д.С. Коржинский, О.Д. Левицкий, В.А. Николаев. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 615 с.
4. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Влияние петрофизических свойств и деформаций пород на вертикальную зональность метасоматитов в ураноносных вулканических структурах (на примере Стрельцовской кальдеры, Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 2. С. 95-117.
5. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В. Ураноносные вулканогенные структуры: Стрельцовская (РФ), Сианшань (КНР) и МакДермитт (США). Сравнительный анализ петрологии кислых вулканитов и состава околорудных метасоматитов // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 7-36
6. Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Минеральная система урановых месторождений Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 36-54
7. Chi G., Xu D., Xue C., Li Z., Ledru P., Deng T., Wang Y., Song H. Hydrodynamic links between shallow and deep mineralization systems and implications for deep mineral exploration // Acta Geologica Sinica. 2022. Vol. 96(1). P. 1-25.
8. Cox S.F. The dynamics of permeability enhancement and fluid flow in overpressured, fracture-controlled hydrothermal systems // Reviews in Economic Geology. 2020. Vol. 21. P. 25-82.
9. Descriptive uranium deposit and mineral system models. IAEA, 2020. 328 p.
10. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. Vienna: IAEA, 2022. 148 p.
11. Petrov V.A., Pek A.A., Malkovsky V.I. Uranium sources and fluid transport in volcanic mineralized systems: an example of Streltsovka caldera, Russia with reflection on Dornot, Mongolia // Journal of Volcanology and Seismology. 2022. Vol. 16. No. 6. P. 472-497.
12. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. The character of magmatism, hydrothermal-metasomatic, and filtration-transport processes in uranium-bearing volcanic-related structures // Journal of Volcanology and Seismology. 2023. Vol. 17. No. 5. P. 353-373.
13. Sibson R.H. Arterial faults and their role in mineralizing systems // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. P. 2093-2100.
14. Skirrow R.G., Jaireth S., Huston D.L., Bastrakov E.N., Schofield A., van der Wielen S.E., Barnicoat A.C. Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework // Geoscience Australia Record. 2009/20. 2009. 44 p.
15. Uranium 2024: Resources, Production and Demand. OECD NEA, Rep. No. 7683. 2025. 608 p.
16. Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // AusIMM Publication Series 4/94. 1994. P. 109-115.

*On the Vertical and Temporal Range of Endogenous Ore Formation (Case Study of Mineral-Forming Systems of Uranium Deposits)

Petrov V.A., Pek A.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V., Malkovsky V.I., Ustinov S.A., Minaev V.A.,
IGEM RAS, drvladpetrov@mail.ru

One of the main conclusions presented in the Red Book 2024 (Uranium..., 2025) is that uranium resources will be sufficient through 2050 and beyond to support both current and expanding nuclear power needs. However, ensuring uranium availability on the market will require serious and timely investment in exploration, mining, and processing technologies. This conclusion somewhat contradicts earlier analytical documents (Energy..., 2022), which suggested that during 2010–2020 uranium demand was met by production, yet from 2020 onward, a capacity shortfall emerged due to mine closures and resource depletion, indicating a possible long-term production decline.

Regardless of forecasts, the time lag from discovery to production startup (open-pit, underground mining, or in-situ leaching) is steadily increasing—from 5–10 years in the 1950s–1960s to 20–40 years today. Thus, ensuring the replenishment of uranium mineral-commodity resources (MCR) will require an emphasis on innovative exploration approaches, particularly those targeting deeply buried “blind” ore bodies. This is the focus of predictive metallogenic investigations (PMI) at scales of 1:200,000–1:50,000— a new type of mid-scale regional work (Mashkovtsev & Petrov, 2023). While PMI resembles traditional 1:50,000-scale general prospecting in terms of objectives, its goals and methodologies differ significantly, being aimed at identifying specific geological-industrial types of deposits using mineral system–based genetic models rooted in the "source → transport → deposition" paradigm, emphasizing the origin, composition, and properties of ore-forming fluids.

The concept of mineral systems was introduced by Wyborn et al. (1994) as a multidisciplinary approach to identify and evaluate key geological factors enabling ore formation and preservation. It emphasizes mobilization, transport, concentration, and post-formational stability of ore materials. The methodology is widely used to analyze uranium deposits of various genetic types formed in diverse geodynamic settings (Descriptive uranium..., 2020).

In the context of uranium metallogeny, the concept was adapted by Skirrow et al. (2009) to group mineral systems based on shared features of uranium ore formation, with emphasis on fluid mass transfer conditions. However, practical application of this model revealed a fundamental unresolved issue: uranium-bearing mineral systems often exhibit mixing of magmatic, metamorphic, and meteoric fluids. For example, large volcanic-type uranium deposits, classified as magmatic-related systems, also involve meteoric and marine waters—linking them to sedimentary and near-surface systems such as calcretes, sandstone-hosted, and unconformity-type deposits.

Understanding the causes, patterns, and conditions of ore-fluid migration necessitates spatiotemporal reconstructions of tectonodynamic environments favorable for deposit localization. This challenge was identified as a key issue in ore deposit science as early as the mid-20th century (Fundamental Problems…, 1953). Yet, the fluid-dynamic environment of ore formation—particularly the hydrogeological connection between deep-seated (ore-feeding) and near-surface (ore-distributing and ore-hosting) parts of mineral systems—remains among the least understood factors. Chi et al. (2022) discussed three relevant system types: magmatic-hydrothermal, structurally controlled hydrothermal with uncertain fluid sources, and hydrothermal systems related to sedimentary basins. The role of “arterial” (ore-feeding) faults—conduits for upward fluid migration via valve-type mechanisms, as well as seismic and thermoconvective contributions to ore formation—was emphasized (Sibson, 2019).

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

This vertical and temporal problem of ore formation was also addressed in studies by Expedition No. 1 of IGEM USSR Academy of Sciences, aimed at understanding the roles of endogenous and exogenous factors in forming uranium ores of different ages and tectonic settings. These studies contributed significantly to the theoretical framework of uranium metallogeny and offer a foundation for further exploration of fluid transport mechanisms across vertical and temporal domains, factoring in co-evolution of fluid dynamics, seismic-geodynamic events, heat-mass transfer, and structural development driven by overpressured fluids. This integrated approach, reflected in numerous works by the present authors (e.g., Petrov et al., 2014, 2022; Pek et al., 2020; Petrov et al., 2022, 2023), aligns with modern views on variable rock permeability resulting from evolving stress-strain conditions induced by seismic processes (Sibson, 2019; Cox, 2020). We propose that these interactions are universal, manifesting not only in uranium mineral systems of varying genesis but also in other types of ore deposits (Zlobina et al., 2020).

Detailed analysis of IGEM's ongoing research yields the following conclusions:

1. The problem of vertical and temporal ranges of endogenous ore formation—using uranium mineral systems as a case study—remains unresolved.

2. Telescoped ore-forming events recurring in the same "structural traps" over intervals spanning millions or even a billion years (in unconformity-type deposits) necessitate a detailed reconstruction of fluid-structural evolution using advanced methods and instrumentation.

3. The mineral-system approach to modeling uranium deposits, grounded in the "source → transport → deposition" paradigm, must account for evolving vertical and temporal pathways of fluid migration, incorporating fluid-dynamic and seismic-geodynamic co-development, heat-mass transfer, and structural modifications under overpressured conditions.

This work was supported by the State Research Program of IGEM RAS.

1. Zlobina T.M., Petrov V.A., Prokofyev V.Yu., Abramov S.S., Kotov A.A., Volfson A.A., Lexin A.B. Seismogenic nature of fluid-dynamic structural parageneses of the Uryakh gold ore field (NE Transbaikalia) // Geology of Ore Deposits. 2020. Vol. 62. No. 4. P. 291–320.
2. Mashkovtsev G.A., Petrov V.A. Improving the scientific and methodological basis of exploration for solid mineral deposits // Proc. "Current Issues in Exploration Geology". Nov 22–24, 2022. Moscow: VIMS, 2023. P. 195–208.
3. Fundamental Problems in the Study of Magmatic Ore Deposits / A.G. Betekhtin et al. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1953. 615 p.
4. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. Influence of petrophysical properties and rock deformation on vertical zoning of metasomatites in uranium-bearing volcanic structures (Streltsovka caldera, Transbaikalia) // Geology of Ore Deposits. 2014. Vol. 56. No. 2. P. 95–117.
5. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V., Kovalenko D.V. Uranium-bearing volcanic structures: Streltsovka (Russia), Xiangshan (China), and McDermitt (USA). Comparative analysis of felsic volcanics and associated metasomatites // Geology of Ore Deposits. 2022. Vol. 64. No. 1. P. 7–36.
6. Pek A.A., Malkovsky V.I., Petrov V.A. Mineral system of uranium deposits in the Streltsovka caldera (Eastern Transbaikalia) // Geology of Ore Deposits. 2020. Vol. 62. No. 1. P. 36–54.
7. Chi G. et al. Hydrodynamic links between shallow and deep mineralization systems and implications for deep mineral exploration // Acta Geologica Sinica. 2022. Vol. 96(1). P. 1–25.
8. Cox S.F. The dynamics of permeability enhancement and fluid flow in overpressured, fracture-controlled hydrothermal systems // Reviews in Economic Geology. 2020. Vol. 21. P. 25–82.
9. Descriptive Uranium Deposit and Mineral System Models. IAEA, 2020. 328 p.
10. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates to 2050. Vienna: IAEA, 2022. 148 p.
11. Petrov V.A., Pek A.A., Malkovsky V.I. Uranium sources and fluid transport in volcanic mineralized systems: Streltsovka caldera (Russia) and implications for Dornot (Mongolia) // Journal of Volcanology and Seismology. 2022. Vol. 16. No. 6. P. 472–497.

12. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. Characteristics of magmatism, hydrothermal-metasomatic and filtration-transport processes in uranium-bearing volcanic-related structures // Journal of Volcanology and Seismology. 2023. Vol. 17. No. 5. P. 353–373.
13. Sibson R.H. Arterial faults and their role in mineralizing systems // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. P. 2093–2100.
14. Skirrow R.G. et al. Uranium Mineral Systems: Processes, Exploration Criteria, and a New Deposit Framework // Geoscience Australia Record. 2009/20. 44 p.
15. Uranium 2024: Resources, Production and Demand. OECD NEA, Rep. No. 7683. 2025. 608 p.
16. Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L. Australian Proterozoic Mineral Systems: Essential Ingredients and Mappable Criteria // AusIMM Publication Series 4/94. P. 109–115.

Минерально-деформационные преобразования пород и механизмы миграции урана на месторождениях в фундаменте и чехле Стрельцовской кальдеры (ЮВ Забайкалье)

Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В., Минаев В.А., Устинов С.А.
ИГЕМ РАН, vapol-52@mail.ru

Стрельцовская кальдера мезозойского возраста, вмещающая крупнейшее в России Стрельцовское рудное поле (СРП), занимает особое положение в структуре Монголо-Приаргунского вулканического пояса в южном обрамлении Аргунского тектонического блока (Ищукова и др., 1998). Интерес к ней обусловлен уникальностью запасов девятнадцати U-Mo гидротермальных месторождений. В геологическом строении кальдеры принимают участие протерозойско-раннепалеозойские гранитоидные породы кристаллического фундамента и мезозойские позднеюрско-меловые породы вулканогенно-осадочного чехла. Строение разреза кальдеры используется в качестве типового для Южного Приаргунья и Восточной Монголии (Дорнотская вулканотектоническая структура).

Масштабный карьер Тулукуевского месторождения и месторождение Новогоднее (чехол), а также наиболее крупные глубокозалегающие месторождения Антей и Аргунское (фундамент) – уникальные объекты для изучения путей, механизмов миграции и накопления урана, а также пространственно-временной реконструкции тектонодинамических обстановок, благоприятных для выявления характера минерально-деформационных преобразований исходных пород и локализации месторождений (Petrov et al., 2011; Полуэктов и др., 2022). По классификации МАГАТЭ (Geological classification..., 2018) месторождения в чехле относятся к вулканогенному (volcanic-related) типу, что связано с систематикой по признаку вмещающей среды и/или рудолокализующей структуры. Однако становится все более очевидными ограничения данного подхода и необходимость перехода к моделям урановых минеральных систем (Descriptive uranium…, 2020). Подход для данных месторождений актуален и логичен, имея в виду пример пространственно-временного совмещения урановой минерализации в фундаменте (Антей и Аргунское) и чехле (Тулукуевское и Новогоднее) Стрельцовской кальдеры.

В этой связи месторождения Антей и Аргунское рассматриваются нами в контексте пространственно-временной реконструкции характера минерально-деформационных преобразований в породах глубоких горизонтов фундамента (интервал от 500 до 3000 м), а месторождения Тулукуевское и Новогоднее (интервал глубин 0-450 м) в рамках изучения механизмов миграции и накопления урана в различных окислительно-восстановительных условиях и геоструктурных обстановках.

Комплексные геолого-структурные, минералого-геохимические, петрофизические, тектонофизические и геохронологические изыскания, а также мониторинговые гидро- и изотопно-геохимические исследования проб трещинно-жильных вод источников и атмосферных осадков на данных объектах проводились с 2000 г. и продолжаются в настоящее время. Этот детальный и многолетний анализ изучения месторождений Стрельцовской кальдеры и ее обрамления показывает, что развитие геологических структур происходило в течение нескольких тектономагматических циклов (ТМЦ) (Петров и др., 2017).

Пространственно-временные закономерности преобразований пород в течение основных ТМЦ изучались на глубокозалегающих месторождениях Антей и Аргунское. Ориентированные в пространстве образцы и шлифы на месторождении Антей отбирались по профилям, которые располагались в крест простирания основных рудовмещающих разломов 13 и 160 на глубинах от поверхности 550-600 м (IX-X гор.) и 890 м (XIII гор.).

Особое внимание придавалось ориентировкам микроструктур растяжения, трассируемых цепочками (планарными системами) вторичных флюидных включений (ФВ), петрофизическими параметрами пород и данными осколковой f-радиографии. Для изучения температур гомогенизации образцы кварца последовательно отбирались из всех высоко- и низкотемпературных постмагматических и метасоматических минеральных ассоциаций

(Полуэктов и др., 2013, 2017). Проводился микроструктурный анализ планарных систем флюидных включений (ПСФВ) и по двумерным цифровым изображениям шлифов строились розы-диаграммы микроструктур, на которых выделялись системы (генерации) ПСФВ разных направлений, соотносимые с полученными значениями температур ФВ (Петров и др., 2013).

Весь комплекс полученных данных указывает на классическое ретроградное изменение температур гидротермальных флюидов от высоких значений в неопротерозое при кварц-калишпатовом метасоматозе и динамометаморфизме, до низких в позднем мезозое на заключительных стадиях формирования прожилково-вкрапленной урановой минерализации, пострудной аргиллизации и гидротермально-метасоматического прожилкования (Таблица).

Таблица. Минерально-деформационные преобразования пород и температурный режим (по ФВ в планарных системах микротрещин), проявленные в Стрельцовской кальдере (месторождения Антей и Аргунское) и ее обрамлении в течение основных ТМЦ

НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ТМЦ → 600 млн. лет: I группа ФВ 450-400°С
Мигматизация, высокотемпературный кварц-полевошпатовый метасоматоз
КАЛЕДОНСКИЙ ТМЦ→ 520-410 млн. лет: II группа ФВ 350-320°С*
Мигматизация, высокотемпературный кварц-калишпатовый метасоматоз и динамометаморфизм. Микротрещины этого кластера имеют субширотную ориентировку и образовались в обстановке субширотного сжатия
ГЕРЦИНСКИЙ ТМЦ→ 360-210 млн. лет: II (350-320°С*) и III (280-240°С*) группы ФВ
Калишпатизация, альбитизация, грейзенизация, динамометаморфизм и динамометаморфическая серицитизация. Кластер микротрещин СЗ-ЮВ простирания.
ПОЗДНЕМЕЗОЗОЙСКИЙ ТМЦ→ 160-100 млн. лет: III группа ФВ 280-240°С*
Грейзеноподобные изменения, предрудная березитизация.
IV группа ФВ 260-200°С
Предрудная низкотемпературная гидрослюдизация и аргиллизация. Кластеры микротрещин III-IV групп были сформированы в поле напряжений с СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ векторами сжатия.
V группа ФВ 220-160°С
Рудосопровождающая альбитизация и хлоритизация. Преобладают три направления микротрещин: СЗ-ЮВ, ССВ-ЮЮЗ и ВСВ-ЗСЗ. Разноориентированные планарные системы флюидных включений указывают на то, что рудовмещающая разломно-трещинная структура вступила в режим объемной дезинтеграции (возможно на фоне гидроразрыва).
VI группа ФВ 150-80°С
Заключительные стадии формирования прожилково-вкрапленной U минерализации, пострудной аргиллизации и гидротермально-метасоматического прожилкования (кальцит, бертьерин, флюорит, каолинит, смектит). Рудосопровождающая метасоматическая хлоритизация и гематитизация отнесены нами к пограничному температурному интервалу включений V и VI групп предположительно.

Примечание: *подчеркивание в 350-320°С соответствует верхней, а 350-320°С – нижней границам температурных интервалов в группах флюидных включений (ФВ).

Эпизоды активизации изученных разломных зон подтверждаются: индикаторными признаками динамометаморфизма пород; соотношением метасоматитов от ранних высоко-среднетемпературных (грейзенизация, калишпатизация) до поздних низкотемпературных (березитизация, гидрослюдизация, альбитизация, аргиллизация).

Следует отметить, что одной из выдающихся особенностей эндогенных месторождений СРП относится необычно широкое развитие почти всего спектра низкотемпературных метасоматитов. Мощности измененных пород достигают первых сотен метров, при почти

полном отсутствии абсолютно неизмененных разностей. Выделены структурно-петрологические преобразования: I-высокотемпературные, промежуточного типа-II и III-низкотемпературные. Они могут быть соотнесены с преобладающими типами деформаций: упруго-пластичными (Неопротерозойский и Каледонский ТМЦ), хрупко-пластичными (Герцинский ТМЦ) и упруго-хрупкими (Позднемезозойский ТМЦ). Наряду с этим могли происходить и кратковременные повышения («всплески») температур в течение отдельных эпизодов дорудной, синрудной и пострудной истории, выраженные в формировании тектонических псевдотахилитов. Эти преобразования носили локальный характер и могли быть связаны с кратковременными сейсмотектоническими процессами в разломных зонах фундамента и чехла Стрельцовской кальдеры (Petrov et al., 2013). Не исключаем мы и вероятность активизации термальных процессов в связи с внедрением экструзивных тел цезиеносных вулканических стекол (перлитов) с возрастом 128-127 млн. лет уже после формирования промышленной урановой рудной минерализации.

Кислые вулканиты (игнимбриты) и вулканические стекла обсидиан-перлитового типа (риолит-риодацитового состава) на месторождениях Тулукуевское и Новогоднее рассматривались нами в контексте изучения механизмов миграции и сорбции урана в различных геолого-структурных обстановках и окислительно-восстановительных условиях, которые на месторождении Тулукуевское (от 0 до 250 м от современной поверхности) сменяются на преимущественно восстановительные на месторождении Новогоднее, где на глубине 300 м представилась редкая за всю историю разработки месторождений СРП возможность изучения вулканических стекол с максимальной степенью сохранности.

В неизмененных вулканических стеклах (обсидиан, перлит) месторождения Новогоднее равномерно рассеянные и высокие концентрации урана имеют первично-магматическое происхождение, отражая его содержание в исходном расплаве. В пользу этого могут свидетельствовать и достаточно высокие, равномерно распределенные содержания урана в высококремнистых (содержание SiO_2 до 81-88%) вулканических стеклах. Для изучения был охвачен весь сорбционный диапазон: от крайне высоких содержаний урана в перлитах-обсидианах восстановительных условий месторождения Новогоднее до полного его выноса из минералов-концентраторов в окислительных условиях верхних уровней карьера Тулукуевского месторождения. При этом важнейший механизм задержки урана на изученных месторождениях обусловлен процессами сорбции. Проведенное сопоставление сорбционной способности позволило построить сравнительный сорбционный ряд из 16 минералов и минеральных агрегатов (Полуэктов и др., 2022).

Таким образом, изучение минерально-деформационных преобразований пород и механизмов миграции урана на месторождениях в фундаменте и чехле Стрельцовской кальдеры позволяет сделать следующие выводы:

1. Рудовмещающие породы Стрельцовской кальдеры и ее ближайшего обрамления формировались в течение нескольких тектоно-магматических циклов (ТМЦ), что нашло отражение в комплексе постмагматических, метаморфических, высоко-, средне- и низкотемпературных гидротермально-метасоматических и деформационных (структурно-петрологических) преобразований. Они соотнесены с соответствующими типами ведущих деформаций – упруго-пластичными (Неопротерозойский и Каледонский ТМЦ), хрупко-пластичными (Герцинский ТМЦ) и упруго-хрупкими (Позднемезозойский ТМЦ);

2. Фиксируется отчетливое ретроградное изменение температур гидротермальных флюидов. Все проанализированные температуры гомогенизации включений, с учетом результатов микроструктурного анализа, сгруппированы в шесть (I-VI) основных температурных интервалов. Все группы включений по возможности привязаны к разновозрастным минерально-деформационным преобразованиям;

3. Возможные кратковременные «всплески» температур в течение отдельных эпизодов дорудной, синрудной и пострудной истории носили локальный характер и могли быть связаны с кратковременными сейсмотектоническими процессами в разломных зонах фундамента и чехла кальдеры, что подтверждается таким температурным маркером, как псевдотахилиты.

Среди синрудных и пострудных низкотемпературных минерально-деформационных преобразований отсутствуют признаки (минеральные парагенезисы), подтверждающие долговременное воздействие высокотемпературных гидротермальных и метасоматических процессов;

4. Процессы задержки и накопления урана на месторождениях Тулукуевское и Новогоднее, происходили на контролируемых разрывными нарушениями геохимических барьерах: восстановительном (глеевым) и сорбционным. В условиях как затрудненного, так и интенсивного водообмена, важнейший механизм задержки урана обусловлен процессами сорбции. В соответствии с сорбционной способностью минералов и минеральных агрегатов выделен ряд из 16 минералов;

5. Полученные данные в сочетании с результатами геоструктурных и петрофизических исследований, имеют значение для обоснования поисков, разведки, отработки урановых руд и при рассмотрении возможных источников рудного вещества. Не менее важным является и радиогеоэкологический аспект изысканий, поскольку опыт изучения процессов миграции урана на месторождениях СРП использован нами при изучении пород Нижнеканского гранитоидного массива и его складчатого обрамления (Красноярский край), где создается Первый отечественный пункт глубинного захоронения РАО.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ №13.1902.24.44 (Соглашение № 075-15-2024-641).

1. Ищукова Л.П., Игошин Ю.А., Авдеев Б.В и др. Геология Урулюнгуевского рудного района и Mo-U месторождения Стрельцовского рудного поля. М.: Геоинформмарк, 1998. 526с.
2. Петров В.А., Устинов С.А., Полуэктов В.В., Прокофьев В.Ю. Реконструкция путей и условий миграции рудоносных гидротермальных растворов: структурно-геологический и термобарогеохимический подход // Вестник РФФИ. Приложение к «Информационному бюллетеню» № 21. 2013. № 1 (77). С. 27-33.
3. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Тектоно-магматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445-469.
4. Полуэктов В.В., Петров В.А., Прокофьев В.Ю., Устинов С.А., Андреева О.В., Щукин С.И. Этапы метаморфических, метасоматических и деформационных преобразований флюидопроводящих пород Стрельцовской кальдеры (ЮВ Забайкалье) // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. М.: ИГЕМ РАН, 2013. С. 222-224.
5. Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В., Устинов С.А., Прокофьев В.Ю. Структурно-петрологические особенности рудовмещающих пород Стрельцовской кальдеры и ее обрамления (ЮВ Забайкалье) // Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения академика А.Г. Бетехтина. М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 160-164.
6. Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В. Миграция и накопление урана в различных окислительно-восстановительных условиях месторождений вулканогенного типа (Стрельцовская кальдера, юго-восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 37-72
7. Descriptive uranium deposit and mineral system models. IAEA, 2020. 328 p.
8. Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA-TECDOC Series-1842. Vienna, 2018. 415 p.
9. Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Schukin S.I. Uranium mineralization in fractured welded tuffs of the Krasnokamensk Area: transfer from ancient to modern oxidizing conditions // The New Uranium Mining Boom: Challenge and lessons learned. B. Merkel, M. Schipek (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. P. 701-710.
10. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Cuney M., Nasimov R.M., Hammer J., Schukin S.I. Stress-time context of fault permeability at the Krasnokamensk Area, SE Transbaikalia // Journal of Physics: Conference Series. 2013.V. 416. 6 p.

*Mineral-Deformation Transformations of Rocks and Uranium Migration Mechanisms at Deposits in the Basement and Cover of the Streltsovka Caldera (SE Transbaikalia)

Poluektov V.V., Petrov V.A., Andreeva O.V., Minaev V.A., Ustinov S.A.
IGEM RAS, vapol-52@mail.ru

The Mesozoic Streltsovka Caldera, which hosts Russia's largest uranium ore field — the Streltsovka Ore Field (SOF) — occupies a unique position within the Mongol–Priargun Volcanic Belt along the southern margin of the Erguna Tectonic Block (Ishchukova et al., 1998). Its scientific importance stems from the unique reserves of nineteen U-Mo hydrothermal deposits. The caldera structure includes Proterozoic–Early Paleozoic granitoid basement rocks and Late Jurassic–Cretaceous volcanogenic-sedimentary cover formations. The caldera's stratigraphy is regarded as a reference section for southern Priargun and eastern Mongolia (Dornot volcanic-tectonic structure).

Key sites include the extensive open pit at the Tulukuevskoye deposit and the Novogodnee deposit (cover), as well as the deep-seated Antey and Argunskoye deposits (basement), which serve as unique natural laboratories for investigating the pathways and mechanisms of uranium migration and accumulation. These sites also enable spatiotemporal reconstructions of tectonodynamic settings conducive to identifying mineral-deformation transformations of host rocks and localization of uranium mineralization (Petrov et al., 2011; Poluektov et al., 2022).

According to the IAEA classification (Geological classification..., 2018), the deposits within the cover are considered volcanic-related, based on host-rock environment and/or ore-controlling structures. However, the limitations of this approach are increasingly evident, prompting a shift toward uranium mineral system models (Descriptive uranium…, 2020). Such a model is highly applicable to the Streltsovka Caldera, where uranium mineralization occurs both in the basement (Antey and Argunskoye) and in the cover (Tulukuevskoye and Novogodnee), offering a unique spatiotemporal overlap.

In this context, the Antey and Argunskoye deposits were studied to reconstruct the spatiotemporal characteristics of mineral-deformation processes in deep basement rocks (depths of 500–3000 m), while the Tulukuevskoye and Novogodnee deposits (0–450 m) were analyzed to investigate uranium migration and accumulation mechanisms under varying redox conditions and geostructural environments.

Comprehensive geological-structural, mineralogical-geochemical, petrophysical, tectonophysical, and geochronological investigations — alongside hydro- and isotope-geochemical monitoring of fracture-vein water and atmospheric precipitation samples — have been conducted since 2000 and continue to this day. This extensive long-term analysis reveals that the evolution of geological structures occurred over multiple tectonomagmatic cycles (TMCs) (Petrov et al., 2017).

Spatiotemporal trends of rock transformations during major TMCs were studied at the deep-seated Antey and Argunskoye deposits. Spatially oriented samples and thin sections at Antey were collected along profiles intersecting the main ore-controlling faults 13 and 160 at depths of 550–600 m (mines IX–X) and 890 m (mine XIII).

Particular focus was given to the orientation of tensile microstructures, traced by planar fluid inclusion trails (FITs), petrophysical rock parameters, and f-radiography data. Quartz samples were collected from all high- and low-temperature postmagmatic and metasomatic mineral assemblages for homogenization temperature analysis (Poluektov et al., 2013, 2017). Microstructural analysis of FITs was performed, and rose diagrams of microstructures were constructed from 2D digital images, identifying FIT generations by orientation and correlating them with fluid inclusion temperatures (Petrov et al., 2013).

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

The full dataset reveals a classical retrograde trend in hydrothermal fluid temperatures — from high values during Neoproterozoic quartz–K-feldspar metasomatism and dynamometamorphism to lower temperatures during Late Mesozoic vein-disseminated uranium mineralization, post-ore argillitization, and hydrothermal-metasomatic veining (see Table).

Table 1. Mineral-Deformation Transformations and Temperature Regimes (Based on FITs in Microfracture Systems) in the Streltsovka Caldera (Antey and Argunskoye Deposits) During Major Tectonomagmatic Cycles

Neoproterozoic TMC → ~600 Ma Age: I FIT Group 450-400 Temperature (°C)
Migmatization, high-temperature quartz–feldspar metasomatism
Caledonian TMC → 520–410 Ma Age: II FIT Group 350-320 Temperature (°C)*
Migmatization, high-T quartz–K-feldspar metasomatism, dynamometamorphism; microfractures oriented sublatitudinally under sublatitudinal compression
Hercynian TMC → 360-210 Ma Age: II (350-320°C*) и III (280-240°C*) FIT Group
K-feldspathization, albitization, greisenization, dynamometamorphism, sericitization; NW–SE microfracture orientation.
Late Mesozoic TMC → 160-100 Ma Age: III FIT Group 280-240 Temperature (°C)*
Greisen-like alterations, pre-ore beresitization.
IV FIT Group 260-200 Temperature (°C)
Pre-ore hydromicatization and argillitization; Clusters of microcracks of groups III-IV were formed in the stress field with North-South and South-South compression vectors.
V FIT Group 220-160 Temperature (°C)
Ore-accompanying albitization and chloritization. Three directions of microcracks prevail: NW-SE, SSV-SE and VSV-ZSZ. The differently oriented planar systems of fluid inclusions indicate that the ore-containing fracture structure has entered a regime of volumetric disintegration (possibly against the background of hydraulic fracturing).
VI FIT Group 150-80 Temperature (°C)
The final stages of the formation of veined-interspersed U mineralization, post-ore argillization and hydrothermal-metasomatic veining (calcite, berthierine, fluorite, kaolinite, smectite). The accompanying metasomatic chloritization and hematitization were attributed by us to the boundary temperature range of inclusions of groups V and VI presumably.

Note: *350–320* indicates upper and lower boundaries of the temperature interval for FIT groups.

Episodes of fault zone reactivation are supported by indicators of dynamometamorphism, metasomatic overprints from high/medium-T (greisenization, K-feldspathization) to low-T (beresitization, hydromicatization, albitization, argillitization).

A distinctive feature of endogenous SOF deposits is the unusually extensive development of nearly all types of low-temperature metasomatites. Altered rock zones reach several hundred meters in thickness, with virtually no unaltered equivalents. Three types of structural-petrological transformations are identified: I – high-T; II – intermediate; III – low-T, corresponding to dominant deformation types: ductile–plastic (Neoproterozoic and Caledonian TMCs), brittle–plastic (Hercynian TMC), and elastic–brittle (Late Mesozoic TMC).

Additionally, short-term temperature "spikes" during pre-, syn-, and post-ore stages may have resulted in localized tectonic pseudotachylite formation, possibly linked to seismic-tectonic activity in fault zones of the basement and cover (Petrov et al., 2013). These may also relate to thermal activation via intrusion of Cs-bearing extrusive volcanic glasses (perlites) dated at 128–127 Ma, postdating industrial uranium mineralization.

Acidic volcanic rocks (ignimbrites) and obsidian–perlite-type glasses (rhyolite–rhyodacite composition) from the Tulukuevskoye and Novogodnee deposits were analyzed to assess uranium migration and sorption under varying geological and redox conditions. At Tulukuevskoye (0–250 m), oxidizing conditions dominate, whereas at Novogodnee (300 m), reducing conditions allowed rare observations of well-preserved volcanic glasses.

In unaltered glasses (obsidian, perlite) at Novogodnee, uniformly dispersed high U concentrations are interpreted as magmatic in origin, reflecting U content in the original melt. This is supported by consistently high U contents in high-silica (SiO_2 = 81–88%) volcanic glasses.

The full sorption range was investigated — from extremely high U concentrations in reducing Novogodnee perlites–obsidians to complete U leaching from sorbing minerals under oxidizing conditions in upper Tulukuevskoye levels. Sorption was identified as the key U retention mechanism. A comparative sorption series of 16 minerals and aggregates was established (Poluektov et al., 2022).

Conclusions:

Host rocks of the Streltsovka Caldera and its surroundings formed during multiple tectonomagmatic cycles, expressed through a complex succession of postmagmatic, metamorphic, high-/medium-/low-temperature hydrothermal–metasomatic and structural–petrological transformations. These correlate with dominant deformation types: ductile–plastic (Neoproterozoic and Caledonian), brittle–plastic (Hercynian), and elastic–brittle (Late Mesozoic).

Hydrothermal fluid temperatures display a distinct retrograde trend. Homogenization temperatures grouped into six main FIT clusters (I–VI), each linked to specific mineral–deformation episodes.

Localized short-term temperature spikes during pre-, syn-, and post-ore stages likely reflect seismic-tectonic activity, evidenced by pseudotachylite formation. No sustained high-temperature hydrothermal/metasomatic influence was detected in low-T syn-/post-ore assemblages.

U retention and accumulation at Tulukuevskoye and Novogodnee occurred along geochemical barriers — reducing (gley) and sorption — controlled by fault structures. Sorption was the dominant mechanism under varying hydrodynamic conditions. Sixteen minerals/mineral aggregates were ranked by sorption capacity.

These findings, combined with geostructural and petrophysical data, support prospecting, exploration, and development of U deposits and identification of ore sources. The radiogeochemical aspect is also critical, as this research informs studies of the Nizhnekansk granitoid massif and its folded margin (Krasnoyarsk region), site of Russia's first deep radioactive waste repository.

This research was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 13.1902.24.44 (Agreement No. 075-15-2024-641).

1. Ishchukova L.P., Igoshin Yu.A., Avdeev B.V. et al. Geology of the Urulyunguyevsky Ore District and Mo-U Deposits of the Streltsovka Ore Field. Moscow: Geoinformmark, 1998. 526 p.
2. Petrov V.A., Ustinov S.A., Poluektov V.V., Prokofyev V.Yu. Reconstruction of Migration Pathways and Conditions of Ore-Forming Hydrothermal Fluids: Structural-Geological and Thermobarogeochemical Approach // Vestnik RFFI. Supplement to the Information Bulletin No. 21. 2013. No. 1(77). P. 27–33.
3. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. Tectonomagmatic Cycles and Geodynamic Settings of Ore-Forming Systems in Southern Priargun // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59. No. 6. P. 445–469.
4. Poluektov V.V., Petrov V.A., Prokofyev V.Yu., Ustinov S.A., Andreeva O.V., Schukin S.I. Stages of Metamorphic, Metasomatic, and Deformation Transformations of Fluid-Conducting Rocks in the Streltsovka Caldera (SE Transbaikalia) // Physicochemical and Petrophysical Studies in Earth Sciences. Moscow: IGEM RAS, 2013. P. 222–224.
5. Poluektov V.V., Petrov V.A., Andreeva O.V., Ustinov S.A., Prokofyev V.Yu. Structural–Petrological Features of Host Rocks in the Streltsovka Caldera and Its Surroundings (SE Transbaikalia) // All-Russian Conference Dedicated to the 120th Anniversary of Academician A.G. Betekhtin. Moscow: IGEM RAS, 2017. P. 160–164.

6. Poluektov V.V., Petrov V.A., Andreeva O.V. Uranium Migration and Accumulation under Various Redox Conditions at Volcanic-Type Deposits (Streltsovka Caldera, SE Transbaikalia) // Geology of Ore Deposits. 2022. Vol. 64. No. 1. P. 37–72.
7. Descriptive Uranium Deposit and Mineral System Models. IAEA, 2020. 328 p.
8. Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA TECDOC Series-1842. Vienna, 2018. 415 p.
9. Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Schukin S.I. Uranium Mineralization in Fractured Welded Tuffs of the Krasnokamensk Area: Transfer from Ancient to Modern Oxidizing Conditions // The New Uranium Mining Boom: Challenge and Lessons Learned. B. Merkel, M. Schipek (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. P. 701–710.
10. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Cuney M., Nasimov R.M., Hammer J., Schukin S.I. Stress-Time Context of Fault Permeability at the Krasnokamensk Area, SE Transbaikalia // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 416. 6 p.

Урановые компоненты в подземных водах Северо-Восточного Китая, Монголии и Читинского Забайкалья

Рассказов С.В.[1,2], Чебыкин Е.П.[1,3], Дэмбэрэл С.[4], Батсайхан Ц. [4], Сунь Йи-минь[5], Ильясова А.М. [1], Замана Л.В.[6], Оргильянов А.И.[1], Саньков В.А.[1,2]
[1]ИЗК СО РАН, rassk@crust.irk.ru; [2]ИГУ, kaf-dinamgeol@mail.ru; [3]ЛИН СО РАН, epcheb@yandex.ru; [4]ИАиГ МАН (Монголия), demberel@iag.ac.mn; [5]ИПРиЭ Хэйлунцзянской академии наук (Китай); [6]ИПРЭиК СОРАН, l.v.zamana@mail.ru

Подземные воды юга Сибири, Дальнего Востока России, Северо-Восточного Китая и Монголии обычно систематизируются по содержаниям макрокомпонентов и газов. Систематика компонентов урана имеет самостоятельное значение. Временные вариации концентрации этого элемента используются для оценки сейсмической опасности в Байкальской рифтовой системе и сопредельных территорий (Чебыкин и др., 2015; Рассказов и др., 2023, 2024). Проводится мониторинг урановых компонентов в термальных, минеральных и пресных водах. Кроме концентрации U, в урановом компоненте учитывается изотопное отношение $^{234}U/^{238}U$ и концентрация ^{234}U. Оба показателя выражаются в единицах активностей (е.а.), соответственно, OA4/8 (отношение активностей ^{234}U и ^{238}U) и A4 (активность ^{234}U). Если химически разделенные изотопы урана измеряются с точки зрения их скоростей альфа-излучения, радиоактивное равновесие между ^{238}U и ^{234}U представляет собой равное отношение альфа-активности $^{234}U/^{238}U$=~1.0 (OA4/8=~1.0). Циклическое равновесие между изотопами ^{234}U и ^{238}U соответствует их атомному соотношению 5.47×10^{-5}. В подземных водах определяется изотопное равновесие между материнским изотопом ^{238}U и дочерним изотопом ^{234}U (OA4/8 ~1). В изотопно-неравновесных подземных водах юга Сибирской платформы OA4/8 возрастает до 16.

На территории Читинского Забайкалья и сопредельной Монголии находятся месторождения урана, образовавшиеся в позднемезозойскую и кайнозойскую урановорудные эпохи (Миронов, 2006; Шатков, 2015). В урановых компонентах подземных вод территории может отражаться перераспределение этого металла в горных породах с его концентрированием в настоящее время. Цель работы – провести анализ пространственного распределения урановых компонентов подземных вод на территориях Северо-Восточного Китая, Монголии и Читинского Забайкалья.

В работе используется авторская база данных подземных вод. Пробы отбираются и анализируются авторами по единой методике с 2012 г. Для определения элементного состава вода фильтруется через шприцевую фильтр-насадку (0.45 мкм) в предварительно взвешенную пробирку Эппендорфа (2 мл), содержащую ультрачистую 70%-ную азотную кислоту. В растворе определяется содержание 72 химических элемента методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce. Изотопное отношение урана определяется после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Характеристика методики приводится в работе (Чебыкин и др., 2024).

Подземные воды Читинского Забайкалья и Монголии образуют общее группирование составов. Выделяются участки обогащения и обеднения ураном подземных вод с общим диапазоном его концентрации, перекрывающим 4 порядка. На диаграмме OA4/8 – U различается 5 групп подземных вод: I – группа вулканических территорий Аршана, Удаляньчи и Удокана с диапазонами UNW=1–10 и низкого OA4/8, II – группа Сибирской платформы, представленная минеральной водой Олхинской скважины, с UNW=10–100 и высоким OA4/8 (12–16); III – группа Забайкалья и Монголии (Оргил, Зымка-Аршан и др.) с UNW ~100 при широком диапазоне OA4/8; IV – группа Забайкалья и Монголии (Адриановский источник и др.) с диапазонами UNW=0.1–10 и умеренными значениями OA4/8; V – группа Забайкалья (Кука, Молоковка, Краснокаменск, Юбилейный) с UNW=0.01–0.1 и умеренными значениями OA4/8. В последнюю группу входят пресные воды из скважин г. Краснокаменска и пос.

Юбилейного (общая минерализация 410–450 мг/дм^3) с высоким содержанием U (40 и 51 мкг/дм^3).

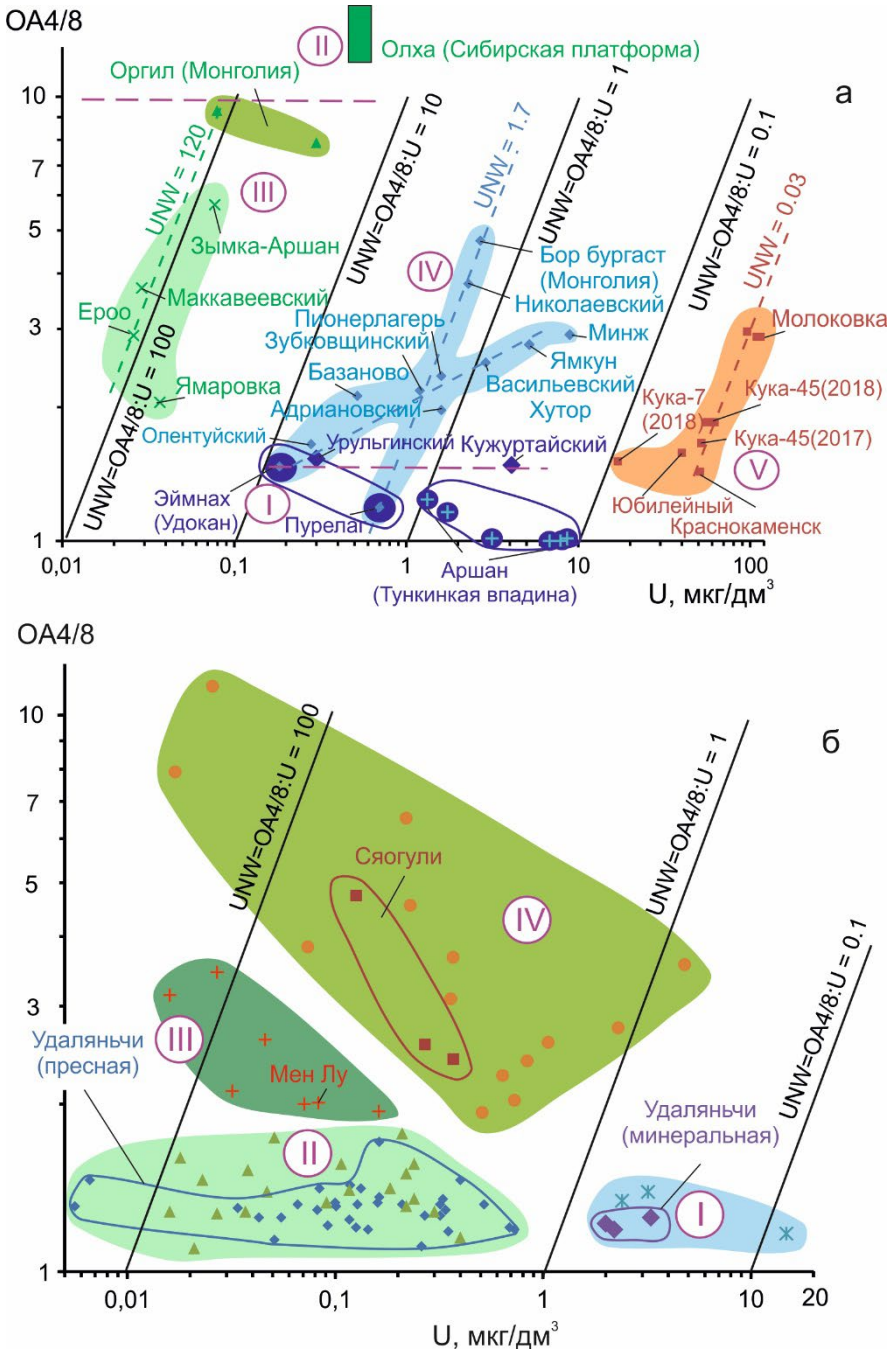


Рис. 1. Диаграммы OA4/8 – U для подземных вод Читинского Забайкалья и Монголии (а) и СВ Китая (б). На панели а для сопоставления показаны данные по подземным водам вулканических территорий (Эймнах и Пурелаг Северного Забайкалья, Аршан Тункинской впадины) и авулканичной Сибирской платформы. Параметр UNW (Uranium Normalized Water = (OA4/8)/U (дм^3/мкг) определяется в логарифмическом масштабе параллельными линиями, обозначающими нормирование значения OA4/8 (безразмерная величина) к концентрации U (мкг/дм^3). Обозначаются параллельные тренды точек с одинаковыми значениями UNW: 120 дм^3/мкг (группа III), 1.7 дм^3/мкг (группа IV) и 0.03 дм^3/мкг (группа V).

Для вулканических территорий хр. Удокан (Северное Забайкалье) и Тункинской впадины определяются интервалы значений минеральных вод: 1< OA4/8 ≤1.47, 0.18 < U (мкг/дм^3) < 2.2, 0.27 < A4 (е.а.) <2.62. В качестве показательного урана, близкого к изотопному

равновесию, принимается его характеристика газирующей минеральной воды Южного источника (вулканы Удаляньчи, СВ Китай): U=2.2 мкг/дм^3; OA4/8=1.19, A4=2.62 е.а., проба 06.07.2019. Относительно низкие значения OA4/8 определяются в подземных водах в районе позднекайнозойского вулканизма хр. Удокан: в термальных источниках Пурелаг: t=38.9 °C, U=0.7 мкг/дм^3; OA4/8=1.19, A4=0.83 е.а., проба 30.03.2017 и Эймнах: t=39.2 °C, U=0.18 мкг/дм^3; OA4/8=1.47, A4=0.27 е.а., проба 29.03.2017.

В Читинском Забайкалье углекислые воды двух источников имеют концентрацию урана, OA4/8 и A4, близкие к этим характеристикам подземных вод вулканических областей: Кужуртайский: U=4.1 мкг/дм^3; OA4/8=1.48, A4=6.07 е.а. (проба 29.08.2018) и Урульгинский: U=0.3 мкг/дм^3; OA4/8=1.53, A4=0.46 е.а. (проба 29.08.2018).

В качестве показательной для сильно изотопно-неравновесного урана гр. III принимается характеристика газирующей минеральной воды 90-метровой скважины санатория Оргил (Улан-Батор, Монголия): U=0.079 мкг/дм^3; OA4/8=9.3, A4=0.74 е.а., проба 03.09.2018.

Для вод рассчитывается температура растворения кремния T(Si) и на основе регионального геотермического градиента 25 °C/км определяется глубинный эквивалент температуры (ГЭТ). По результатам выполненных расчетов подземные воды групп III и V Читинского Забайкалья и Монголии с контрастным содержанием U воспринимаются как комплементарные составляющие процессов обогащения–обеднения ураном, протекающих в глубинном интервале 2.4–4.3 км, тогда как на глубинах менее 2.4 км эти процессы не выражены (рис. 2).

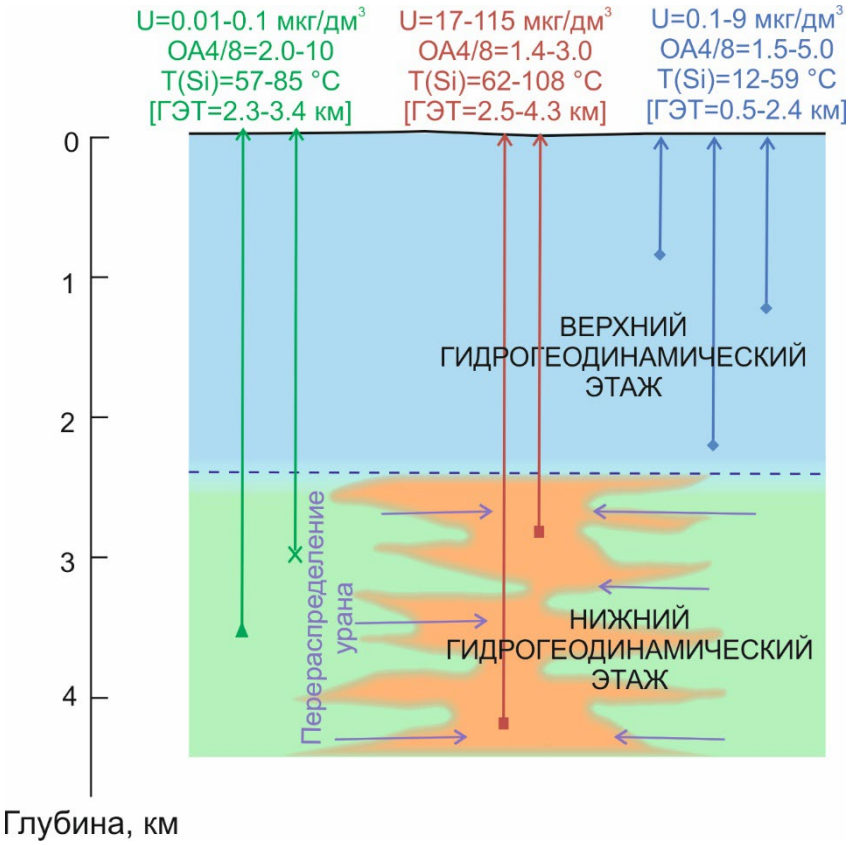


Рис. 2. Иллюстрация перераспределения урана на нижнем гидрогеодинамическом этаже (глубина 2.4–4.3 км) при отсутствии подобных процессов в верхнем (глубина менее 2.4 км). Используются значки групп подземных вод рис. 1а.

Урановые компоненты подземных вод Северо-Восточного Китая также характеризуются широкими вариациями OA4/8 и концентрации U. Выделяются 4 группы

составов: I – минеральные воды вулканической территории Удаляньчи (общая минерализация ОМ = 1.3–2.0 мг/дм^3) с низким ОА4/8 и повышенной концентрацией U, близкие по урановым компонентам менее минерализованные воды (ОМ = 530–750 мкг/дм^3) других территорий; II – пресные подземные и поверхностные воды Удаляньчи (ОМ в основном 190–380 мкг/дм^3) с низким ОА4/8 и низкой концентрацией U, близкие по урановым компонентам подземные воды других территорий, часто с более высокой общей минерализацией; III – пресные и ультрапресные воды вулканической территории Мен Лу (ОМ менее 400 мкг/дм^3) с повышенным ОА4/8 (2.0–3.5) и низкой концентрацией U (менее 0.16 мкг/дм^3), близкие по урановым компонентам подземные воды других территорий и IV – пресные воды вулканической территории Сяогули с высоким ОА4/8 (1.93–11.7) при обратной корреляции с U в широком диапазоне его концентраций. Минеральные воды вулканической территории Удаляньчи в целом обогащены ураном относительно пресных подземных вод этой территории и других районов СВ Китая. Имеются подземные воды с ультранизким содержанием U (до 0.0005 мкг/дм^3), подобные группе III Монголии и Читинского Забайкалья, но отсутствуют подземные воды с его высоким содержанием U (более 15 мкг/дм^3), подобные группе V Монголии и Читинского Забайкалья (рис. 1б).

По результатам выполненных сравнительных аналитических исследований подземных вод мы приходим к выводу о том, что современные процессы перераспределения урана с его концентрированием развиваются на нижнем гидрогеодинамическом этаже верхней части земной коры в Читинском Забайкалье и Монголии, тогда как в СВ Китае подобные процессы отсутствуют.

1. Миронов Ю.Б.. Уран Монголии. Второе издание. СПб, 2006. 328 с.
2. Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Батсайхан Ц., Дэмбэрэл С., Чебыкин Е.П. Химическая гидрогеодинамика в Улан-Баторском резервуаре подземных вод в 2012–2023 годах: сопоставление с химической гидрогеодинамикой резервуаров побережья Байкала // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 4. С. 146–160.
3. Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Замана Л.В., Оргильянов А.И., Саньков В.А., Ильясова А.М., Чувашова И.С. Урановые компоненты подземных вод Читинского Забайкалья: сопоставление с урановыми компонентами подземных вод сопредельной Внутренней Азии // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 113–132.
4. Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}U/^{238}U$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады РАН. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.
5. Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязнённых стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 107–136. DOI: 10.17223/25421379/33/7
6. Шатков Г.А. Стрельцовский тип урановых месторождений // Региональная геология и металлогения. 2015. № 63. С. 85–96.

*Uranium Components in Groundwater of Northeastern China, Mongolia, and Chita Transbaikalia

Rasskazov S.V.[1,2], Chebykin E.P.[1,3], Demberel S.[1], Batsaikhan Ts.[4], Sun Yi-Min[5], Ilyasova A.M.[1], Zamana L.V.[6], Orgilyanov A.I.[1], Sankov V.A.[1,2]
[1]Institute of the Earth's Crust SB RAS, rassk@crust.irk.ru; [2]Irkutsk State University, kaf-dinamgeol@mail.ru; [3]LI SB RAS, epcheb@yandex.ru; [4]Institute of Astronomy and Geophysics, MAS (Mongolia), demberel@iag.ac.mn; [5]Institute of Hydrogeology and Environmental Engineering, Heilongjiang Academy of Sciences (China); [6]INREC SB RAS, l.v.zamana@mail.ru

Groundwater from southern Siberia, the Russian Far East, northeastern China, and Mongolia is typically classified based on major element and gas content. However, the systematics of uranium components is of independent significance. Temporal variations in uranium concentration are used to assess seismic hazard in the Baikal Rift System and adjacent regions (Chebykin et al., 2015; Rasskazov et al., 2023, 2024). Monitoring is conducted on uranium components in thermal, mineral, and freshwater systems. In addition to U concentration, uranium components include the isotopic ratio $^{234}U/^{238}U$ and the activity of ^{234}U. These indicators are expressed in units of activity (e.a.): $OA_{4/8}$ (activity ratio of ^{234}U to ^{238}U) and A_4 (activity of ^{234}U). When chemically separated isotopes are measured based on their alpha emission rates, radioactive equilibrium corresponds to an alpha activity ratio of $^{234}U/^{238}U \approx 1.0$ ($OA_{4/8} \approx 1.0$). Secular equilibrium corresponds to an atomic ratio of 5.47×10^{-5}. In groundwater, isotopic equilibrium between ^{238}U and ^{234}U is typically observed ($OA_{4/8} \approx 1$). In isotopically nonequilibrium waters of the southern Siberian Platform, $OA_{4/8}$ can reach values up to 16.

Uranium deposits formed during the Late Mesozoic and Cenozoic uranium ore-forming epochs are located in Chita Transbaikalia and adjacent Mongolia (Mironov, 2006; Shatkov, 2015). Uranium components in groundwater from this region may reflect ongoing redistribution and concentration of uranium in rocks. The aim of this study is to analyze the spatial distribution of uranium components in groundwater across northeastern China, Mongolia, and Chita Transbaikalia.

The study uses a proprietary groundwater database compiled using standardized sampling and analysis methods since 2012. For elemental analysis, water is filtered through a 0.45 μm syringe filter into a pre-weighed 2 ml Eppendorf tube containing ultrapure 70% nitric acid. The concentrations of 72 elements are measured using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) on an Agilent 7500ce quadrupole spectrometer. Uranium isotopic ratios are determined from separate 400 ml samples after ion exchange column extraction, as described in Chebykin et al. (2024).

Groundwater from Chita Transbaikalia and Mongolia forms a compositional cluster. Areas of uranium enrichment and depletion are distinguished, with U concentrations spanning four orders of magnitude. The $OA_{4/8}$–U diagram reveals five groups of groundwater: Group I – Volcanic areas (Arshan, Wudalianchi, Udokan) with UNW = 1–10 and low $OA_{4/8}$; Group II – Siberian Platform, represented by mineral water from the Olkha borehole, with UNW = 10–100 and high $OA_{4/8}$ (12–16); Group III – Transbaikalia and Mongolia (Orgil, Zymka-Arshan, etc.) with UNW ≈ 100 and a wide $OA_{4/8}$ range; Group IV – Transbaikalia and Mongolia (Adrianov spring, etc.) with UNW = 0.1–10 and moderate $OA_{4/8}$; Group V – Transbaikalia (Kuka, Molokovka, Krasnokamensk, Yubileiny) with UNW = 0.01–0.1 and moderate $OA_{4/8}$. The last group includes fresh groundwater from wells in Krasnokamensk and Yubileiny with total mineralization of 410–450 mg/dm³ and high U concentrations (40 and 51 μg/dm³).

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

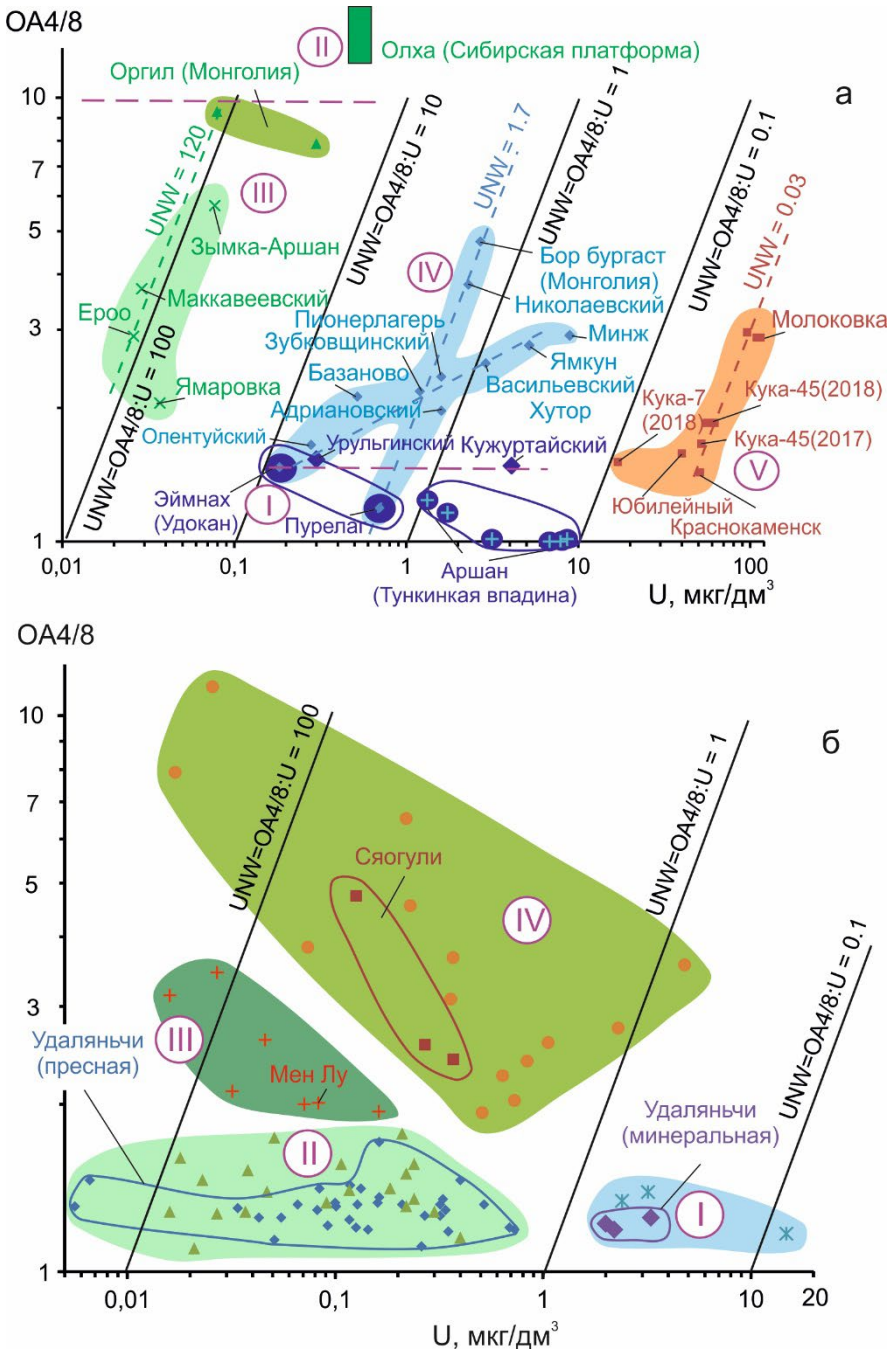


Fig. 1. $OA_{4/8}$–U diagrams for groundwater from Chita Transbaikalia and Mongolia (a) and NE China (b). In panel a, reference data from volcanic territories (Eimnakh and Purelag, Northern Transbaikalia; Arshan, Tunkin Depression) and the non-volcanic Siberian Platform are shown. The UNW parameter (Uranium Normalized Water = $(OA_{4/8})/U$ [dm³/µg]) is visualized using parallel trend lines corresponding to UNW values of 120 (Group III), 1.7 (Group IV), and 0.03 dm³/µg (Group V).

Volcanic areas of the Udokan Range (Northern Transbaikalia) and the Tunkin Depression show mineral water ranges of: $1 < OA_{4/8} \leq 1.47$, $0.18 < U$ (µg/dm³) < 2.2, and $0.27 < A_4$ (e.a.) < 2.62. The representative value for isotopically equilibrated uranium is from carbonated mineral water of the Southern Spring (Wudalianchi volcanoes, NE China): $U = 2.2$ µg/dm³; $OA_{4/8} = 1.19$; $A_4 = 2.62$ e.a. (sample: 06.07.2019). Similarly low $OA_{4/8}$ values are found in thermal springs of the Udokan Range: Purelag (t = 38.9 °C, $U = 0.7$ µg/dm³, $OA_{4/8} = 1.19$, $A_4 = 0.83$ e.a., sample: 30.03.2017) and Eimnakh (t = 39.2 °C, $U = 0.18$ µg/dm³, $OA_{4/8} = 1.47$, $A_4 = 0.27$ e.a., sample: 29.03.2017).

In Chita Transbaikalia, two carbonated waters show uranium characteristics similar to volcanic waters: Kuzhurtai Spring: U = 4.1 μg/dm³, $OA_{4/8}$ = 1.48, A_4 = 6.07 e.a. (sample: 29.08.2018); Urulga Spring: U = 0.3 μg/dm³, $OA_{4/8}$ = 1.53, A_4 = 0.46 e.a. (sample: 29.08.2018).

A representative sample of highly isotopically nonequilibrated uranium from Group III is from the 90 m well at Orgil Sanatorium (Ulaanbaatar, Mongolia): U = 0.079 μg/dm³, $OA_{4/8}$ = 9.3, A_4 = 0.74 e.a. (sample: 03.09.2018).

Water temperature derived from silica solubility, combined with a regional geothermal gradient of 25 °C/km, yields depth equivalents. The results suggest that uranium enrichment–depletion processes are active at 2.4–4.3 km depth (Fig. 2), while such processes are absent above 2.4 km.

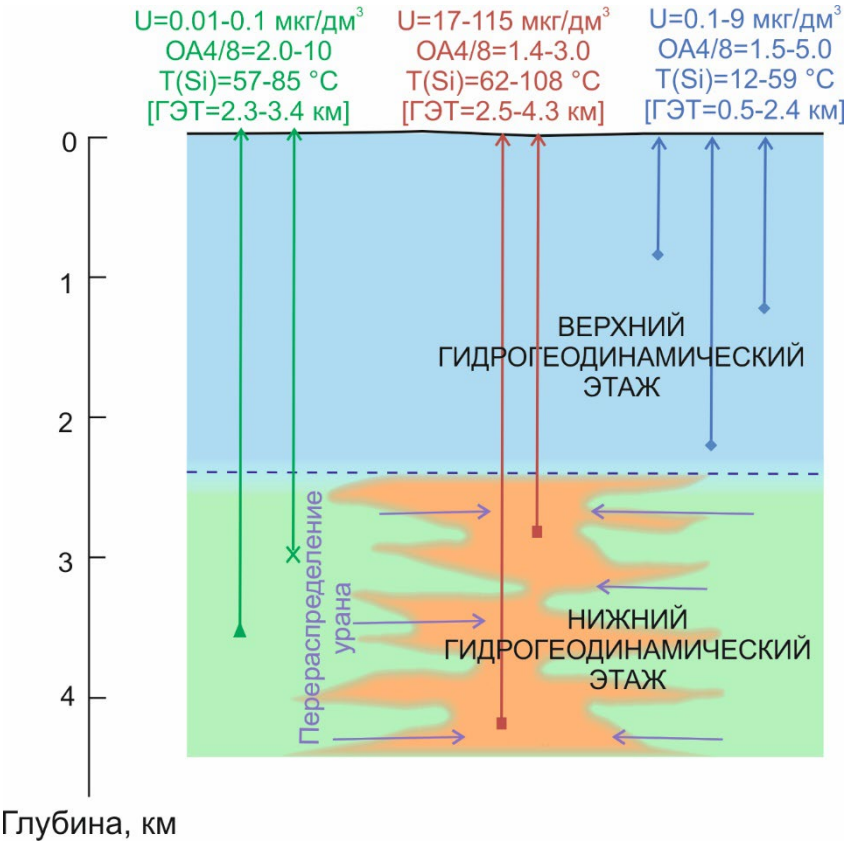


Fig. 2. Illustration of uranium redistribution in the lower hydrogeodynamic tier (depth 2.4–4.3 km), with no such activity in the upper tier (<2.4 km). Symbols correspond to water groups in Fig. 1a.

Groundwater from NE China also shows broad $OA_{4/8}$ and U variation. Four compositional groups are distinguished: Group I – Mineral waters from Wudalianchi volcanoes (TDS = 1.3–2.0 mg/dm³) with low $OA_{4/8}$ and high U, as well as less mineralized waters (TDS = 530–750 μg/dm³); Group II – Fresh ground and surface waters from Wudalianchi (TDS = 190–380 μg/dm³) with low $OA_{4/8}$ and low U; Group III – Fresh and ultra-fresh waters from the Menlu volcanic area (TDS < 400 μg/dm³), elevated $OA_{4/8}$ (2.0–3.5), low U (< 0.16 μg/dm³); Group IV – Fresh waters from Xiaoguli volcanoes with high $OA_{4/8}$ (1.93–11.7), inversely correlated with U concentration.

In general, mineral waters from Wudalianchi are U-enriched relative to local freshwater, but NE China lacks groundwater with high U (>15 μg/dm³) as observed in Group V of Mongolia and Chita Transbaikalia. However, ultra-low U values (down to 0.0005 μg/dm³), similar to Group III, are present.

Conclusion:

Comparative groundwater analysis shows that active uranium redistribution and concentration processes occur in the lower hydrogeodynamic tier (2.4–4.3 km) of the upper crust in Chita Transbaikalia and Mongolia, but not in northeastern China.

1. Mironov, Yu.B. Uranium of Mongolia. 2nd ed. St. Petersburg, 2006. 328 p.
2. Rasskazov, S.V. et al. Chemical hydrogeodynamics of the Ulaanbaatar groundwater reservoir (2012–2023) compared with Baikal coastal reservoirs // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 146–160.
3. Rasskazov, S.V. et al. Uranium components in groundwater of Chita Transbaikalia: comparison with adjacent Inner Asia // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 113–132.
4. Chebykin, E.P. et al. First monitoring results of $^{234}U/^{238}U$ in fault-related waters on the western shore of South Baikal // Dokl. RAN. 2015. Vol. 460, No. 4. P. 464–467.
5. Chebykin, E.P. et al. Geochemical assessment of contaminated discharge impact in Slyudyanka, Pokhabikha River and South Baikal // Geospheric Research. 2024. No. 4. P. 107–136. DOI: 10.17223/25421379/33/7
6. Shatkov, G.A. Streltsov-type uranium deposits // Regional Geology and Metallogeny. 2015. No. 63. P. 85–96.

Реконструкция кинематики разрывных структур с использованием авторского программного комплекса Lineament Stress Calculator в контексте прогноза рудообразующих систем

Свечеревский А.Д., Устинов С.А., Минаев В.А., Лапаев Д.С., Петров В.А.
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва, alexey@svecherevskiy.ru

Для линейных элементов, отчетливо прослеживаемых в рельефе, введён термин «линеамент» (Hobbs, 1904). В большинстве случаев разноранговые линеаменты маркируют зоны разломов различного порядка, механизма формирования и возраста. В силу отсутствия других методов достоверной массовой идентификации тектонических структур в пределах обширных территорий, линеаментный анализ может служить эффективным дистанционным методом реконструкции каркаса разрывных нарушений (Кац и др., 1986).

Существует ряд программных продуктов, позволяющих в автоматическом режиме выделять линеаменты на основе разноплановых данных ДЗЗ и проводить их пространственный анализ. Одним из самых распространенных среди геологов для реализации данной задачи является программное обеспечение (ПО) LESSA (Zlatopolsky, 1992).

На основе отдельно проведённого авторами сравнительного анализа установлено, что достоверные результаты по автоматическому выделению линеаментов, наиболее точно отражающие каркас разрывных нарушений, получаются на основе использования цифровой модели рельефа (ЦМР), в отличие от космоснимков. Учитывая, что линеаменты могут отражать положение зон разрывных нарушений различных кинематических типов, их пространственное положение нуждается в дальнейшей тектонофизической интерпретации, что редко реализуется в рамках многочисленных структурно-геоморфологических исследований. Среди основных разработок по автоматической маркировке линементов и их тектонофизической интерпретации выделяется ПО SimSGM, позволяющее автоматизировать методику структурно-геоморфологического метода, предложенную д.г.-м.н. Л.А. Сим (ИФЗ РАН) (Гордеев и др., 2019) и основанную на модели развития парагенезиса оперяющих трещин в зоне сдвига М.В. Гзовского. Данная модель характеризует зону сдвига по пространственному положению парных систем первичных сколов и системы отрывов до формирования магистрального разрыва. Поэтому рассматриваемый подход применим в большей степени для оценки параметров поля напряжений-деформаций (ПНД) неотектонических структур.

Конечной задачей авторов в контексте проводимых исследований является прогноз месторождений полезных ископаемых, локализация которых во многих случаях определяется положением разноранговых разрывных структур, сформированных на более ранних этапах (докембрий, палеозой, мезозой) развития земной коры. Соответственно, для решения данной задачи важен учет полного парагенезиса разрывов, как до, так и после формирования магистрального разлома и произошедших сдвиговых перемещений его блоков. Для решения данной задачи, как наиболее комплексная, может быть применена модель, предложенная П.Л. Хэнкоком (Hancock and at, 1985). С учетом рассмотренной модели, для автоматизации процесса интерпретации выделяемых разноранговых линеаментов, создано ПО Lineament Stress Calculator (LSC).

Данное ПО написано на языке программирования Python и реализовано в качестве самостоятельного компьютерного приложения с графическим интерфейсом. Входными данными служат векторные линейные объекты, представленные в виде файлов с расширением «.shp», которые широко используются во всех видах геоинформационных систем (ГИС). На начальных этапах анализа при использовании ПО пользователю доступна возможность загрузки в виде линейного объекта (отрезка) тренда анализируемого магистрального разрыва и выделенных в ГИС ручным или автоматическим способами линеаментов. При необходимости ПО также позволяет проводить автоматическое создание линии тренда

магистральной структуры в зависимости от пространственного положения и ориентировок выделенных линеаментов, а также предполагаемой зоны её динамического влияния. После загрузки требуемых входных данных возможно перейти к автоматическому анализу, классификации объектов, расчёту и визуализации параметров сдвиговых ПНД.

Автоматическая реализация программного алгоритма первоначально включает функцию определения типа сдвига (правый или левый) каждой структуры на основе разработанного авторского подхода. При этом проводится предварительная проверка на наличие сдвиговой компоненты. В случае заключения о вероятном отсутствии сдвиговых перемещений выводится соответствующее уведомление. Далее ПО в соответствии с пространственно-геометрическими параметрами выделенных линеаментов, на основе модели сдвига П.Л. Хэнкока, классифицирует линеаменты, наиболее вероятно относящиеся к магистральному разрыву, первичным и вторичным синтетическим и антитетическим сколам, отрывам. Также проводится оценка наличия сдвиговой, сбросовой и взбросовой компонент для оперяющих основной разлом структур. Алгоритм классификации включает анализ пространственного положения линеаментов с учётом азимута их простирания относительно сместителя (тренда) магистральной структуры. Биссектриса острого угла между первичными синтетическими и антитетическими сколами отражает ориентировку оси максимального сжатия, обозначаемую σ_1, биссектриса тупого угла – ось растяжения – σ_3. В случае подтверждения преобладания сдвиговой компоненты, на основе соотношения первичных и вторичных сколов проводится оценка интенсивности и относительной амплитуды смещения по магистральной структуре. С помощью данной функции также возможно установить последовательность смены параметров ПНД в рамках стадий развития рассматриваемой сдвиговой разломной зоны. Результаты анализа предоставляются в виде графических, табличных и векторных данных с атрибутивной информацией в формате «.shp», которые могут быть загружены в ГИС для дальнейшего анализа и визуализации. В частности, ПО создаёт изображения роз-диаграмм ориентировок линеаментов с учетом количества и/или длины объектов с указанием цветом кинематических типов предполагаемых структур и ориентировок главных осей сжатия и растяжения. Помимо прочего, строится пространственная схема с цветовым указанием линеаментов, относящихся к выделенным кинематическим типам для визуального анализа и оценки результатов. Также формируются отчётные таблицы с ключевыми количественными показателями, которые включают параметры кинематики предполагаемых разрывов, значения коэффициента интенсивности смещения, количественное распределение структур по типам, ориентировки главных осей напряжений.

Разработанный программный комплекс LSC был апробирован, значительно ускорил интерпретацию выделенных линеаментов в тектонофизическом контексте и отлично себя зарекомендовал в рамках реализации ряда работ авторов по реконструкции параметров сдвиговых палеотектонических напряжений в контексте решения задачи прогноза месторождений полезных ископаемых различных типов. В частности, получены результаты комплексного анализа разломной тектоники Кольского полуострова (Минаев и др., 2024[1]) и Таймыро-Североземельского орогена (Минаев и др., 2024[2]), выполненные в региональном масштабе. Результаты тектонофизической интерпретации сдвиговых ПНД в зонах крупнейших разломов с помощью LSC позволили определить предполагаемые участки тектонических структур, обладавшие наибольшей гидравлической активностью на момент внедрения базит-ультрабазитовых массивов и дайковых комплексов пегматитовых поясов (для Кольского полуострова) и в процессе позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла (для Таймыро-Североземельского орогена), с которыми связаны основные рудные месторождения дефицитных видов стратегического минерального сырья рассматриваемых регионов.

Для района Туюканского рудного узла на основе использования LSC установлено, что решающее значение в локализации оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов. В пределах зон динамического влияния

установленных структур реконструированы параметры локальных ПНД, а также стадийность формирования данных разрывов (Устинов и др., 2024[1]). Полученные результаты позволили в дальнейшем создать комплексную структурную прогнозно-поисковую модель территории (Устинов и др., 2024[2]).

Для Обручевской системы разломов (западное Прибайкалье) с применением LSC реализован мультимасштабный структурно-тектонофизический анализ. Установлено, что главные северо-восточные разломы региона сформировались как правосторонние сдвиги при субширотной ориентировке оси сжатия. Разломы второго порядка северо-западного простирания являются левосдвиговыми (антитетическими) по отношению к первым. Данные результаты согласуются с моделью аккреции Ольхонского террейна к Сибирскому кратону (Свечеревский и др., 2024).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25-33
2. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
3. Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О. Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Кольского полуострова и её роли в рудообразовании // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 3. С. ES3010.
4. Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О. Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Таймыро-североземельского орогена и ее роли в рудообразовании // Исследование Земли из космоса. 2024. № 5. С. 58–73.
5. Свечеревский А.Д., Устинов С.А., Остапчук А.А. Модель тектонически ослабленных зон района Обручевской системы разломов Байкальской рифтовой зоны на основе тектонофизической интерпретации линеаментов с применением мультимасштабного подхода // Триггерные эффекты в геосистемах. тезисы докладов VII Международной конференции. Москва, 2024. С. 115.
6. Устинов С.А., Чепчугов А.М., Томаровская М.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Яровая Е.В. Структурно-тектонофизический подход к интерпретации результатов линеаментного анализа для прогноза рудообразующих минеральных систем на примере района Туюканского рудного узла // Исследование Земли из космоса. 2024. № 5. С. 35–57.
7. Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Чепчугов А.М., Свечеревский А.Д., Кочкин И.А. Прогнозно-поисковая модель района Туюканского урановорудного узла на основе данных дистанционного зондирования Земли и структурно-тектонофизического подхода // Разведка и охрана недр. 2024. № 4. С. 52–65.
8. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. Struct. Geol. 1985. Vol. 7. No 3–4. P. 437–457.
9. Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geol. Soc. Am. Bull. 1904. Vol. 15. P. 483–506.
10. Zlatopolsky A.A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis – experimental results // Computers & Geosciences. 1992. Vol. 18, No 9. P. 1121–1126.

*Reconstruction of Fault Structure Kinematics Using the Custom Software Suite «Lineament Stress Calculator» in the Context of Ore-Forming System Forecasting

Svecherevskiy A.D., Ustinov S.A., Minaev V.A., Lapaev D.S., Petrov V.A.
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, alexey@svecherevskiy.ru

The term lineament was introduced for linear elements clearly traceable in topography (Hobbs, 1904). In most cases, lineaments of various ranks mark fault zones of differing orders, mechanisms of formation, and ages. Due to the lack of reliable methods for mass identification of tectonic structures across large territories, lineament analysis serves as an effective remote tool for reconstructing fault frameworks (Katz et al., 1986).

Several software products exist for the automatic extraction and spatial analysis of lineaments based on diverse remote sensing data. One of the most widely used by geologists is LESSA (Zlatopolsky, 1992). According to a comparative analysis conducted by the authors, the most reliable results in terms of matching the actual framework of faults are obtained using digital elevation models (DEMs), rather than satellite imagery.

Since lineaments may reflect the locations of faults with varying kinematic types, their spatial orientation requires tectonophysical interpretation — a step often omitted in structural-geomorphological studies. Among the developments enabling automated identification and interpretation of lineaments is the software SimSGM, which automates the structural-geomorphological method proposed by Dr. L.A. Sim (IFZ RAS), based on M.V. Gzovsky's model of shear fault zones (Gordeev et al., 2019). This model describes shear zones by analyzing the spatial distribution of paired primary fractures and tensile fractures formed prior to the main fault. As such, this approach is better suited for assessing stress-deformation fields (SDF) in neotectonic structures.

In contrast, the authors' goal is to forecast ore deposits, the localization of which is often controlled by faults of different ranks formed during earlier geological periods (Precambrian, Paleozoic, Mesozoic). Therefore, it is essential to account for the complete paragenesis of faults — both prior to and after the formation of the master fault and its associated shear displacements.

For this purpose, the model proposed by P.L. Hancock (Hancock et al., 1985) was adopted and implemented in the custom-developed software Lineament Stress Calculator (LSC). The software is written in Python and implemented as a standalone desktop application with a graphical user interface. It takes vector linear features in .shp format as input, commonly used in geographic information systems (GIS).

In the initial stages of analysis, the user may load a linear object representing the trend of a master fault, as well as lineaments identified either manually or automatically in GIS. If needed, LSC can also automatically generate a trend line for the master structure based on the spatial distribution and orientation of the extracted lineaments and the presumed dynamic influence zone.

After loading the necessary input data, the software proceeds to automatic analysis, classification, and visualization of shear SDF parameters. The core algorithm includes an automatic function to determine the type of shear (right- or left-lateral) for each structure using an original method developed by the authors. If a shear component is deemed absent, the user is notified accordingly.

Subsequently, the software classifies lineaments into probable master faults, primary and secondary synthetic and antithetic shear fractures, and tensile fractures according to Hancock's shear model. It also assesses whether a given structure exhibits shear, normal, or reverse faulting. Classification is based on the azimuthal orientation of lineaments relative to the master fault trend. The bisector of the acute angle between primary synthetic and antithetic fractures indicates the

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

orientation of the maximum compressive stress axis (σ_1), while the bisector of the obtuse angle defines the extension axis (σ_3).

If a dominant shear component is confirmed, the software estimates the intensity and relative displacement amplitude along the master structure based on the ratio of primary and secondary fractures. It also allows the reconstruction of SDF parameters through different stages of shear zone development. Results are provided in graphical, tabular, and vector .shp formats, enabling further GIS analysis.

The software outputs rose diagrams of lineament orientations weighted by count and/or length, with color-coded kinematic classifications and orientations of the principal stress axes. Additionally, a spatial scheme with color-coded lineaments by kinematic type is generated, along with tabulated summaries of key metrics: kinematic parameters, shear intensity coefficients, structural counts by type, and orientations of principal stress axes.

The LSC system has been tested and demonstrated significant efficiency in tectonophysical interpretation of lineaments, supporting numerous studies focused on reconstructing paleotectonic shear stress parameters in relation to ore deposit forecasting. For example, LSC was applied to analyze fault tectonics of the Kola Peninsula (Minaev et al., 2024[1]) and the Taimyr–Severnaya Zemlya orogen (Minaev et al., 2024[2]) at a regional scale. The SDF interpretations helped identify the most hydraulically active segments of tectonic structures associated with mafic–ultramafic intrusions and pegmatitic dike swarms on the Kola Peninsula, as well as mineralization during the Late Paleozoic–Early Mesozoic metallogenic cycle in the Taimyr–Severnaya Zemlya orogen.

In the Tuyukan ore node area, LSC revealed that ore localization is primarily controlled by the dynamic influence zones of NE- and NW-trending faults. Local SDF parameters and deformation stage sequences were reconstructed for these fault zones (Ustinov et al., 2024[1]), which later supported the development of a comprehensive structural predictive model for the area (Ustinov et al., 2024[2]).

For the Obruchev Fault System (Western Baikal region), a multiscale structural-tectonophysical analysis using LSC confirmed that major NE faults formed as right-lateral shears under sublatitudinal compression. NW-trending second-order faults are left-lateral antithetic faults relative to the main ones. These findings are consistent with the model of accretion of the Olkhon terrane to the Siberian craton (Svecherevskiy et al., 2024).

The work was carried out under the State Assignment of IGEM RAS.

1. Gordeev N.A., Molchanov A.B. Automation of the structural-geomorphological method for reconstructing shear tectonic stress by L.A. Sim // Geoinformatics. 2019. No. 2. P. 25–33.
2. Katz Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. Fundamentals of Lineament Tectonics. Moscow: Nedra, 1986. 144 p.
3. Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Nafigin I.O. Regional remote analysis of fault tectonics of the Kola Peninsula and its role in ore formation // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24. No. 3. ES3010.
4. Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Nafigin I.O. Regional remote analysis of fault tectonics of the Taimyr–Severnaya Zemlya orogen and its role in ore formation // Remote Sensing of the Earth from Space. 2024. No. 5. P. 58–73.
5. Svecherevskiy A.D., Ustinov S.A., Ostapchuk A.A. Tectonic weakening zones of the Obruchev Fault System (Baikal Rift Zone): tectonophysical interpretation of lineaments using a multiscale approach // Trigger Effects in Geosystems, VII Int. Conf., Abstracts. Moscow, 2024. P. 115.
6. Ustinov S.A., Chepchugov A.M., Tomarovskaya M.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Yarovaya E.V. Structural-tectonophysical interpretation of lineament analysis for predicting ore-forming mineral systems (Tuyukan Ore Node Case Study) // Remote Sensing of the Earth from Space. 2024. No. 5. P. 35–57.
7. Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Chepchugov A.M., Svecherevskiy A.D., Kochkin I.A. Predictive model of the Tuyukan uranium ore node based on remote sensing and structural-

tectonophysical methods // Prospecting and Protection of Mineral Resources. 2024. No. 4. P. 52–65.
8. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. No. 3–4. P. 437–457.
9. Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society of America Bulletin. 1904. Vol. 15. P. 483–506.
10. Zlatopolsky A.A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis): automated linear image feature analysis – experimental results // Computers & Geosciences. 1992. Vol. 18. No. 9. P. 1121–1126.

Модель рудообразования палеодолинных месторождений витимского типа (Республика Бурятия)

Солодов И.Н.[1], Нестерова М.В.[2]
[1]АО «Росатом Недра», INSolodov@armz.ru; [2]ИГЕМ РАН, NestMV@igem.ru

Урановые рудные залежи кайнозойских палеодолинных месторождений Витимского уранового рудного района (ВУРР) приурочены к миоценовым аллювиальным отложениям в палеооврагах на склонах сводовых поднятий – Северное, Центральное, Байсыханское и Ингурское (рис.1). Палеоречные долины 2 и 3 порядков впадают в стволовые палеодолины 1 пордка – Хойготсквая, Аталангинсквая и Амалатская. В ВУРР бурением скважин выявлено 235 палеодолин 2 и 3 порядков. Из них 116 палеодолин безрудные и только 13 не изучены разведочным бурением.

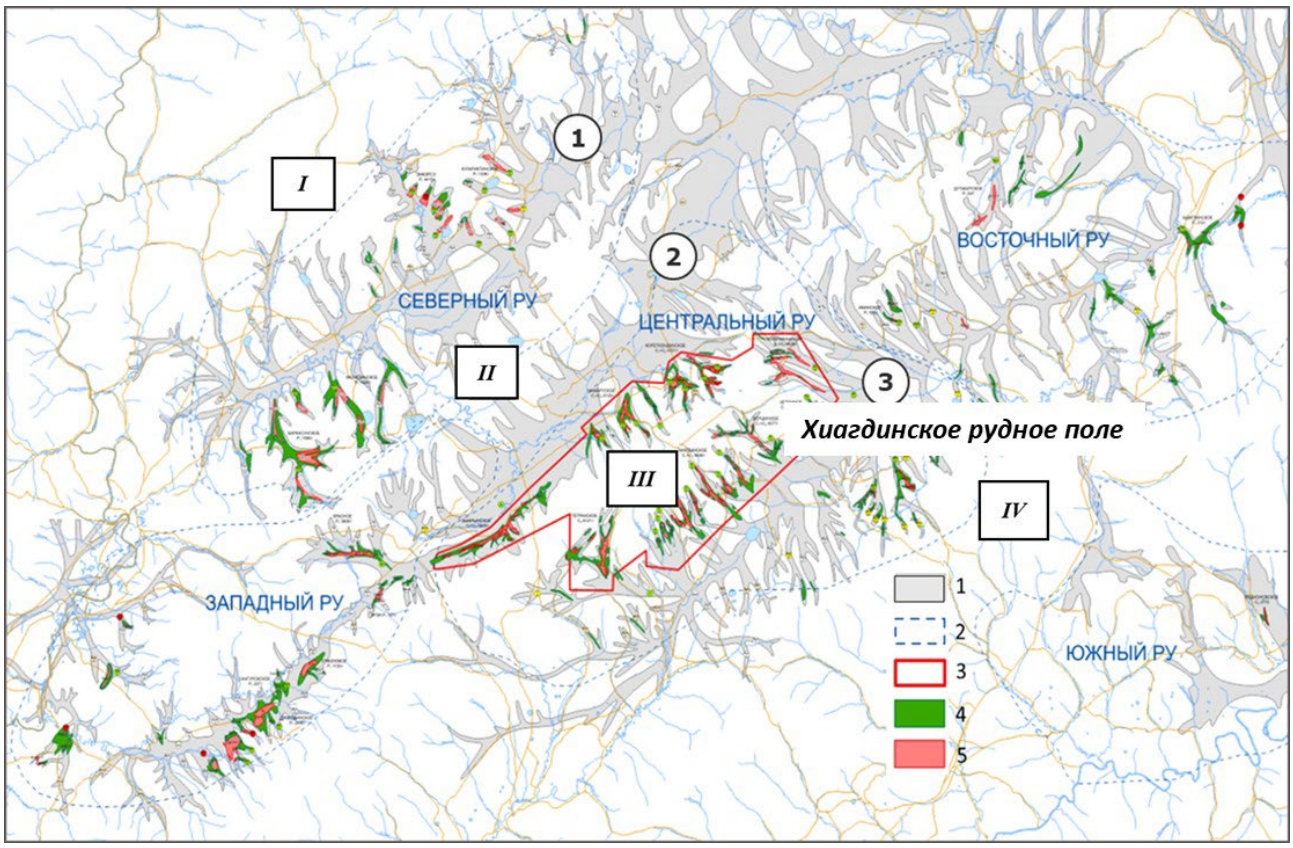


Рис. 1. Витимский УРР. Центральный рудный узел - Хиагдинское рудное поле (ХРП). Палеодолины первого порядка: Хойготская (1), Аталангинская (2) и Амалатская (3) и разделящие их Северное (I), Центральное (II) Байсыханское (III) и Ингурское (IV) поднятия.

1 - палеодолины первого, второго и третьего порядков; 2 - рудные узлы; 3 - ХРП; 4 - некондиционные урановые руды; 5 - кондиционные урановые руды.

Источником урана в рудах рудоносных палеооврагов являются преимущественно граниты витимканского комплекса и в меньшей степени гранитоиды баргузинского комплекса, слагающие фундамент в области распространения рудовмещающих аллювиальных отложений. При наличии поисковых критериев – геолого-структурные (палеодолины, врезанные в гранитный фендамент на склонах поднятий), литологические (аллювиальные и пролювиально-делювиальные рудовмещающие отложения) и геохимические (концентрирование урана в рудах на углефицированных растительных остатках; формирование руд на окончании зон грунтово-пластового окисления), используемых при поисках, около половины палеодолин (106) оказались безрудными. Это

свидетельствует о том, что применение классической теории пластово-инфильтрационного рудообразования на окончании зон грунтово-пластового окисления и разработанные на ее основе поисковые критерии являются недостаточными для выявления урановых месторождений витимского типа.

В результате проведенных исследований в последние годы (Солодов и др., 2022-2025) доказано, что концентрирование урана в рудах ХРП происходит в постоянно действующем неподвижном восстановительном геохимическом барьере. Основными восстановителями урана являются эпигенетические углеводороды в паре с водородными бактериями, создающими контрастную восстановительную обстановку – Eh -420…-300 мВ. Углеводороды (УВ) поступают в рудоносный горизонт, сложенный пролювиально-делювиальными и аллювиальными отложениями, по зонам тектонических нарушений в гранитном фундаменте в составе углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод. Предполагается, что углекислота и УВ образуются в результате гранитизации, продолжающейся с позднего палеозоя по настоящее время, и преобразования органического вещества в нефтематеринских породах на глубине более 6 км.

Углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды обнаружены на всех месторождениях ХРП. Эксфильтрация углекислых HCO_3-Mg подземных вод в рудоносный горизонт видна на пьезометрической поверхности в виде небольшого купола. Установлено закономерное возрастание концентрации свободного CO_2 с ростом глубины залегания рудоносного горизонта до 3,5 г/дм^3 на глубине 330 м Соответственно в этом направлении увеличивается содержание HCO_3 до 6,0 и Mg до 0,62 г/дм^3. Современное действие восстановительного геохимического барьера проявлено в резком снижении концентрации урана в подземных водах от 500 до 0,2 мкг/дм^{3}в направлении от верховьев (зона инфильтрации кислородсодержащих метеорных вод) к низовьям речных палеодолин.

Углеводороды в виде образований микронного размера встречены в осадочных и кристаллических породах во всем геологическом разрезе месторождений ХРП от зоны дезинтеграции гранитов фундамента, в осадочной (рудоносной) и вулканогенно-садочной толщах, на стенках трещин базальтов, вплоть до почвенного покрова. Урановые рудные залежи, залегающие на глубине 150 – 300 м, отпечатаны в почвенном покрове в виде аномалий содержания нефти >600 мг/кг, повторяющие контуры залежей урановых руд. Установлена закономерность: чем выше содержание нефти, тем выше максимальное содержание урана в рудах.

Углекислые HCO_3-Mg подземные воды, содержащие УВ, восходят из фундамента и разгружаются в рудоносном горизонте на протяжении всего времени существования рудовмещающего аллювия - <17 МА. Интенсивность поступления эпигенетических восстановителей урана возрастала в периоды центрального вулканизма и сейсмической активности.

Под действием углекислых подземных вод происходило и продолжается осветление рудовмещающих отложений. Этот процесс охватывает все толщи – от коры выветривания гранитов до элювия базальтов, венчающих геологический разрез на месторождениях ХРП.

На существование постоянно действующего неподвижного геохимического барьера концентрирования урана под действием эпигенетических восстановителей указывают следующие факты (рис.2): 1) рельеф фундамента Байсыханского поднятия сформировался в конце олигоцена до начала формирования будущих рудовмещающих аллювиальных отложений; 2) растягивающие тектонические движения привели к образованию тектонически ослабленных зон по которым формировались палеодолины и палеооврагии возникла среда транспорта глубинных углекислых подземных вод, содержащих эпигенетические восстановители; 3) источник урана в гранитах и урановые рудные залежи совмещены в пространстве; 4) область питания подземных вод в рудоносных горизонтах всегда существовала в период рудообразования в центральной части Байсыханского поднятия; 5) сохранение урана в области питания кислород-содержащих метеорных вод – результат

постоянного поступления из фундамента эпигенетических восстновителей, препятствующих окислению урана.

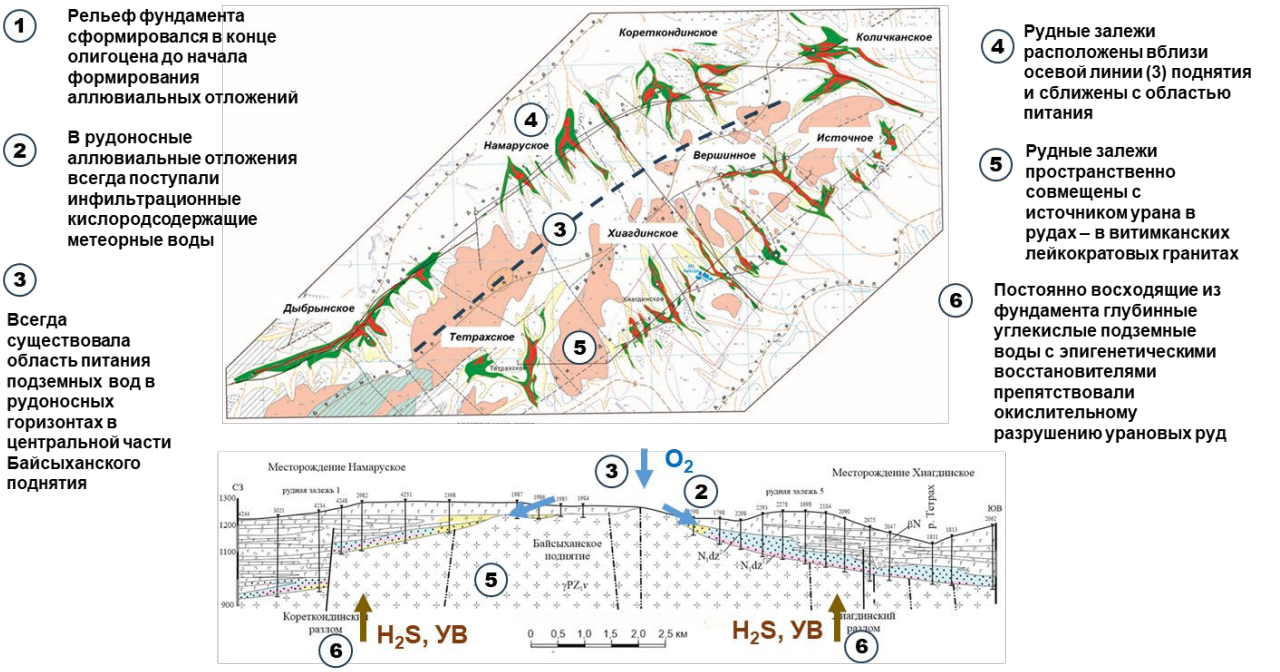


Рис. 2. Рудообразующая система на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля.

В дополнение к используемым при поисках урановых месторождений витимского типа геолого-структурных, литологических и геохимических критериев предлагается включить дополнительные критерии: 1) гидрокарбонатные магниевые подземные воды; 2) осветление вплоть до обеления рудовмещающих аллювиальных отложений; 3) аномалии содержания углеводородов нефтяного ряда в почвенном покрове.

Месторождения урана витимского типа наиболее соответствуют термину, предложенному С.Ф. Винокуровым (2022) – «инфильтрационно-эксфильтрационные».

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы РАН и АО «Росатом Недра».

1. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды – рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // ГРМ, 2022, том 64, №1, с. 151 - 162.
2. Солодов И.Н., Карамушка В.П. Об эпигенетических восстановителях урана на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Разведка и охрана недр, 2023, №2, с. 21-29.
3. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Распространенность углекислых подземных вод и углеводородов на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // ГРМ, 2023, том 65, № 6, с. 495–508.
4. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Осветление рудовмещающих аллювиальных отложений на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля – рудолокализующий и рудосохраняющий фактор // ГРМ, 2025, том 67, №3, с. 376-394.
5. Винокуров С.Ф., Типизация гидрогенных месторождений урана // Геология рудных месторождений, 2022, том 64, № 1, с. 113–134.

***Ore-Formation Model for Paleovalley Deposits of the Vitim Type (Republic of Buryatia)**

Solodov I.N.[1], Nesterova M.V.[2]
[1]JSC "Rosatom Nedra", INSolodov@armz.ru; [2]IGEM RAS, NestMV@igem.ru

Uranium ore bodies of the Cenozoic paleovalley-type deposits in the Vitim Uranium Ore District (VUOD) are confined to Miocene alluvial sediments in paleogullies located on the slopes of domal uplifts — Severnoye, Tsentralnoye, Baysykhanskoye, and Ingurskoye (Fig. 1). The second- and third-order paleoriver valleys discharge into first-order trunk paleovalleys — Khoigotskaya, Atalanginskaya, and Amalatskaya. A total of 235 second- and third-order paleovalleys have been identified through drilling in VUOD. Of these, 116 paleovalleys are barren, and only 13 have not been studied by exploratory drilling.

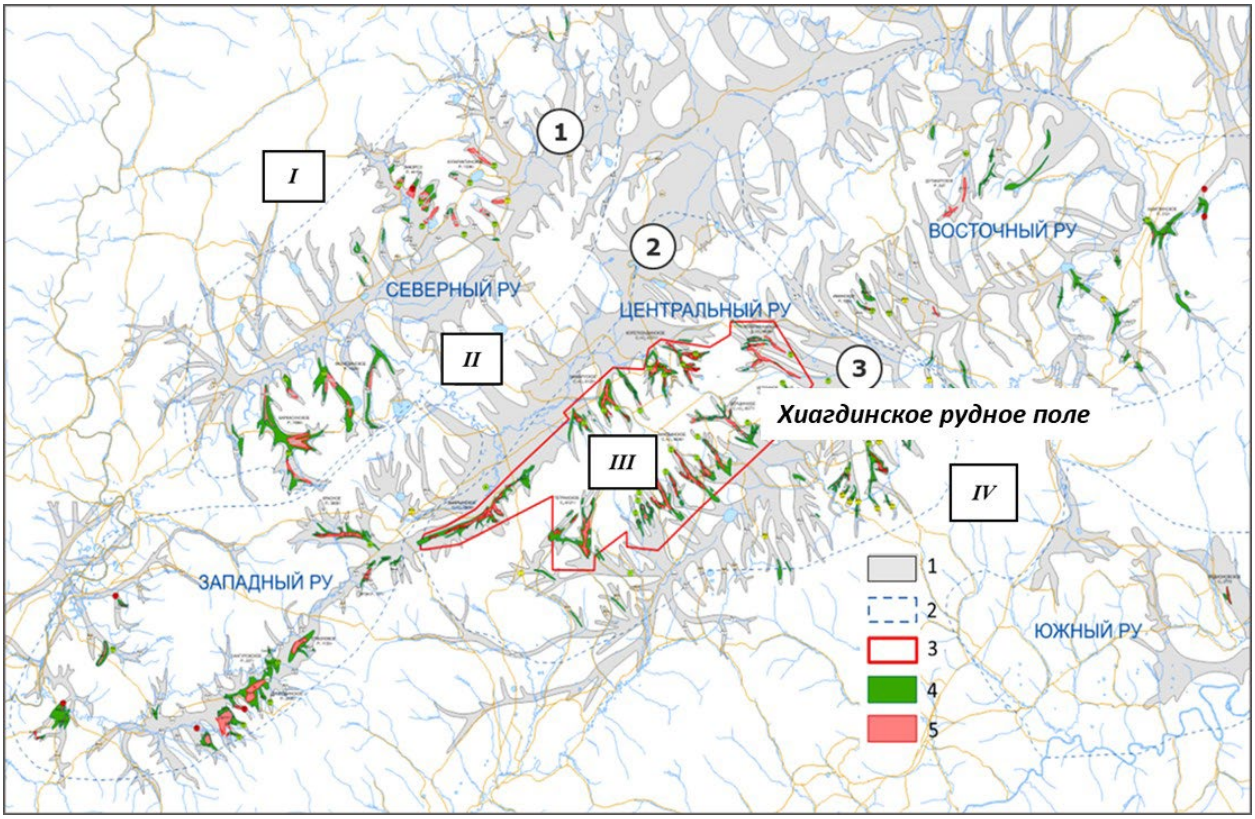


Fig. 1. Vitim Uranium Ore District. Central ore cluster — Khiagda ore field (KOF). First-order paleovalleys: Khoigotskaya (1), Atalanginskaya (2), and Amalatskaya (3), and the separating Severnoye (I), Tsentralnoye (II), Baysykhanskoye (III), and Ingurskoye (IV) uplifts.

1 – paleovalleys of the first, second, and third orders; 2 – ore clusters; 3 – Khiagda Ore Field; 4 – subeconomic uranium ores; 5 – economic uranium ores.

The primary source of uranium in the ore-bearing paleogullies is the Vitimkan granitic complex and, to a lesser extent, the Barguzin granitoids, forming the basement beneath the ore-hosting alluvial sediments. Despite using standard exploration criteria — geological-structural (paleovalleys incised into the granitic basement on uplift flanks), lithological (alluvial and proluvial-deluvial ore-hosting sediments), and geochemical (uranium concentration in ores on carbonized plant remains; ore formation at the edge of groundwater oxidation zones) — nearly half the paleovalleys (106) turned out to be barren. This indicates that the classical model of stratum-controlled infiltration-type ore

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

formation at the edge of groundwater oxidation zones and the associated exploration criteria are insufficient for discovering Vitim-type uranium deposits.

Recent studies (Solodov et al., 2022–2025) demonstrate that uranium concentration in KOF ores occurs within a persistent immobile reducing geochemical barrier. The primary uranium reducers are epigenetic hydrocarbons in conjunction with hydrogen-reducing bacteria, creating a strong reducing environment — Eh from −420 to −300 mV. Hydrocarbons (HCs) enter the ore-bearing horizon — composed of proluvial-deluvial and alluvial deposits — via fault zones in the granitic basement, carried by carbonated hydrocarbonate–magnesium underground waters. These CO_2-rich waters and HCs are hypothesized to originate from ongoing granitization (since the Late Paleozoic) and organic matter transformation in petroleum source rocks at depths greater than 6 km.

Carbonated hydrocarbonate–magnesium waters have been detected at all deposits within the KOF. Exfiltration of these waters into the ore-bearing horizon is reflected on the piezometric surface as a small dome. There is a regular increase in free CO_2 concentration with depth, reaching 3.5 g/dm³ at 330 m. Correspondingly, HCO_3^- reaches 6.0 g/dm³ and Mg^{2+} up to 0.62 g/dm³. The active reducing barrier is evidenced by a sharp decrease in uranium concentration in groundwater from 500 to 0.2 μg/dm³ along flow from the infiltration zones (upper paleovalley reaches) toward the discharge zones (lower reaches).

Micron-sized hydrocarbon inclusions are found in sedimentary and crystalline rocks throughout the geological profile of KOF deposits — from weathered granite zones and sedimentary ore-bearing formations to volcanic-sedimentary layers and even soil cover. Uranium ore bodies, lying at depths of 150–300 m, are reflected in the soil as petroleum anomalies exceeding 600 mg/kg, matching the outlines of uranium ore zones. A correlation is observed: the higher the petroleum content, the higher the maximum uranium concentration in ore.

The carbonated hydrocarbonate–magnesium waters containing hydrocarbons continuously ascend from the basement and discharge into the ore-bearing horizon throughout the lifespan of the alluvium — <17 Ma. The supply of epigenetic uranium reducers intensified during phases of central volcanism and seismic activity.

These CO_2-rich waters have caused — and continue to cause — bleaching of the ore-hosting sediments, affecting all formations from the weathered granite zone to the basalt-derived eluvium at the top of the stratigraphic section in KOF deposits.

The existence of a long-lived, immobile geochemical barrier concentrating uranium via epigenetic reducers is supported by the following evidence (Fig. 2):

1)the topography of the Baysykhan uplift's basement was established in the late Oligocene, prior to deposition of the alluvial ore-hosting strata;

2)extensional tectonics formed weakened zones where paleovalleys developed, enabling deep CO_2-bearing waters carrying epigenetic reducers to migrate;

3)uranium sources in granites and uranium ore bodies are spatially coincident;

4) the recharge area for groundwater in ore horizons was active during the ore-forming period in the central part of the Baysykhan uplift;

5)preservation of uranium in oxygen-rich meteoric water recharge areas is attributed to continuous delivery of reducers from the basement that prevent uranium oxidation.

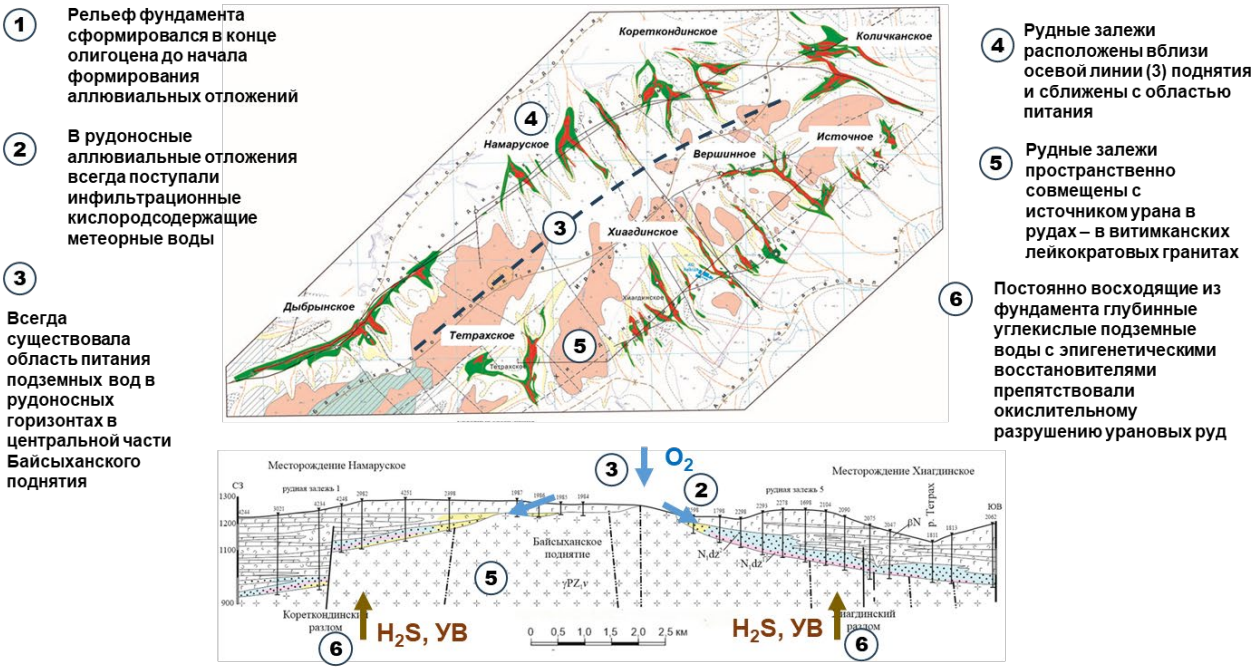


Fig. 2. Ore-forming system in the Khiagda Ore Field uranium deposits.

In addition to standard geological-structural, lithological, and geochemical criteria used in exploring Vitim-type uranium deposits, the following indicators are proposed for inclusion: 1) presence of hydrocarbonate–magnesium groundwater; 2) bleaching (up to whitening) of ore-hosting alluvial sediments; 3) anomalies of petroleum-type hydrocarbons in soil cover.

Vitim-type uranium deposits best correspond to the term proposed by S.F. Vinokurov (2022) - infiltration–exfiltration-type deposits.

This research was supported by the State Program of the Russian Academy of Sciences and JSC “Rosatom Nedra”.

1. Solodov I.N., Nesterova M.V. Carbonated Groundwater as a Uranium-Preserving Factor in the Khiagda Ore Field Deposits (Republic of Buryatia) // Ore Deposit Geology (GRM), 2022, Vol. 64, No. 1, pp. 151–162.
2. Solodov I.N., Karamushka V.P. On Epigenetic Uranium Reducers in the Khiagda Ore Field Deposits (Republic of Buryatia) // Prospecting and Protection of Mineral Resources, 2023, No. 2, pp. 21–29.
3. Solodov I.N., Nesterova M.V. Distribution of Carbonated Groundwater and Hydrocarbons at the Uranium Deposits of the Khiagda Ore Field (Republic of Buryatia) // Ore Deposit Geology (GRM), 2023, Vol. 65, No. 6, pp. 495–508.
4. Solodov I.N., Nesterova M.V. Bleaching of Ore-Hosting Alluvial Deposits at the Khiagda Ore Field Uranium Deposits as an Ore-Localizing and Ore-Preserving Factor // Ore Deposit Geology (GRM), 2025, Vol. 67, No. 3, pp. 376–394.
5. Vinokurov S.F. Classification of Hydrogene Uranium Deposits // Ore Deposit Geology (GRM), 2022, Vol. 64, No. 1, pp. 113–134.

Цаган-хунтейский трахириолит - трахибазальтовый комплекс Цаган-Хуртейской впадины Северо-Монгольской - Западно-Забайкальской рифтовой зоны: новые геохронологические, геохимические и изотопно-геохимические данные

Стриха В.Е.[1,2], Гольцин Н.А.[1], Юрченко Ю.Ю.[1]
[1]Институт Карпинского, Vasiliy_Strikha@karpinskyinstitute.ru; [2]АмГУ, vestrikha@mail.ru

На территории западного Забайкалья широко развиты осадочно-вулканогенные образования цаган-хунтейского вулканического комплекса, породы которого являются благоприятной средой для редкометалльного, флюоритового, молибденового и уранового оруденения (материалы ГДП-200 листа М-49-II).

Комплекс представлен преимущественно вулканогенными образованиями, включая покровные фации одноименной свиты, субвулканические жерловые и экструзивные фации, которые слагают вулкано-тектонические структуры линейного и центрального типов. Стратотипической местностью традиционно считается территория лево и правобережья р. Хилок, включая отроги хр. Цаган_Хуртей, где в пределах Цаган-Хуртейской впадины установлен наиболее наиболее представительный разрез отложений цаган-хунтейской свиты. По данным (Государственная…, 2012) в восточной (стратотипической) части грабена цаган_хунтейская свита характеризуется трехчленным делением (участок Сарантуй), с развитем в нижней части разреза лавами и туфами пантеллеритов и комендитов, трахитами, трахиандезитами, риодацитами, их туфами (700 м); в средней трахиандезитами, трахиандезибазальтами, трахибазальтами, андезитами, андезибазальтами, базальтами, их туфами, туфопесчаниками, туфоалевролитами, содержащими отпечатки флоры (300 м), и в верхней трахириолитами, трахириодацитами, трахитами, риолитами и их туфами (200 м). Полная мощность свиты – от 1000 до 1200 м.

Образования свиты распространены также западнее на хр. Цаган-Хуртей. По данным (материалы ГДП-200 листа М-49-II) наиболее крупное поле (4-6 х 26 км) вулканогенных пород сохранилось южном склоне хребта в верховьях рек Гонгота, Бугутуй, Хурегат. Они образуют здесь фрагмент синклинальной складки северо-восточного простирания. Лучше сохранившееся северное крыло складки сложено чередованием покровов эффузивов кислого и основного состава, выше залегают конгломераты, которые завершают разрез свиты, выполняя ядро складки. Падение пород преимущественно крутое 75-80º на юго-восток и лишь несколько выполаживается до 50-60º в центральной части синклинали, в конгломератах местами установлены встречные падения, а на юго-западе фиксируются разнонаправленные элементы залегания, указывающие на периклинальное замыкание складки. Сводный разрез отложений, составленный в верховьях р. Хурегат и на правобережье р. Зурун, имеет следующее строение. В нижней части развиты крупнопорфировые, миндалекаменные и афировые трахибазальты (140-260 м) чередующиеся с афировыми и мелкопорфировыми, нередко флюидальными трахириолитами (80-1400 м), туфами трахириолитов (до 180 м), в верхней части залегают конгломераты галечно-валунные вулканомиктовые, несортированные с грубозернистым песчаниковым заполнителем (10-20% до 40%) с редкие прослои (10-20 см) песчаников, в верхах разреза (250-300 м) преобладают конглобрекчии с прослоями вишневых туфоалевролитов, туфов (10-20 м) кислого и смешанного состава. Общая мощность более 4000 м.

Не взирая на имеющиеся в литературе данные о рубидий-стронциевом возрасте пород в 207-219 млн. лет (Ярмолюк и др., 2001, Воронцов и др., 2007), что отвечает позднему триасу, возраст цаган-хунтейского комплекса в практике геологосъемочных работ принимается раннетриасовым (Государственная…, 2012).

Для уточнения возраста становления цаган-хунтейского комплекса в пределах Цаган-Хуртейской впадины были выполнены петрографические, геохронологические, геохимические и изотопные исследования пород в пределах участков Сарантуй и Бугутуй. Участок Сарантуй расположен в восточной части Цаган-Хуртэйского впадины, фактически

совпадая с участком работ на Саранском участке (Воронцов и др., 2007), а участок Бугутуй расположен в верховьях одноименного ручья, правого приток р.Хилок (район г. Голец Бугутуй), в западной части впадины.

На участке Сарантуй при проведении работ по совершенствованию легенды Алдано-Забайкальской серийной легенды масштаба 1:10000000 **в** коренных обнажениях естественных и искусственных (придорожные карьеры и расчистки) были опробованы следующие разновидности пород цаган-хунтейского вулканического комплекса: трахидолериты черного цвета с мелкими порфировыми выделениями плагиоклаза и темноцветных минералов (всего вкрапленников 30% от общего объема), субвулканические трахиандезиты темно-серого цвета с порфировыми таблицами плагиоклаза (1-2 мм, 20%), трахириолиты сургучного цвета с редкими мелкими (до 1 мм) вкрапленниками плагиоклаза, с флюидальной стекловатой основной массой, мелкопорфировые трахибазальты из цемента лавобрекчий базальтов, обломки в которых представлены трахибазальтами с миндалекаменной текстурой, трахиандезибазальты мелкопорфировые темно-серые до черного.

На участке Бугутуй при производстве ГДП-200 листа М-49-II было проведено петрографические, геохронологические и геохимические исследования риолитов и трахириолитов Цаган-Хуртейского грабена.

Определение содержаний главных элементов в породах выполнено рентгеноспектральным флуоресцентным анализом (аналитик В.Н.Кириллов), а содержания элементов-примесей, включая РЗЭ, определены на масс-спектрометре Elan 6100 DRC с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) в Центральной лаборатории ФГУП ВСЕГЕИ (аналитик В.Л. Кудряшев).U-Pb датирование цирконов осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре Изотопных Исследований ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского (аналитики Н.В.Родионов, П.А.Львов, Е.А.Лепехина). Анализ изотопного состава Sr и Nd выполнен на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON (Thermo) (Центр изотопных исследований, ВСЕГЕИ) по стандартной методике (аналитик Е.С. Богомолов).

В катодолюминесцентном изображении зерна циркона из пород комплекса характеризуются тонкой зональностью или наличием следов секториальной зональности.

На участке Сарантуй - стратотипической для цаган-хунтейской свиты местности в правом борту р.Хилок U-Pb SIMS методом проведена оценка изотопного возраста трахириодацитов (обр. 345/2, табл. 1, 51° 39' 25" с.ш., 111° 25' 37.1" в.д.) - 223,9±1,0 млн лет, СКВО – 0,81, вероятность конкордантности 0,37, n = 15, трахиандезибазальтов (обр. 347/1, 51° 40' 40.6" с.ш., 111° 29' 56.6" в.д.,) - 228,8±2,1 млн лет, СКВО – 1,6, вероятность конкордантности 0,21, n = 11.

На участке Бугутуй (руч. Бугутуй, правый приток р.Хилок) в юго-западной части Цаган-Хуртейского грабена получены следующие датировки: для риолита (обр. 1134, 51° 30' 00" с.ш., 109° 50' 00" в.д.) - 222,1±1,6 млн лет, СКВО – 0,055, вероятность конкордантности 0,81, n = 15, трахириолита (обр. 1135, табл. 1, 51° 29' 40" с.ш., 109° 50' 30" в.д.) - 209,9±2,0 млн лет, дискордия, СКВО – 0,35.

При характеристике петрогеохимических особенностей пород использованы также данные (Ярмолюк и др., 2001, Воронцов и др., 2007) для вулканогенных образований Цаган-Хуртейской ассоциации.

В составе комплекса преобладают породы основного и кислого состава умеренной щелочности, при резко подчиненном развитии средних пород. В группе основных пород – базальтоидов, преобладают трахибазальты, реже развиты трахидолериты и трахиандезибазальты. В группе кислых пород наиболее развиты трахириолиты, трахириодациты и комендиты (Ярмолюк и др., 2001).

Базальтоиды по химическому составу преимущественно высокотитанистые (более 1,5 % TiO_2), низкоглиноземистые (менее 17% Al_2O_3), умеренно- и высококалиевые породы. По соотношению FeO*/(FeO*+MgO) – SiO_2 они являются магнезиальными породами, а по соотношению Na_2O+K_2O-CaO – SiO_2 - относятся к известково-щелочной серии.

По содержанию элементов-примесей базальтоиды цаган-хунтейского комплекса в целом близки к базальтам OIB, отличаясь от них низкими содержаниями Ta, Nb, с образованием на спайдердиаграмме отчетливо выраженных минимумов этих элементов. Базальтоиды характеризуются дифференцированным распределением REE, с преобладанием с преобладанием LREE над HREE, отношение $(La/Yb)_n$ = 5,1-14,1, при отсутствии европиевой аномалии Eu/Eu*= 1,08-0,96.

По химическому составу трахириолиты, трахириодациты, риолиты и комендиты варьируют по глиноземистости. Среди них выделяются метаглиноземистые, перглиноземистые и реже, перщелочные разности. По соотношению SiO_2 - K_2O они относятся к породы относятся к высококалиевой, реже шошонитовой сериям. По соотношению FeO*/(FeO*+MgO) – SiO_2 они являются преимущественно железистыми, в меньшей мере магнезиальными породами. По соотношению Na_2O+K_2O-CaO – SiO_2 породы относятся, в основном, к известково-щелочной, реже к щелочной сериям.

По содержанию большинства элементов-примесей кислые породы характеризуются близкими содержаниями с базальтоидами, отличаясь от них более высокими содержаниями Rb, Th, U, K, HREE, и более низкbми Ba, Ta, Nb, Sr, P, Ti, с отчетливо выраженными минимумами на мультипликационных диаграммах. Значения $(La/Yb)_n$ в кислых породах составляет 5,5-12,5, характерно также наличие отчетливо выраженной отрицательной европиевой аномалии Eu/Eu*= 0,78-0,25.

Для оценки состава и возраста источников базальтоидных и кислых расплавов проведены исследования изотопного состава Sr и Nd пород. базальтоидах фиксируются положительные значения $\varepsilon_{Nd}(T)$ варьирующие от 1,6 в трахибазальтах до 5,9 в трахидолеритах, значения ε_{Sr} составляют 4,6 и -2,28 соответственно. Для трахириолитов получены значения $\varepsilon_{Nd}(T)$ = 1,4 и $\varepsilon_{Sr}(T)$ = 19,6. По изотопным характеристикам они сопоставимы с образованиями рифейской изотопной провинции Центральной Азии - T_{DM} = 0,6-0,9 млрд лет. Отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в базальтоидах составляет 0,7042-0,7049. В трахириолитах установлены более высокие величины отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7259.

Результаты проведенных исследований позволяют уточнить изотопный возраст, петрогеохимические и изотопно-геохимические особенности вулканических пород цаган-хунтейского комплекса, развитых в пределах Цахан-Хуртейской впадины, а также рассмотреть вопросы петрологии и геодинамической условий их формирования.

Полученная в результате геохронологических исследований U-Pb SIMS методом оценка возраста пород цаган-хунтейского комплекса подтверждает полученный ранее Rb-Sr методом (Ярмолюк и др., 2001, Воронцов и др., 2007) позднетриасовый возраст пород в диапазоне 209-228 млн лет..

Обогащение базальтоидов цаган-хунтейского комплекса Rb и, K, относительно легких РЗЭ и высокозарядных элементов, таких как Nb и Ta, которое проявлено на спайдердиаграммах, нормированных по примитивной мантии, наряду с их низкой магнезиальностью (MgO менее 5%), свидетельствует об их субдукционной природе (Туркина, 2014). Следует отметить, что повышенная титанистость характерна для базальтов, образующихся в условиях задугового растяжения (Туркина, 2014). Для оценки вклада различных источников в состав субдукционных габброидов использована диаграмм Nb/Y-Zr/Y (Condie, 2003), Анализ диаграммы показывает, что фигуративные точки составов базальтоидов как по авторским данным, так из литературных источников, располагаются в поле базальтов островных дуг и активных континентальных окраин, имеющих деплетированный мантийный источник, что противоречит представлениям об их формировании под воздействием мантийного плюма, существовавшего на рассматриваемой территории в раннемезозойское время (Ярмолюк и др., 2001, Воронцов и др., 2007).

Породы кислой группы характеризуются прежде всего высокой железистостью и высокими содержаниями высокозарядными элементами (Nb, Ta, Zr, Y) в сочетании с низкими концентрациями Ba, Sr, P, Ti, что определяет их резкие минимумы на спайдердиаграммах. На диаграмме $(K_2O+Na_2O)/CaO$ - Zr+Nb+Ce+Y породы кислой группы располагаются в поле

гранитов А-типа. По соотношению Y/Nb (> 1,2) породы комплекса относятся к подтипу A_2 (Eby, 1992), А-граниты которого могут иметь различное происхождени, как за счет мантийносвязанных базитовых, так и коровых источников. Судя по высоким значениям соотношений изотопов стронция, полученных для трахириолитов авторами, так и для комендитов по литературным данным (Ярмолюк и др., 2001), а также по расположению пород кислой группы на диаграмме Rb/Sr – Ba/Sr преимущественно в поле пород, образованных из богатых глинистым материалом источников (Sylvester, 1998), большинство пород кислой группы формировалось за счет коровых, существенно метапелитовых источников.

Полученные данные свидетельствуют о формировании пород цаган-хунтейского комплекса в условиях тыловой зоны познетриасовой активной окраины Сибирского палеоконтинента, при существовании Монголо-Охотского океанического бассейна, за счет рифейских мантийных деплетитованных и коровых, существенно метапелитовых, источников.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00, от 14.01.2022 г. № 049-00018-22-01, от 10.01.2023 г. № 049-00017-23-1

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист M-49 (Петровск-Забайкальский). Объяснительная записка / С. Н. Пехтерев, Е. В. Нечепаев, Н. А. Артамонова и др.– СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 438 с.
2. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Лыхин Д.А., Дриль С.И., Татарников С.А., Сандимирова Г.П. Источники магматизма и геодинамика раннемезозойской Северо-Монгольской — Западно-Забайкальской рифтовой зоны// Петрология, 2007, т. 15, № 1, с. 37—60.
3. Туркина О. М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов: учеб. пособие // Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.
4. Ярмолюк В. В., Литвиновский Б. А. Этапы формирования и источники щелочно-гранитоидного магматизма Северо-Монгольского-Забайкальского рифтового пояса в перми и триасе // Петрология, 2001, т. 9, № 4, с. 351–380.
5. Condie K.C. Incompatible Element Ratios in Oceanic Basalts and Komatiites: Tracking Deep Mantle Sources and Continental Growth Rates with Time. Geosystems, 2003, 4, 1-28. https://doi.org/10.1029/2002GC000333
6. Eby G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // Geology. 1992. V. 20. P. 641–644.
7. Sylvester P. J. Post-collisional strongly peraluminous granites // Lithos. 1998. V. 45. P. 29–44.

*Tsagan-Khuntei Trachyriolitoid–Trachybasalt Complex of the Tsagan-Khurtei Depression, North Mongolian–Western Transbaikalian Rift Zone: New Geochronological, Geochemical, and Isotope-Geochemical Data

Strikha V.E.[1,2], Goltsin N.A.[1], Yurchenko Yu.Yu.[1]
[1]Karpinsky Geological Institute, Vasiliy_Strikha@karpinskyinstitute.ru; [2]Amur State University, vestrikha@mail.ru

Volcano-sedimentary rocks of the Tsagan-Khuntei volcanic complex are widely developed in Western Transbaikalia, and are considered a favorable host environment for rare-metal, fluorite, molybdenum, and uranium mineralization (materials of State Geological Mapping, sheet M-49-II).

The complex is mainly represented by volcanic rocks, including lava facies of the eponymous formation, subvolcanic neck and extrusive facies forming both linear and central volcano-tectonic structures. The stratotype area is traditionally considered the left and right banks of the Khilok River and the foothills of the Tsagan-Khurtei Range, where the most representative section of the Tsagan-Khuntei Formation is established within the Tsagan-Khurtei Depression. According to (Gosudarstvennaya…, 2012), in the eastern (stratotype) part of the graben, the formation exhibits a three-membered structure (Sarantuy site), with pantellerites, comendites, trachytes, trachyandesites, and rhyodacites with tuffs in the lower part (700 m); trachyandesites, trachyandesibasalt, trachybasalt, andesites, andesibasalts, basalts with pyroclastic and clastic interbeds in the middle (300 m); and trachyriolites, trachyrhyodacites, trachytes, rhyolites and their tuffs in the upper part (200 m). The full thickness is 1000–1200 m.

Volcanic rocks of the complex are also distributed to the west in the Tsagan-Khurtei Range. According to State Geological Mapping (sheet M-49-II), the largest field (4–6 × 26 km) of volcanic rocks is preserved on the southern slope of the range in the headwaters of the Gongota, Bugutuy, and Khuregat rivers, forming a NE-striking syncline. The north limb, better preserved, consists of alternating acidic and basic lava flows, overlain by conglomerates forming the fold core. Bedding dips 75–80° SE, shallowing to 50–60° in the central syncline. Some reverse dips and varied attitudes in the SW indicate a periclinal closure. The composite section includes large-porphyritic, amygdaloidal and aphyric trachybasalts (140–260 m), interbedded with aphyric and fine-porphyritic, often fluidal trachyriolites (80–140 m), tuffs (up to 180 m), and at the top—vulcanomictic cobble–boulder conglomerates with coarse sand matrix (10–40%), occasional interlayers of sandstones and tuffaceous rocks, mainly acidic. Total thickness exceeds 4000 m.

Despite Rb-Sr dating yielding 207–219 Ma (Yarmolyuk et al., 2001; Vorontsov et al., 2007), corresponding to the Late Triassic, geological mapping practice assigns the complex to the Early Triassic (Gosudarstvennaya…, 2012).

To refine the age of the Tsagan-Khuntei complex in the Tsagan-Khurtei Depression, petrographic, geochronological, geochemical, and isotopic studies were conducted at the Sarantuy and Bugutuy sites. Sarantuy, in the eastern graben, corresponds to earlier studies (Vorontsov et al., 2007); Bugutuy is located in the upper Bugutuy River, a right tributary of the Khilok, west of the depression.

At the Sarantui site, during the work to improve the legend of the Aldan-Zabaikalskaya serial legend on a scale of 1:10,000,000, the following varieties of rocks of the Tsagan-Khuntey volcanic complex were tested in natural and artificial bedrock outcrops (roadside quarries and clearings): black trachydolerites with small porphyritic inclusions of plagioclase and dark-colored minerals (a total of 30% of the total volume of phenocrysts), dark-gray subvolcanic trachyandesites with porphyritic tables of plagioclase (1-2 mm, 20%), sealing wax-colored trachyrhyolites with rare small (up to 1 mm) phenocrysts of plagioclase, with a fluidal glassy groundmass, finely porphyritic trachybasalts

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

from the cement of basalt lava breccias, the fragments of which are represented by trachybasalts with amygdaloid texture, fine-porphyritic basaltic trachyandesites dark gray to black.

At the Bugutuy site, during the production of GDP-200 sheet M-49-II, petrographic, geochronological and geochemical studies of rhyolites and trachyrhyolites of the Tsagan-Khurtey graben were carried out.

The content of the main elements in the rocks was determined by X-ray fluorescence analysis (analyst V.N. Kirillov), and the content of trace elements, including REE, was determined on an Elan 6100 DRC mass spectrometer with inductively coupled plasma (ICP MS) in the Central Laboratory of FSUE VSEGEI (analyst V.L. Kudryashev). U-Pb dating of zircons was carried out on a SHRIMP-II ion microprobe at the A.P. VSEGEI Isotope Research Center. Karpinsky (analysts N.V. Rodionov, P.A. Lvov, E.A. Lepekhina). The analysis of the isotopic composition of Sr and Nd was performed on a TRITON (Thermo) multi-collector mass spectrometer (Center for Isotope Research, VSEGEI) using a standard method (analyst E.S. Bogomolov).

In cathodoluminescence images, zircon grains from the rocks of the complex are characterized by fine zoning or the presence of traces of sectorial zoning. At the Sarantui site, a stratotype locality for the Tsagan-Khunteyskaya suite on the right side of the Khilok River, the isotopic age of trachyrhyodacites (sample 345/2, Table 1, 51° 39' 25" N, 111° 25' 37.1" E) was estimated using the U-Pb SIMS method: 223.9±1.0 Ma, MSWD – 0.81, concordance probability 0.37, n = 15, and basaltic trachyandesite (sample 347/1, 51° 40' 40.6" N, 111° 29' 56.6" E) – 228.8±2.1 Ma, MSWD – 1.6, concordance probability 0.21, n = 11.

At the Bugutuy site (Bugutuy Creek, right tributary of the Khilok River) in the southwestern part of the Tsagan-Khurtey graben, the following dates were obtained: for rhyolite (sample 1134, 51° 30' 00" N, 109° 50' 00" E) - 222.1±1.6 Ma, SKWD - 0.055, concordance probability 0.81, n = 15, trachyrhyolite (sample 1135, Table 1, 51° 29' 40" N, 109° 50' 30" E) - 209.9±2.0 Ma, discordia, SKWD - 0.35.

In characterizing the petrogeochemical features of the rocks, the data (Yarmolyuk et al., 2001, Vorontsov et al., 2007) for the volcanogenic formations of the Tsagan-Khurtey association were also used. The complex is dominated by basic and acidic rocks of moderate alkalinity, with a sharply subordinate development of intermediate rocks. In the group of basic rocks - basaltoids, trachybasalts predominate, trachydolerites and trachyandesite basalts are less common. In the group of acidic rocks, trachyrhyolites, trachyrhyodacites and comendites are most developed (Yarmolyuk et al., 2001).

Basaltoids in chemical composition are predominantly high-titanium (more than 1.5% TiO2), low-alumina (less than 17% Al2O3), moderately and high-potassium rocks. According to the FeO*/(FeO*+MgO) – SiO2 ratio, they are magnesian rocks, and according to the Na2O+K2O-CaO – SiO2 ratio, they belong to the calc-alkaline series. In terms of the content of impurity elements, the basaltoids of the Tsagan-Khunteysky complex are generally close to the OIB basalts, differing from them in low contents of Ta, Nb, with the formation of clearly expressed minima of these elements on the spider diagram. Basaltoids are characterized by differentiated REE distribution, with LREE dominating over HREE, (La/Yb)n = 5.1-14.1, with no europium anomaly Eu/Eu* = 1.08-0.96.

In chemical composition, trachyrhyolites, trachyrhyodacites, rhyolites and comendites vary in alumina content. Among them, metaluminous, peralumina and, less often, peralkaline varieties stand out. In terms of the SiO2 - K2O ratio, they belong to the high-potassium series, less often to the shoshonite series. In terms of the FeO*/(FeO*+MgO) - SiO2 ratio, they are predominantly ferruginous, to a lesser extent magnesian rocks. According to the ratio Na2O+K2O-CaO – SiO2, the rocks belong mainly to the calc-alkaline, less often to the alkaline series.

According to the content of most trace elements, acidic rocks are characterized by contents close to basaltoids, differing from them by higher contents of Rb, Th, U, K, HREE, and lower Ba, Ta, Nb, Sr, P, Ti, with clearly expressed minima on the cartoon diagrams. The values of (La/Yb)n in acidic rocks are 5.5-12.5, the presence of a clearly expressed negative europium anomaly Eu/Eu* = 0.78-0.25 is also characteristic.

To estimate the composition and age of the sources of basaltoid and acid melts, the isotopic composition of Sr and Nd rocks was studied. Positive εNd(T) values are recorded in basaltoids,

varying from 1.6 in trachybasalts to 5.9 in trachydolerites, the Sr values are 4.6 and -2.28, respectively. For trachyrhyolites, the values εNd(T) = 1.4 and Sr(T) = 19.6 were obtained. According to the isotopic characteristics, they are comparable with the formations of the Riphean isotope province of Central Asia - TDM = 0.6-0.9 billion years. The 87Sr/86Sr ratio in basaltoids is 0.7042-0.7049. Trachyrhyolites have higher values of the ratio 87Sr/86Sr = 0.7259.

The results of the studies allow us to clarify the isotopic age, petrogeochemical and isotope-geochemical features of the volcanic rocks of the Tsagan-Khuteysky complex, developed within the Tsagan-Khuteysky depression, and also to consider the issues of petrology and geodynamic conditions of their formation. The age estimate of the rocks of the Tsagan-Khuntey complex obtained as a result of geochronological studies using the U-Pb SIMS method confirms the Late Triassic age of the rocks in the range of 209-228 Ma obtained earlier using the Rb-Sr method (Yarmolyuk et al., 2001, Vorontsov et al., 2007). The enrichment of the basaltoids of the Tsagan-Khuntey complex in Rb and, K, relatively light REE and high-field strength elements such as Nb and Ta, which is shown in the spider diagrams normalized to the primitive mantle, along with their low magnesium content (MgO less than 5%), indicates their subduction nature (Turkina, 2014). It should be noted that increased titanium content is characteristic of basalts formed under back-arc extension conditions (Turkina, 2014). To assess the contribution of various sources to the composition of subduction gabbroids, the Nb/Y-Zr/Y diagram (Condie, 2003) was used. Analysis of the diagram shows that the figurative points of the basaltoid compositions, both according to the authors' data and from literary sources, are located in the field of basalts of island arcs and active continental margins that have a depleted mantle source, which contradicts the idea of their formation under the influence of a mantle plume that existed in the territory under consideration in the Early Mesozoic period (Yarmolyuk et al., 2001, Vorontsov et al., 2007).

Rocks of the acidic group are characterized primarily by high iron content and high contents of high-field strength elements (Nb, Ta, Zr, Y) in combination with low concentrations of Ba, Sr, P, Ti, which determines their sharp minima on spider diagrams. On the diagram (K2O+Na2O)/CaO - Zr+Nb+Ce+Y, rocks of the acidic group are located in the field of A-type granites. According to the Y/Nb ratio (> 1.2), the rocks of the complex belong to the A2 subtype (Eby, 1992), whose A-granites can have different origins, both due to mantle-related basic and crustal sources. Judging by the high values of strontium isotope ratios obtained for trachyrhyolites by the authors, and for comendites according to literature data (Yarmolyuk et al., 2001), as well as by the location of acidic group rocks on the Rb/Sr – Ba/Sr diagram mainly in the field of rocks formed from sources rich in clay material (Sylvester, 1998), most of the acidic group rocks were formed due to crustal, essentially metapelitic sources.

The obtained data indicate the formation of rocks of the Tsagan-Khunteysky complex in the conditions of the rear zone of the late Triassic active margin of the Siberian paleocontinent, with the existence of the Mongol-Okhotsk oceanic basin, due to Riphean mantle depleted and crustal, essentially metapelitic, sources.

The work was carried out within the framework of the State assignment of the Federal Agency for Subsoil Use dated 01/14/2021 No. 049-00016-21-00, dated 01/14/2022 No. 049-00018-22-01, dated 01/10/2023 No. 049-00017-23-1

1. State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000 (third generation). Sheet M-49 (Petrovsk-Zabaykalsky). Explanatory Note / S.N. Pekhterev, E.V. Nechepaev, N.A. Artamonova et al. – St. Petersburg: Cartographic Factory of VSEGEI, 2012. 438 p.
2. Vorontsov A.A., Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Dril S.I., Tatarnikov S.A., Sandimirova G.P. Sources of magmatism and geodynamics of the Early Mesozoic North Mongolian–Western Transbaikalian rift zone // Petrology. 2007. Vol. 15, No. 1, pp. 37–60.
3. Turkina O.M. Lectures on Geochemistry of Magmatic and Metamorphic Processes. Novosibirsk State University, 2014. 118 p.

4. Yarmolyuk V.V., Litvinovsky B.A. Stages of formation and sources of alkaline granitoid magmatism in the North Mongolian–Transbaikalian rift belt in the Permian and Triassic // Petrology. 2001. Vol. 9, No. 4, pp. 351–380.
5. Condie K.C. Incompatible Element Ratios in Oceanic Basalts and Komatiites: Tracking Deep Mantle Sources and Continental Growth Rates with Time // Geosystems. 2003. Vol. 4, 1–28. https://doi.org/10.1029/2002GC000333
6. Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // Geology. 1992. Vol. 20, pp. 641–644.
7. Sylvester P.J. Post-collisional strongly peraluminous granites // Lithos. 1998. Vol. 45, pp. 29–44.

Прогнозно-поисковая модель Стрельцовского урановорудного поля на основе реконструкции этапов формирования и флюидопроницаемости каркаса разрывных нарушений

Тубольцев И.С.[1,2], Устинов С.А.[2], Петров В.А.[2], Минаев В.А.[2]
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Москва, Россия, e-mail: tubolcev@vims-geo.ru; [2]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: stevesa@mail.ru

Стрельцовское рудное поле (СРП), расположенное в Краснокаменском районе Забайкальского края, включает 19 молибден-урановых жильно-штокверковых месторождений с общими остаточными запасами урана около 140 тыс. тонн и в настоящее время является основным поставщиком для обеспечения нужд атомной промышленности страны. Проблема восполнения ресурсов СРП, как объекта с налаженной инфраструктурой и полным производственным циклом от добываемой руды до конечного продукта (концентрата), по мере отработки месторождений, приобретает особую актуальность.

Месторождения СРП сосредоточены в пределах одноименной кальдеры площадью около 140 км^2. Кальдера сформировалась в восточной части Тулукуевской впадины в завершающие этапы позднемезозойской тектономагматической активизации в результате обрушения блока, расположенного над близповерхностной магматической камерой, в связи с извержением из нее кислых расплавов (Ищукова и др., 1998). По современным представлениям и по данным проведенных геолого-геофизических работ четкие границы рудного поля не определены до сих пор. На основе анализа гравитационного поля сделан вывод о том, что к северу кольцевые разломы кальдеры расходятся, а общая форма структуры соответствует «песочным часам» (Шумилин, 2007). Единичные скважины, пробуренные на севере в районе месторождения Полевое, погребенного под нижнемеловыми осадками, вскрыли разрез образований нижнего вулканогенного этажа, включая дациты и фельзиты (Ищукова и др., 2007). Несмотря на это изученность северной площади в полном разрезе до кристаллического фундамента остается исключительно слабой.

Большинство месторождений сосредоточено в пределах Аргунской тектонически ослабленной зоны в Восточном и Западном блоках и лишь небольшие запасы металла локализованы в Северном блоке в зоне Меридионального разлома. Рудные залежи обнаружены как в осадочно-вулканогенных породах верхнего структурного этажа, так и в породах нижнего структурного этажа – гранитоидном фундаменте. Совмещение в едином геологическом пространстве рудоподводящих, рудоконтролирующих и рудовмещающих структурных элементов, сквозных разломов и экранирующих поверхностей создавало благоприятные гидродинамические и обусловленные ими физико-химические условия в области рудоотложения, что явилось важнейшим фактором формирования крупных месторождений СРП (Ищукова и др., 1998).

При этом существующие представления об этапности формирования и активизации обозначенных разрывных структур в зависимости от параметров поля напряжений-деформаций (ПНД) на период рудоотложения (Петров и др., 2009; Петров и др., 2023) нуждаются в дополнительной верификации и визуализации в виде наглядных схем и структурно-тектонических моделей с целью выявления перспективных участков для постановки дальнейших поисково-оценочных работ. Различные сегменты закартированных в результате геологоразведочных работ разрывных зон на протяжении всей геологической истории имеют разное время заложения, активизации и реактивации, а также характеризовались наибольшей гидравлической активностью в определенный период в зависимости от параметров действовавшего ПНД и могли находиться в различных геодинамических обстановках от сжатия до растяжения, значительно влиявших на условия миграции флюидов. Следовательно, для реконструкции этих обстановок необходимо выявить

ориентировки главных осей напряжений и кинематический тип каждой структуры в период их заложения или активизации.

Данная задача в представляемом исследовании решена на основе авторского подхода с использованием модели сдвига П.Л. Хэнкока, в которой приводится наиболее полная сводная схема рядов первичных и вторичных оперяющих структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования магистрального разрыва и после его формирования (Hancock, 1985). Рассматриваемая модель лежит в основе программного обеспечения «Lineament Stress Calculator» (автор А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН), которое применялось для тектонофизической интерпретации закартированных разрывных структур в пределах СРП. Такой подход позволил реконструировать кинематику разломов с учетом возможных параметров ПНД, а также этапы их эволюции от палеозойского времени до формирования кальдеры и основного рудообразующего процесса в позднем мезозое (таблица 1).

Таблица 1. Установленные этапы эволюции каркаса разрывных нарушений Стрельцовского урановорудного поля

Установленный этап	Параметры	Геодинамический контекст
Предрудный	Максимальное развитие протяженных (региональных) северо-восточных разломов как аккреционных швов, субширотная ориентировка оси максимального сжатия	Аккреция террейнов-микроконтинентов к Сибирскому кратону
Предрудный – Начало рудного	Инверсия главных осей ПНД, субмеридиональное сжатие, активизация северо-западных разломов	Начало тектономагматической активизации в среднем-позднем мезозое, формирование Стрельцовской кальдеры
Рудный	Развитие субмеридиональных систем разломов в пределах кальдеры, северо-западное сжатие	Позднемезозойская тектономагматическая активизация

Первый этап характеризуется субширотным сжатием и, наиболее вероятно, отвечает периоду аккреции террейнов к Сибирскому кратону, до формирования кальдеры. Магистральными структурами являлись глубинные северо-восточные разломы, маркирующие аккреционные швы и функционировавшие как правые сдвиги. Меньшее развитие получили структуры северо-западного простирания, которые являлись первичными антитетическими (левыми) сдвигами по отношения к основным разломам.

Второй этап тектогенеза зафиксирован по инверсии главных осей ПНД, что привело к более мощному развитию северо-западных разломов, которые активизировались уже как правые сдвиги. Данный этап связан с началом тектономагматической активизации в регионе и формированием кальдеры в узле сочленения глубинных северо-восточных разломов, заложенных на предыдущем этапе, и активизированных северо-западных структур. В том числе данный период знаменует начало рудного процесса. Данный вывод подтверждается приуроченностью отельных крупных рудных тел к мощным разломным зонам северо-западного простирания, разделяющим кальдеру на блоки.

Третий этап связан с заложением многочисленных субмеридиональных систем разломов и характеризует наибольшую интенсивность рудообразующего процесса. К данным структурам приурочено большинство рудных тел СРП. Установленная ориентировка оси сжатия имела северо-западное простирание, что определило развитие субмеридиональных структур как левых сдвигов. Данная ситуация коррелирует с результатами, полученными в рамках более ранних исследований при тектонофизической интерпретации микро- и макротрещинноватости в образцах пород и горных выработках на месторождении Антей с

помощью классических (Петров и др., 2009) и микроструктурных (Устинов и др., 2014) методов.

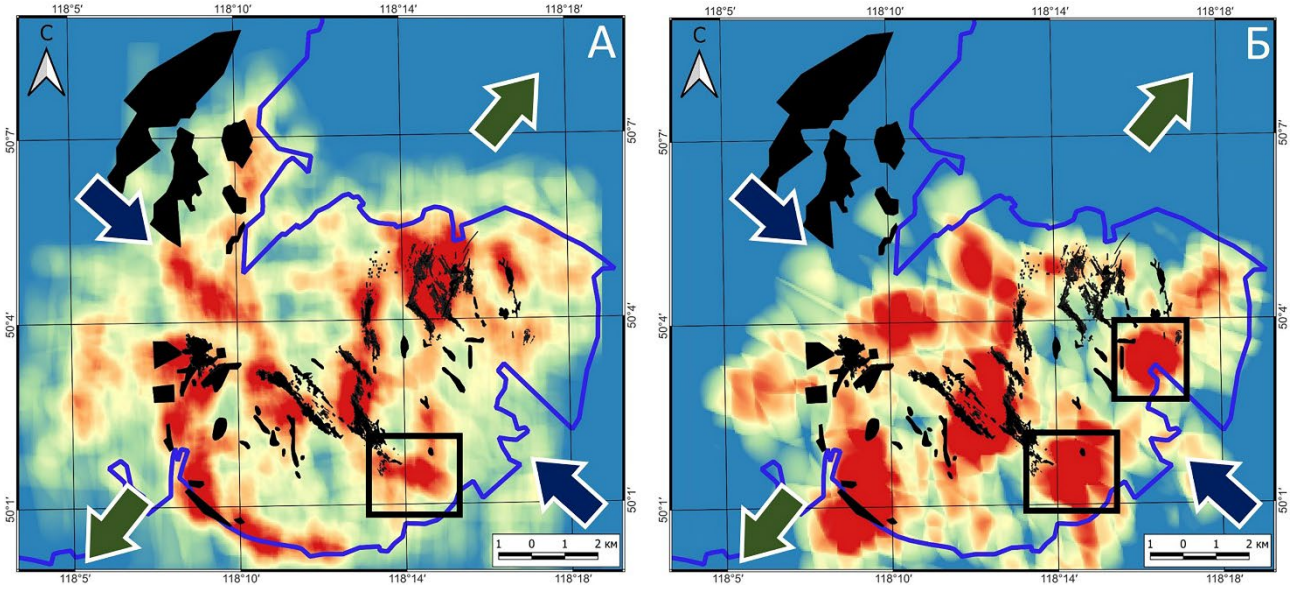


Рис. 1. Прогнозно-поисковые модели Стрельцовского урановорудного поля на основе визуализации гидравлически активных сегментов от наименьших (синий) до максимальных (красный) значений проницаемости в зависимости от параметров поля напряжений-деформаций для установленных разломов (А) и линеаментов (Б) на период предполагаемого рудообразования. Стрелками показаны главные оси максимального сжатия (синие) и растяжения (зеленый). Черные контуры – проекции известных рудных тел, черные прямоугольники – рекомендуемые для проведения оценочных работ перспективные участки.

На основе расчёта коэффициента тенденции к сдвигу с учетом установленных параметров выявленных этапов тектогенеза созданы схемы плотности гидравлически активных сегментов закартированных разрывных структур. Для параметров ПНД третьего этапа проекции рудных тел СРП в большей степени отвечают положению пространственных максимумов гидравлически активных зон, что также подтверждает вывод о наибольшей связи данного этапа с процессом рудообразования. Помимо известных рудных тел, в результате визуализации гидравлически активных сегментов разрывов на рассматриваемом этапе тектогенеза удалось выявить области, которые могут быть рекомендованы в качестве перспективных для постановки дальнейших поисково-оценочных работ в пределах СРП (рис. 1), что поспособствует наращиванию минерально-сырьевой базы урана ПАО «ППГХО», занимающегося отработкой месторождений рудного поля.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Ищукова Л.П., Авдеев Б.В., Губкин Г.Н., Игошин Ю.А., Макушин М.Ф., и др. Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. М.: Геоинформмарк. 1998. 382 с.
2. Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В. и др. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Геологоразведка. 2007. 260 с.
3. Петров В.А. Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Щукин С.И., Хаммер Й. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах // Физика Земли. 2009. № 11. С. 86-93.
4. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Характер магматизма, гидротермально-метасоматических и фильтрационно-транспортных процессов в урановых вулканогенных структурах // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 3-25.

5. Устинов С.А., Петров В.А., Полуэктов В.В. Использование планарных систем флюидных включений в структурно-геологических исследованиях гидротермальных месторождений (на примере месторождения Антей) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 1. С. 36-41.
6. Шумилин М.В. О возможности новых крупных открытий в Стрельцовском рудном поле // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 5. С. 471-473.
7. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437-457.

*Predictive and Exploratory Model of the Streltsovsk Uranium Ore Field Based on Reconstruction of Deformation Stages and Fracture Permeability Framework

Tuboltsev I.S.[1,2], Ustinov S.A.[2], Petrov V.A.[2], Minaev V.A.[2]
[1]All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky (VIMS), Moscow, Russia, tubolcev@vims-geo.ru; [2]IGEM RAS, Moscow, Russia, stevesa@mail.ru

The Streltsovsk Ore Field (SOF), located in the Krasnokamensk District of Zabaikalsky Krai, comprises 19 molybdenum-uranium vein-stockwork deposits with total remaining uranium reserves of about 140,000 tons, and currently serves as the main supplier for the country's nuclear industry. As the existing deposits are gradually depleted, the challenge of replenishing SOF resources becomes increasingly urgent, especially given the existing infrastructure and complete production cycle from mining to uranium concentrate.

The deposits are concentrated within the eponymous caldera covering approximately 140 km². The caldera formed in the eastern part of the Tulukuev Basin during the final stages of Late Mesozoic tectonomagmatic activation as a result of the collapse of a block above a shallow magmatic chamber following felsic eruptions (Ishchukova et al., 1998). According to geological and geophysical studies, the boundaries of the ore field remain poorly defined. Gravity data suggest that to the north, the ring faults of the caldera diverge, giving the structure an "hourglass" shape (Shumilin, 2007). In the north, drill holes in the Polevoye deposit area (buried under Lower Cretaceous sediments) intersected rocks of the lower volcanic stage, including dacites and felsites (Ishchukova et al., 2007). Nonetheless, the northern area remains poorly studied through to the crystalline basement.

Most deposits are localized within the Argun Tectonically Weakened Zone in the Eastern and Western blocks, while only minor resources are located in the Northern block along the Meridional Fault Zone. Ore bodies occur in both the upper sedimentary-volcanic sequence and the underlying granitoid basement. The spatial coincidence of ore-feeding, ore-controlling, and ore-hosting structures, along with through-going faults and sealing surfaces, created favorable hydrogeological and physico-chemical conditions for ore deposition, which was a key factor in the formation of the large-scale deposits of the SOF (Ishchukova et al., 1998).

However, current understanding of the stages of fault formation and reactivation in relation to the stress-deformation field (SDF) parameters during mineralization (Petrov et al., 2009; Petrov et al., 2023) requires further verification and visualization through structural diagrams and tectonic models to identify prospective zones for further exploration. Various segments of mapped faults display different timing of initiation, activation, and reactivation throughout geological history, and their hydraulic activity peaked during certain geodynamic settings, ranging from compression to extension, significantly affecting fluid migration. Thus, reconstructing these settings requires identifying the orientation of principal stress axes and the kinematic type of each structure during their formation or reactivation.

This task was addressed using the authors' methodology based on P.L. Hancock's shear model, which provides a comprehensive framework of primary and secondary subsidiary faults observed in shear zones both before and after the formation of the master fault (Hancock, 1985). This model underpins the "Lineament Stress Calculator" software (developed by A.D. Svecherevskiy, IGEM RAS), which was used for tectonophysical interpretation of mapped faults within the SOF. This approach enabled the reconstruction of fault kinematics considering plausible SDF parameters and the evolutionary stages from the Paleozoic through the caldera formation and main mineralization phase in the Late Mesozoic (Table 1).

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Table 1. Established Evolutionary Stages of the Fault Framework in the Streltsovsk Uranium Ore Field

Stage	Parameters	Geodynamic Context
Pre-ore	Maximum development of NE-trending regional faults as accretionary sutures; E–W compression	Accretion of terranes/microcontinents to the Siberian Craton
Pre-ore – Early Ore	Inversion of principal SDF axes; N–S compression; activation of NW-trending faults	Onset of tectonomagmatic activation in the Middle–Late Mesozoic
Ore	Development of N–S-trending faults within the caldera; NW–SE compression	Late Mesozoic tectonomagmatic activation

The first stage is associated with E–W compression, likely reflecting terrane accretion to the Siberian Craton before caldera formation. Major structures were NE-trending deep faults functioning as right-lateral shears, while the subordinate NW-trending structures acted as primary left-lateral (antithetic) faults.

The second stage reflects inversion of the principal SDF axes, promoting more active development of NW-trending faults, now reactivated as right-lateral shears. This stage corresponds to the onset of tectonomagmatic activity and caldera formation at the intersection of deep-seated NE-trending faults (formed in the previous stage) and the newly active NW faults. It also marks the onset of ore formation, as evidenced by the spatial association of some major ore bodies with these structures.

The third stage saw the development of numerous N–S-trending faults and marks the peak of ore formation. Most ore bodies in the SOF are associated with these structures, which are interpreted as left-lateral shears formed under NW–SE compression. This interpretation agrees with earlier results from tectonophysical studies of micro- and macro-fracturing in rocks and mine workings at the Antey deposit, using both classical methods (Petrov et al., 2009) and microstructural analyses (Ustinov et al., 2014).

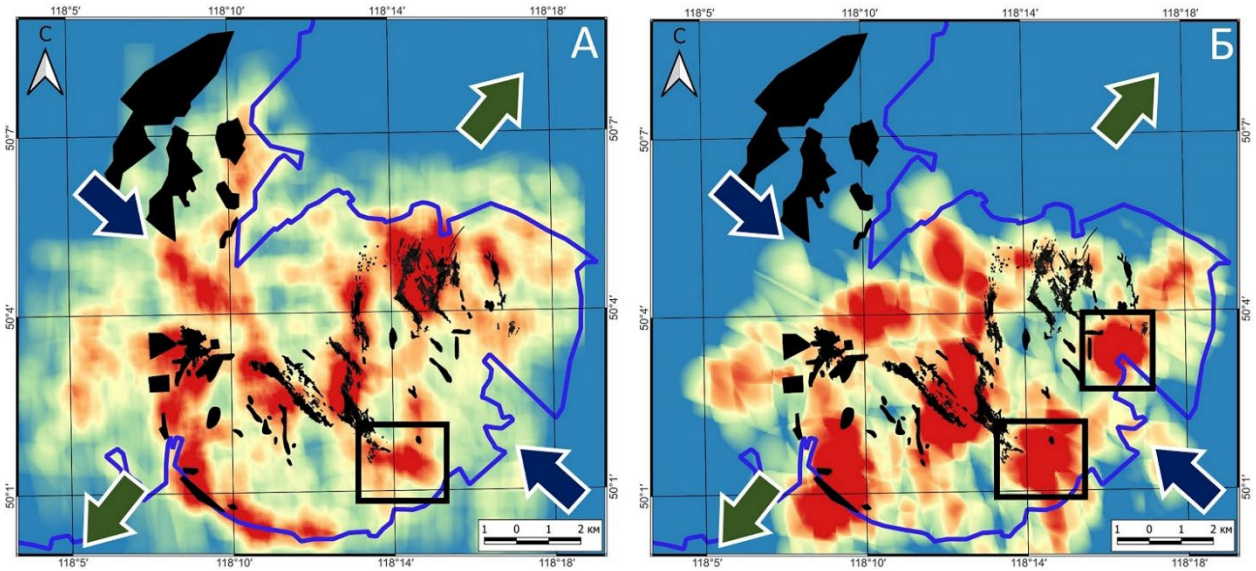


Fig. 1. Predictive models of the Streltsovsk Uranium Ore Field based on visualized hydraulically active fault segments showing permeability values from lowest (blue) to highest (red) under the stress-deformation parameters of the ore-forming stage.

Blue and green arrows indicate the principal axes of maximum compression and extension, respectively. Black outlines – projections of known ore bodies; black rectangles – recommended prospective areas for exploratory drilling.

Using the calculated shear tendency coefficient and SDF parameters for each tectonic stage, density maps of hydraulically active fault segments were produced. The projections of known ore bodies align most closely with zones of peak permeability under the third-stage SDF regime, reinforcing the conclusion that this stage was most critical for mineralization. In addition to known ore bodies, this analysis identified several zones with high hydraulic potential (Fig. 1) that are recommended for future exploration, which may aid in replenishing uranium reserves for PIMCU JSC (operating in the SOF).

This research was conducted under the State Assignment of IGEM RAS.

1. Ishchukova L.P., Avdeev B.V., Gubkin G.N., et al. Geology of the Urulyunguyev Ore District and Molybdenum-Uranium Deposits of the Streltsovsk Ore Field. Moscow: Geoinformmark, 1998. 382 p.
2. Ishchukova L.P., Modnikov I.S., Sychev I.V., et al. Uranium Deposits of the Streltsovsk Ore Field, Zabaikalsky Krai. Irkutsk: Geologorazvedka, 2007. 260 p.
3. Petrov V.A., Poluektov V.V., Nasimov R.M., et al. Natural and Anthropogenic Changes in the Stress-Deformation State of Rocks at a Uranium Deposit in Granites. Physics of the Earth. 2009. No. 11. P. 86–93.
4. Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V. Character of Magmatism, Hydrothermal-Metasomatic and Filtration-Transport Processes in Uranium-Bearing Volcanic Structures. Volcanology and Seismology. 2023. No. 5. P. 3–25.
5. Ustinov S.A., Petrov V.A., Poluektov V.V. Application of Planar Fluid Inclusion Systems in Structural Studies of Hydrothermal Deposits: Example of the Antey Deposit. Geology and Exploration. 2014. No. 1. P. 36–41.
6. Shumilin M.V. On the Prospect of New Major Discoveries in the Streltsovsk Ore Field. Geology of Ore Deposits. 2007. Vol. 49. No. 5. P. 471–473.
7. Hancock P.L. Brittle Microtectonics: Principles and Practice. Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. No. 3–4. P. 437–457.

Реконструкция параметров сдвиговых тектонических напряжений западной части Байкало-Патомского пояса на основе структурно-геоморфологического подхода в контексте прогноза рудообразующих систем

Устинов С.А.[1], Петров В.А.[1], Андреев А.А.[1], Свечеревский А.Д.[1], Кочкин И.А.[1], Чепчугов А.М.[2]

[1]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: stevesa@mail.ru; [2]Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Москва, Россия, e-mail: chepchugov@vims-geo.ru

Разрывные структуры (разломы, трещины) в земной коре, которые в наиболее общем определении представляют собой нарушение сплошности горных пород без смещения или со смещением по плоскости разрыва, формируются на всём протяжении геологической истории Земли в зависимости от действовавших в определённое время геодинамических обстановок.

Несмотря на то, что существует огромное множество работ по исследованию механизмов формирования разрывных нарушений, их описанию, выделению типов, тектонофизической интерпретации, разработано большое количество методов структурно-геологического и тектонического картирования, задача массовой идентификации и классификации разломов в пределах обширных площадей остаётся достаточно сложно реализуемой. Для решения этой задачи часто применяется линеаментный анализ (Кац и др., 1986).

Байкало-Патомский пояс (БПП), западная часть которого рассмотрена в качестве объекта исследования, входит в структуру Байкальской складчатой области (БСО), являющейся, в свою очередь, элементом Центрально-Азиатского подвижного пояса (ЦАПП). Учитывая положение исследуемой территории на сочленении структур Сибирской платформы и ЦАПП, начиная с архея до настоящего времени, происходили активные процессы осадконакопления, магматизма, метаморфических и метасоматических преобразований пород, интенсивные тектонические вертикальные и горизонтальные перемещения блоков земной коры на разных уровнях глубинности. Эти явления сопровождались концентрированием, перераспределением ПИ и активным рудообразованием. Почти с каждым этапом геологического развития связано формирование месторождений полезных ископаемых (Митрофанова и др., 2012).

Строение БПП в основном определяют неопротерозойские структуры, сложенные единым карбонатно-терригенным патомским комплексом, и заложенные на раннедокембрийском фундаменте Ангарской и Алданской плит Сибирского кратона, который вскрыт в пределах Чуйского, Тонодского и Нечерского гранитоидных выступов. Во внутренней структурной зоне БПП, в пределах Ангарской плиты, преобладают северо-восточные простирания осадочных толщ и линейных структур, а в пределах Алданской плиты доминируют субширотные и северо-западные простирания. Формирование общей структуры БПП связывается с первичной морфологией палеобассейнов осадконакопления (Салоп, 1964), либо с крупномасштабными деформациями, завершившимися в конце раннего палеозоя (Зоненшайн и др. 1990). Классическое представление о тектонической природе БПП большинством авторов так или иначе связывается с эволюцией палеошельфа пассивной окраины Сибирского кратона и основано на модели ее аккреционно-коллизионного взаимодействия с различными микроконтинентами и островодужными террейнами в конце позднего докембрия и в раннем палеозое (Гусев, Хаин, 1995; Гордиенко и др. 2013; Станевич и др. 2007; Чугаев и др., 2018).

Существует и альтернативная модель, которая базируется на рифтогенном формировании структур БСО. Согласно ей, на рубеже 790-755 млн лет произошло коллизионное совмещение Анамакит-Муйского террейна, составной части Баргузино-Витимского супертеррейна, с континентальной окраиной Сибирского кратона. Процессы

континентального рифтогенеза раннебайкальского этапа стартовавшие в Олокитской зоне БПП завершились к рубежу 660-640 млн лет локализацией растяжения в Кичерской зоне БМП, которое привело к деструкции раннедокембрийской коры и образованию позднебайкальской ювенильной коры в рифтогенных структурах различной степени раскрытия (Andreev et al., 2022).

Выделение линеаментов в пределах рассматриваемой территории, в отличие от большинства подобных работ, учитывая тесную связь термина «линеамент» с морфологическими особенностями рельефа, проводилось не с использованием космоснимков, а на основе визуализации и анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) (Ustinov et al., 2024). ЦМР территории визуализировалась в геоинформационной (ГИС) среде с использованием отфильтрованных (с удалением техногенных объектов и лесов) данных FABDEM (Forest And Buildings removed Digital Elevation Model) с исходным пространственным разрешением ≈30 метров на пиксель (Hawker et al., 2022).

Для решения задачи идентификации протяженных разрывов высоких рангов, а также идентификации всех линейных элементов рельефа, проявленных на различных масштабных уровнях, предложено искусственно «ухудшать» пространственное разрешение исходной ЦМР с определенным шагом, для каждого из которых процедуры выделения линеаментов повторяются. Это позволило выделить линеаменты различной протяженности, отражающие разноранговые разломные структуры, и, тем самым, при дальнейшем тектонофизическом анализе учесть масштабный эффект в развитии элементов каркаса разрывных нарушений территории (Petrov et al., 2017; Petrov et al., 2019).

Выделение линеаментов по мере последовательного занижения пространственного разрешения ЦМР позволило подчеркнуть особенности эволюции каркаса разноранговых разрывных структур в горизонтальной плоскости от локального до надрегионального уровня с учетом площади исследования. Для территории западной части БПП на самых локальных уровнях развитие получила субширотная генерация структур при некотором разбросе в ориентировках от неё менее протяженных линеаментов, вероятно, маркирующих оперяющие главный структурный тренд системы мегатрещин. При переходе на более низкие масштабные уровни наблюдается постепенное исчезновение субширотной и повсеместное развитие северо-западной и северо-восточной систем линеаментов. На более региональных уровнях генерализации ЦМР максимальное развитие получает система северо-восточного простирания, которая субпараллельна границе БСО и Сибирской платформы. Наиболее вероятно, что по протяженным разрывам данной системы происходили основные сдвиговые деформации в рамках аккреционно-коллизионных процессов. Также, помимо основной северо-восточной генерации надрегиональных разрывов на розах-диаграммах высоких масштабных уровней прослеживаются менее проявленные системы север-северо-западного и субмеридионального простираний. Для их классификации и определения кинематического типа необходимо провести тектонофизическую интерпретацию парагенезиса всех структур в зоне магистрального сдвига.

Для восстановления геодинамической эволюции территории по структурно-геоморфологическим признакам проводилась реконструкция ориентировок осей сжатия и растяжения сдвигового поля напряжений-деформаций (ПНД), а также определение кинематического типа предполагаемых разрывных разноранговых структур, в соответствии с моделью П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) с помощью созданного программного обеспечения Lineament Stress Calculator (Свечеревский и др., 2025).

Проведенные реконструкции позволили выделить основные, наиболее проявленные, этапы тектогенеза в пределах исследуемой территории.

I) Первый этап характеризуется субширотной – восток-северо-восточной ориентировкой оси максимального сжатия, при этом протяженные региональные и надрегиональные магистральные структуры северо-восточного простирания функционировали как правые сдвиги. Также на данном этапе происходит заложение региональных взбросов север-северо-западного и субмеридионального простираний, в

соответствии с осью максимального растяжения. Помимо прочего, формируются менее протяженные, по сравнению с обозначенными структурами, северо-западные разрывы, как вторичные антитетические сколы с левосторонней сдвиговой кинематикой. Данные параметры ПНД реконструируются для всех предполагаемых структур на всех установленных масштабных уровнях и, соответственно, отвечают наиболее мощным сдвиговым процессам, проявленным повсеместно в пределах рассматриваемой площади. Эти процессы могут быть сопоставимы исключительно с установленными аккреционно-коллизионными событиями причленения террейнов БСО к Сибирскому кратону, имевшему место в конце позднего докембрия.

II) Второй этап, наиболее вероятно, связан с тектономагматической активизацией территории в раннем палеозое и проявлен исключительно на самом локальном из выявленных масштабных уровней, что говорит о значительно меньшей, по сравнению с предыдущим этапом, интенсивности деформаций (в масштабе исследуемой площади). Ось максимального сжатия характеризовалась северо-восточной ориентировкой, при этом заложенные на предыдущем этапе как отрывы и первичные антитетические сколы субширотные разрывы испытали активизацию и функционировали как левые сдвиги с соответствующим парагенезисом оперяющих мегатрещин более низких рангов.

III) Заключительный из установленных этапов выделен на близком к предыдущему локальном масштабном уровне и связан с дальнейшими сдвигами по субширотным структурам с инверсией параметров ПНД. Субширотные разрывы представляли собой уже правые сдвиги при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия. Дополнительным критерием отнесения данного этапа к заключительным является установленный в результате геологического картирования факт наличия относительно молодых смещающих рудные тела локальных надвигов, происходивших в северо-западном направлении к Сибирскому кратону, которые могли сформироваться при таких реконструированных параметрах ПНД, а именно – северо-восточной ориентировке оси максимального растяжения.

Конечным итогом работы стала комплексная визуализация результатов в ГИС в виде схем областей, демонстрирующих различную гидравлическую активность на установленных этапах тектогенеза в зависимости от пространственного положения и сближенности сегментов разрывных структур с определенными значениями коэффициента тенденции к сдвигу, и их сопоставление с положением известных (эталонных) рудных объектов. Установлено, что наибольшую роль в локализации металлического оруденения сыграли первый и второй этапы тектогенеза. В этом случае точность комплексной прогнозно-поисковой модели составила 94%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00218, https://rscf.ru/project/24-27-00218/

1. Гордиенко И.В., Булгатов А.Н., Орсоев Д.А. Геодинамические обстановки и металлогения Саяно-Байкальской горной области // Отечественная геология. 2013. № 3. С. 7–15.
2. Гусев Г.С., Хаин В.Е. О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири) // Геотектоника. 1995. №5. С. 68–82.
3. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 327 с.
4. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.
5. Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 607 с.
6. Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. М: Недра, 1964. Т. 1. 515 с.

7. Свечеревский А.Д., Устинов С.А., Лапаев Д.С., Петров В.А. Реконструкция параметров сдвиговых напряжений при формировании разноранговых разломов западного Прибайкалья на основе тектонофизической интерпретации линеаментов // Физика Земли. 2025. № 2. С. 95–113.
8. Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Постников А.А. и др. Северный сегмент Палеоазиатского океана в неопротерозое: история седиментогенеза и геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 60–79.
9. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н. и др. Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и δ34S) и геохимические характеристики метаосадочных пород БайкалоПатомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 213–244.
10. Andreev A.A., Rytsk E.Yu., Velikoslavinskii S.D., Tolmacheva E.V., Bogomolov E.S., Lebedeva Y.M., Fedoseenko A.M. Age, Composition, and Tectonic Setting of the Formation of Late Neoproterozoic (Late Baikalian) Complexes in the Kichera Zone, Baikal-Vitim Belt, Northern Baikal Area: Geological, Geochronological, and Nd Isotope Data // Petrology. 2022. Vol. 30. P. 337–368. https://doi.org/10.1134/S0869591122040026
11. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. N 3/4. P. 437–457. https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3
12. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17:2. P. 024016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f
13. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Ustinov S.A., Minaev V.A. Rescaling of fluid-conducting fault structures // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 472. P. 130–133. https://doi.org/10.1134/S1028334X17020027
14. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Ustinov S.A., Minaev V.A. Scale Effect in a Fluid-Conducting Fault Network // Geology of Ore Deposits. 2019. Vol. 61. P. 293–305. https://doi.org/10.1134/S1075701519040056
15. Ustinov S.A., Chepchugov A.M., Tomarovskaya M.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Yarovaya E.V. Structural–Tectonophysical Approach to Interpreting Lineament Analysis Results for the Prediction of Ore-Forming Mineral Systems Using the Example of the Tuyukan Ore Cluster Area // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2024. Vol. 60. P. 1547–1565. https://doi.org/10.1134/S0001433825700215

*Reconstruction of Shear Tectonic Stress Parameters in the Western Part of the Baikal–Patom Belt Based on a Structural–Geomorphological Approach in the Context of Ore-Forming System Forecasting

Ustinov S.A.[1], Petrov V.A.[1], Andreev A.A.[1], Svecherevskiy A.D.[1], Kochkin I.A.[1], Chepchugov A.M.[2]

[1]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, stevesa@mail.ru; [2]All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russia, e-mail: chepchugov@vims-geo.ru

Fracture structures (faults, fractures) in the Earth's crust, which in the most general sense represent a loss of continuity in rocks with or without displacement along the fault plane, form throughout the entire geological history of the Earth depending on the geodynamic settings that prevailed at the time.

Despite the existence of a vast number of studies on the mechanisms of fault formation, their classification, description, and tectonophysical interpretation, as well as the development of numerous methods of structural–geological and tectonic mapping, the task of large-scale identification and classification of faults across extensive areas remains quite challenging. To address this, lineament analysis is often employed (Katz et al., 1986).

The Baikal–Patom Belt (BPB), whose western part is the subject of this study, is part of the Baikal Fold Area (BFA), which itself forms part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Given its position at the junction of the Siberian Platform and the CAOB, the region has undergone active processes of sedimentation, magmatism, metamorphic and metasomatic transformations, as well as intensive tectonic vertical and horizontal block movements at various crustal levels from the Archean to the present. These phenomena were accompanied by the concentration and redistribution of mineral resources and active ore formation. Almost every stage of geological development is associated with the formation of mineral deposits (Mitrofanova et al., 2012).

The structure of the BPB is primarily determined by Neoproterozoic structures composed of a unified carbonate–terrigenous Patom complex laid upon the Early Precambrian basement of the Angara and Aldan blocks of the Siberian Craton. This basement is exposed in the Chuya, Tonod, and Necher granitoid uplifts. In the inner structural zone of the BPB (within the Angara block), northeast-trending sedimentary sequences and linear structures dominate, while in the Aldan block, sublatitudinal and northwest trends prevail. The overall structure of the BPB is attributed either to the primary morphology of paleosedimentary basins (Salop, 1964) or to large-scale deformations completed by the end of the Early Paleozoic (Zonenshain et al., 1990). The classical view of the tectonic nature of the BPB held by most authors is linked to the evolution of a passive margin of the Siberian Craton and is based on a model of its accretion–collision interaction with various microcontinents and island arc terranes during the late Precambrian to Early Paleozoic (Gusev & Khain, 1995; Gordienko et al., 2013; Stanevich et al., 2007; Chugaev et al., 2018).

An alternative model is based on the riftogenic origin of the BFA structures. According to this model, a collisional amalgamation of the Anamakit–Muya terrane (a constituent of the Barguzin–Vitim superterrane) with the continental margin of the Siberian Craton occurred between 790–755 Ma. The continental rifting processes of the Early Baikalian stage that started in the Olokit zone of the BPB culminated around 660–640 Ma with the localization of extension in the Kichera zone of the BMP, which led to the destruction of the Early Precambrian crust and the formation of juvenile crust within rift-related structures of varying degrees of opening (Andreev et al., 2022).

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Unlike most similar studies, lineament identification in the study area—given the close relationship of the term "lineament" to morphological features of the terrain—was conducted not using satellite imagery but through visualization and analysis of Digital Elevation Models (DEM) (Ustinov et al., 2024). DEMs of the region were visualized in a GIS environment using FABDEM data (Forest And Buildings removed Digital Elevation Model) with a native spatial resolution of ~30 meters per pixel, filtered to remove anthropogenic features and forest cover (Hawker et al., 2022).

To identify long, high-rank fractures as well as linear elements visible at different scales, the resolution of the DEM was intentionally degraded in steps, with lineament extraction repeated at each step. This allowed the extraction of lineaments of various lengths, reflecting multiscale fault structures, and enabled consideration of scale effects during subsequent tectonophysical analysis of the fault framework (Petrov et al., 2017; Petrov et al., 2019).

This progressive degradation of DEM resolution highlighted the evolution of the fracture network at horizontal scales ranging from local to regional. In the western part of the BPB, the most local scale levels showed sublatitudinal generation of structures, with scattered orientations of shorter lineaments likely marking secondary features of a dominant megafracture trend. As the scale increased, sublatitudinal features disappeared, and northwest and northeast-trending systems became more prevalent. At regional generalization levels, a northeast-trending system became dominant, subparallel to the BFA–Siberian Platform boundary. It is likely that this system hosted the main strike-slip deformation during accretion–collision processes. Additionally, subordinate north–northwest and submeridional systems are observed on rose diagrams at large scales. Tectonophysical interpretation is required to classify these structures and determine their kinematic types in the main strike-slip zone.

To reconstruct the geodynamic evolution of the region, orientations of compression and extension axes of the shear stress–strain field (SSF) were inferred from structural–geomorphological features. The kinematic types of presumed multiscale fracture structures were determined in accordance with P.L. Hancock's model (Hancock, 1985), using the custom-developed Lineament Stress Calculator software (Svecherevskiy et al., 2025).

The reconstructions revealed the main and most pronounced stages of tectogenesis in the study area:

Stage I: Characterized by sublatitudinal to east–northeast trending compression axis. Major regional and supraregional northeast-trending faults acted as right-lateral strike-slip zones. Regional thrusts trending north–northwest and submeridional were also initiated in accordance with the extension axis. Northwest-trending faults, relatively shorter, formed as secondary antithetic left-lateral shear structures. SSF parameters of this stage were reconstructed for all structures at all scales, corresponding to the most extensive shear deformation across the area. These are linked to accretion–collision events marking the attachment of BFA terranes to the Siberian Craton at the end of the Late Precambrian.

Stage II: Likely related to Early Paleozoic tectonomagmatic activity and evident only at the most local scale. It reflects significantly weaker deformation. The compression axis had a northeast orientation. Previously formed sublatitudinal faults reactivated and operated as left-lateral strike-slip zones with associated lower-rank synthetic and antithetic fractures.

Stage III: Also identified at a local scale and associated with further strike-slip motion along sublatitudinal faults but under inverted SSF parameters. The sublatitudinal faults became right-lateral strike-slip faults under a northwest-directed compression axis. This interpretation is supported by geological mapping data showing young overthrusts offsetting ore bodies northwestward toward the Siberian Craton. These features likely formed under a northeast-trending extension axis.

The study culminated in GIS-based visualization of domains exhibiting varying hydraulic activity across the defined stages of tectogenesis. These domains were derived based on proximity of fault segments with specific shear tendency coefficients and were compared against known (reference) ore occurrences. It was established that the first and second tectonic stages played the most significant roles in localizing metalliferous mineralization. The accuracy of the integrated predictive–prospecting model reached 94%.

This study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-27-00218, https://rscf.ru/project/24-27-00218/

1. Gordienko I.V., Bulgakov A.N., Orsoev D.A. Geodynamic Settings and Metallogeny of the Sayano–Baikal Mountain Region. Otechestvennaya Geologiya. 2013. No. 3. P. 7–15.
2. Gusev G.S., Khain V.E. On the Relationships between the Baikal–Vitim, Aldan–Stanovoy, and Mongol–Okhotsk Terranes (South of Central Siberia). Geotektonika. 1995. No. 5. P. 68–82.
3. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. Tectonics of Lithospheric Plates of the USSR Territory. Moscow: Nedra, 1990. Vol. 1. 327 p.
4. Katz Y.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. Fundamentals of Lineament Tectonics. Moscow: Nedra, 1986. 144 p.
5. Mitrofanova N.N., Boldyrev V.I., Korobeynikov N.K., Mitrofanov G.L., et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (Third Generation). Aldan–Transbaikalian Series. Sheet O-49 – Kirensk. Explanatory Note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2012. 607 p.
6. Salop L.I. Geology of the Baikal Mountain Region. Moscow: Nedra, 1964. Vol. 1. 515 p.
7. Svecherevskiy A.D., Ustinov S.A., Lapaev D.S., Petrov V.A. Reconstruction of Shear Stress Parameters during the Formation of Multiscale Faults in Western Pribaikalye Based on Tectonophysical Interpretation of Lineaments. Physics of the Earth. 2025. No. 2. P. 95–113.
8. Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Postnikov A.A., et al. Northern Segment of the Paleoasian Ocean in the Neoproterozoic: Sedimentogenesis History and Geodynamic Interpretation. Geology and Geophysics. 2007. Vol. 48. No. 1. P. 60–79.
9. Chugaev A.V., Budyak A.E., Chernyshov I.V., Dubinina E.O., Gareev B.I., Shatagin K.N., et al. Isotopic (Sm–Nd, Pb–Pb and δ34S) and Geochemical Characteristics of Metasedimentary Rocks of the Baikal–Patom Belt (Northern Transbaikalia) and the Evolution of the Sedimentary Basin in the Neoproterozoic. Petrology. 2018. Vol. 26. No. 3. P. 213–244.
10. Andreev A.A., Rytsk E.Yu., Velikoslavinskii S.D., Tolmacheva E.V., Bogomolov E.S., Lebedeva Y.M., Fedoseenko A.M. Age, Composition, and Tectonic Setting of the Formation of Late Neoproterozoic (Late Baikalian) Complexes in the Kichera Zone, Baikal–Vitim Belt, Northern Baikal Area: Geological, Geochronological, and Nd Isotope Data. Petrology. 2022. Vol. 30. P. 337–368. https://doi.org/10.1134/S0869591122040026
11. Hancock P.L. Brittle Microtectonics: Principles and Practice. Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. No. 3/4. P. 437–457. https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3
12. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m Global Map of Elevation with Forests and Buildings Removed. Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17. No. 2. P. 024016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f
13. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Ustinov S.A., Minaev V.A. Rescaling of Fluid-Conducting Fault Structures. Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 472. P. 130–133. https://doi.org/10.1134/S1028334X17020027
14. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Ustinov S.A., Minaev V.A. Scale Effect in a Fluid-Conducting Fault Network. Geology of Ore Deposits. 2019. Vol. 61. P. 293–305. https://doi.org/10.1134/S1075701519040056
15. Ustinov S.A., Chepchugov A.M., Tomarovskaya M.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Yarovaya E.V. Structural–Tectonophysical Approach to Interpreting Lineament Analysis Results for the Prediction of Ore-Forming Mineral Systems Using the Example of the Tuyukan Ore Cluster Area. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2024. Vol. 60. P. 1547–1565. https://doi.org/10.1134/S0001433825700215

Интерпретация линеаментов в пределах юго-восточного Забайкалья с применением мультимасштабного тектонофизического подхода для прогноза урановых рудообразующих систем

Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Андреев А.А., Нафигин И.О., Свечеревский А.Д., Лапаев Д.С.
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: stevesa@mail.ru

Разрывные структуры (разломы, трещины) в земной коре, которые в наиболее общем определении представляют собой нарушение сплошности горных пород без смещения или со смещением по плоскости разрыва, формируются на всём протяжении геологической истории Земли в зависимости от действовавших в определённое время геодинамических обстановок.

Для идентификации разрывных структур в пределах обширных площадей часто применяется линеаментный анализ. Термин «линеамент» уже более ста лет назад предложил американский геолог У. Хоббс (Hobbs, 1904). В силу отсутствия других методов достоверной массовой идентификации разрывных структур, линеаментный анализ может служить как наиболее эффективный дистанционный метод восстановления каркаса разрывных нарушений и глубинного тектонического строения в пределах обширных территорий (Кац и др., 1986).

При проведении структурно-линеаментного анализа исследователи чаще всего выделяют одноранговые, обычно непротяженные, линеаменты, не учитывая при этом масштабный эффект в развитии интерпретируемых разрывных структур. Данный эффект заключается в «изменении каких-либо свойств природных или искусственных объектов и материалов при варьировании их геометрических параметров», что справедливо и для разрывных нарушений (Petrov et al., 2017; Petrov et al., 2019). Как показали многие модельные опыты, при заложении протяженной разрывной зоны в определенной последовательности формируются системы и эшелоны оперяющих её трещин отличных кинематических типов и разных рангов, отражающих определённый масштабный уровень.

Исследуемая территория юго-восточного Забайкалья расположена в пределах листа государственной геологической карты (ГГК) М-50 (Борзя), масштаба 1:1 000 000, и характеризуется сложным геологическим строением, а также длительной историей развития, которая, по мнению всех исследователей, во многом определила локализацию мультиметального (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит) эндогенного оруденения, развитого в связи с функционированием различных рудообразующих систем (Государственная геологическая карта…, 2010).

В региональном плане площадь относится к зоне сочленения Центрально-Азиатского подвижного пояса (ЦАПП) и Сибирской плиты, границу между которыми проводят по Монголо-Охотскому разлому (Таусон и др., 1984). ЦАПП к югу от Монголо-Охотского разлома, по мнению одних исследователей, представляет собой чередование разного размера блоков и выступов кристаллического фундамента (микроплит – микроконтинентов), а также фрагментов складчатых и складчато-надвиговых систем (Красный и др., 1997), а по мнению других – коллаж разнородных и разновозрастных террейнов (Гусев, Хаин, 1995).

На территории ГГК М-50 существуют крупные структуры, различающиеся набором вещественных комплексов разного возраста и различной формационной принадлежности. Выделены раннепротерозойский, средне-позднерифейский, позднерифейско-раннепалеозойский, средне- и позднепалеозойский, позднепермско-раннетриасовый, позднетриасовый, ранне-среднеюрский, средне-позднеюрский, меловой и кайнозойский структурные этажи. В позднем мезозое территория испытала обширную тектономагматическую активизацию, с которой связывают формирование крупнейших месторождений металлов, но предыстория металлогенического развития обусловлена всеми предыдущими этапами, начиная с докембрия.

В целом для геологических и металлогенических структур юго-восточного Забайкалья характерно развитие региональных северо-восточных зон и менее протяженных разломов северо-западного простирания (Государственная геологическая карта…, 2010). Принимая во внимание обозначенный структурный план, сложность геологического строения и высокие перспективы обнаружения новых рудных объектов, задача дешифрирования и интерпретации линеаментов, маркирующих разрывные структуры, в пределах юго-восточного Забайкалья с целью прогноза локализации рудообразующих систем, является крайне актуальной.

Выделение линеаментов в пределах рассматриваемой территории, в отличие от большинства работ по реализации линеаментного анализа, учитывая тесную связь термина «линеамент» с морфологическими особенностями рельефа и результаты исследований авторов для других территорий, осуществлённых с использованием данного подхода, проводилось не с использованием космоснимков, а на основе визуализации и анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) (Ustinov et al., 2024). ЦМР территории визуализировалась в геоинформационной (ГИС) среде с использованием открытых и отфильтрованных (с удалением техногенных объектов и лесов) данных FABDEM (Forest And Buildings removed Digital Elevation Model) с исходным пространственным разрешением ≈30 метров на пиксель, созданных на основе результатов радарной интерферометрической съемки поверхности земного шара (Hawker et al., 2022).

Для наиболее оптимального выделения линеаментов с использованием автоматических программных средств, применялся метод нелинейной направленной фильтрации ЦМР, что позволило подчеркнуть все морфоструктурные особенности территории при возможных положениях источника света. Направленная фильтрация, в соответствии с общеизвестными методиками (Enoh et. al., 2021), производилась по четырем основным направлениям: С–Ю (0°), СВ–ЮЗ (45°), В–З (90°), ЮВ–СЗ (135°), с построением соответствующих схем теневого рельефа и выделением по каждой из них линеаментов. Далее выделенные линейные элементы объединялись в единый слой, отражающий все возможные линеаменты на рассматриваемом уровне генерализации ЦМР в зависимости от структурных особенностей рельефа.

Примененный подход, учитывая высокое исходное пространственное разрешение используемой ЦМР (≈30 метров на пиксель), позволяет выделять на территории множество линеаментов, которые могут отражать относительно непротяженные разрывные структуры самых высоких рангов (в масштабе исследуемой площади), характеризующие наиболее локальный уровень относительного других структур, формирующих общий каркас разрывных нарушений. Данные линейные элементы возможно проинтерпретировать в качестве так называемых «мегатрещин», оперяющих протяженные разломы (Petrov et al., 2010; Ребецкий и др., 2017).

Для решения задачи идентификации протяженных разрывов высоких рангов, которые маркируются более протяженными линеаментами, а также идентификации всех линейных элементов рельефа, проявленных на различных масштабных уровнях, предложено искусственно «ухудшать» пространственное разрешение исходной ЦМР с определенным шагом, для каждого из которых процедуры фильтрации ЦМР по четырем направлениям и автоматического выделения линеаментов повторяются. Шаг занижения пространственного разрешения изображения ЦМР определён эмпирически с учетом минимальных потерь и исключения дублирования выделяемых линейных объектов, относящихся по геометрическим параметрам к одному рангу. Это позволило выделить линеаменты различной протяженности, отражающие разноранговые разломные структуры, и, тем самым, при дальнейшем тектонофизическом анализе учесть масштабный эффект в развитии элементов каркаса разрывных нарушений территории (Petrov et al., 2017; Petrov et al., 2019).

Выделение линеаментов по мере последовательного занижения пространственного разрешения ЦМР позволило подчеркнуть особенности развития и эволюции каркаса разноранговых разрывных структур в горизонтальной плоскости от надрегионального до локальных уровней с учетом площади исследования. Для территории юго-восточного Забайкалья на региональных масштабных уровнях максимальное развитие получили

протяженные системы разрывов северо-восточного простирания, отвечающие структурному плану всего региона и, вероятно, маркирующие зоны аккреции террейнов к Сибирскому кратону. При переходе к более локальным масштабным уровням наблюдается постепенное обособление, по сравнению с разломами северо-восточной ориентировки, системы разрывов северо-западного простирания, вплоть до её полного доминирования при выделении и анализе линеаментов на исходном пространственном разрешении используемой ЦМР (30 метров на пиксель).

Для восстановления геодинамической эволюции территории по структурно-геоморфологическим признакам проводилась реконструкция ориентировок осей сжатия и растяжения сдвигового поля напряжений-деформаций (ПНД), а также определение кинематического типа предполагаемых разрывных разноранговых структур, в соответствии с моделью П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) с помощью созданного программного обеспечения Lineament Stress Calculator (Свечеревский и др., 2025).

Проведенные реконструкции позволили выделить основные, наиболее проявленные, этапы тектогенеза в пределах исследуемой территории.

I) Первый этап характеризуется субширотной ориентировкой оси максимального сжатия, при этом протяженные региональные и надрегиональные магистральные структуры северо-восточного простирания функционировали как правые сдвиги. Помимо прочего, формируются менее протяженные, по сравнению с обозначенными структурами, северо-западные разрывы, как первичные антитетические сколы с левосторонней сдвиговой кинематикой. Данные параметры ПНД реконструируются преимущественно для надрегиональных и региональных масштабных уровней и, соответственно, отвечают наиболее мощным сдвиговым процессам, проявленным повсеместно в пределах рассматриваемой площади. Эти процессы могут быть сопоставимы с установленными аккреционно-коллизионными событиями причленения террейнов юго-восточного Забайкалья к Сибирскому кратону.

II) Второй этап, наиболее вероятно, связан с тектономагматической активизацией территории в позднем мезозое и проявлен на более локальных масштабных уровнях, что говорит о значительно меньшей, по сравнению с предыдущим этапом, интенсивности деформаций. Данный этап характеризуется инверсией осей ПНД – ось максимального сжатия в этом случае имела субмеридиональную ориентировку, при этом заложенные на предыдущем этапе как первичные антитетические сколы северо-западные разрывы получили наибольшее развитие и начали функционировали как правые сдвиги с соответствующим парагенезисом оперяющих мегатрещин более низких рангов.

На основе реконструкций ориентировки оси главных сжимающих усилий в регионе для разрывных нарушений с помощью расчета коэффициента тенденции к сдвигу проведена визуализация сегментов разломов, в различной степени предрасположенных к сдвигу, выявлены участки концентрации и рассредоточения деформаций. В итоге представлены схемы визуализации разноориентированных сегментов разрывных структур района, предрасположенных к сдвигу, в зависимости от наиболее проявленных ориентировок осей региональных анизотропных напряжений, что позволило сделать вывод о наиболее деформированных и проницаемых для рудоносных флюидов участках на период позднемезозойской тектономагматической активизации.

Итогом работы стала комплексная схема структурно проницаемых областей в пределах территории юго-восточного Забайкалья, основанная на анализе пространственной информации о параметрах выявленных разномасштабных структур и результатах их тектонофизической интерпретации. Данная схема является важной структурно-тектонической прогнозной основой при проектировании поисковых работ в пределах рассматриваемой площади на различные типы полезных ископаемых и легко может быть дополнена специализированной информацией о геофизических и геохимических полях, а также других данных, в зависимости от искомого типа рудной минерализации.

Для прогноза урановорудных систем в разработанную структурную схему интегрирована информация о содержании урана в коренных породах, полученная на основе проведенных ранее площадных наземных съемок, что позволило создать прогнозно-поисковую модель, ориентированную на поиски преимущественно урановых месторождений. В результате локализовано несколько наиболее перспективных областей и сформулированы рекомендации для постановки дальнейших поисковых работ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист M-50 – Борзя. Объяснительная записка. / Отв. исп. Е.А. Шивохин, А.Ф. Озерский. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.
2. Гусев Г.С., Хаин В.Е. О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири) // Геотектоника. 1995. №5. С. 68–82.
3. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.
4. Красный Л.И. Тектонотип межблоковой (коллизионно-аккреционной) структуры: системы Монголо-Охотская и Циньлинская // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 5. С. 3–9.
5. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. Москва: ГЕОС, 2017. 235 с. https://elibrary.ru/YPNZQR
6. Свечеревский А.Д., Устинов С.А., Лапаев Д.С., Петров В.А. Реконструкция параметров сдвиговых напряжений при формировании разноранговых разломов западного Прибайкалья на основе тектонофизической интерпретации линеаментов // Физика Земли. 2025. № 2. С. 95–113.
7. Таусон Л.В., Антипин Н.С., Захаров М.И., Зубков В.С. Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.
8. Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria // Geod. Cartogr. 2021. Vol. 47. P. 34–44. https://doi.org/10.3846/GAC.2021.12099
9. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. N 3/4. P. 437–457. https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3
10. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17(2), P. 024016, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f
11. Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. Vol. 15. P. 483–506. https://doi.org/10.1130/GSAB-15-483
12. Petrov V.A., Sim L.A., Nasimov R.M., Shchukin S.I. Fault tectonics, neotectonic stresses, and hidden uranium mineralization in the area adjacent to the Strel'tsovka Caldera // Geology of Ore Deposits. 2010. Vol. 52. P. 279–288. https://doi.org/10.1134/S1075701510040033
13. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Ustinov S.A., Minaev V.A. Rescaling of fluid-conducting fault structures // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 472. P. 130–133. https://doi.org/10.1134/S1028334X17020027
14. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Ustinov S.A., Minaev V.A. Scale Effect in a Fluid-Conducting Fault Network // Geology of Ore Deposits. 2019. Vol. 61. P. 293–305. https://doi.org/10.1134/S1075701519040056
15. Ustinov S.A., Chepchugov A.M., Tomarovskaya M.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Yarovaya E.V. Structural–Tectonophysical Approach to Interpreting Lineament Analysis Results for the Prediction of Ore-Forming Mineral Systems Using the Example of the Tuyukan Ore Cluster Area // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2024. Vol. 60. P. 1547–1565. https://doi.org/10.1134/S0001433825700215

*Interpretation of Lineaments in Southeastern Transbaikalia Using a Multiscale Tectonophysical Approach for the Prediction of Uranium Ore-Forming Systems

Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Andreev A.A., Nafigin I.O., Svecherevskiy A.D., Lapaev D.S.
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, stevesa@mail.ru

Fracture structures (faults, cracks) in the Earth's crust—defined in the broadest sense as discontinuities in rock masses with or without displacement along the rupture plane—form throughout the entire geological history of the Earth in accordance with the prevailing geodynamic settings at the time.

Lineament analysis is commonly applied for the identification of such fracture structures across vast areas. The term lineament was introduced over a century ago by the American geologist W.H. Hobbs (Hobbs, 1904). Due to the lack of other reliable methods for mass identification of fracture structures, lineament analysis remains one of the most effective remote methods for reconstructing the framework of faults and deep tectonic structures across large territories (Katz et al., 1986).

During structural-lineament analysis, researchers often identify lineaments of the same rank, typically short in extent, without considering the scale effect in the development of interpreted fracture structures. This effect refers to the "change in the properties of natural or artificial objects and materials as their geometric parameters vary," which is equally valid for fracture structures (Petrov et al., 2017; Petrov et al., 2019). As shown in numerous modeling experiments, the formation of an extensive fault zone follows a sequence involving systems and en echelon arrays of subsidiary fractures of different kinematic types and ranks, each reflecting a specific scale level.

The study area in southeastern Transbaikalia lies within the M-50 (Borzya) sheet of the State Geological Map at a 1:1,000,000 scale and is characterized by a complex geological structure and long evolutionary history. According to many researchers, this history largely determined the localization of multimetal (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, fluorite) endogenous mineralization associated with various ore-forming systems (State Geological Map..., 2010).

Regionally, the area belongs to the junction zone between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian Craton, with the boundary traced along the Mongol–Okhotsk Fault (Tauson et al., 1984). South of this fault, the CAOB is considered either an alternation of crystalline basement blocks and uplifts (microplates–microcontinents), and fragments of fold-and-thrust systems (Krasny et al., 1997), or a collage of heterogeneous and differently aged terranes (Gusev, Khain, 1995).

Within the M-50 map sheet, large structures with varied rock assemblages of different ages and formations have been identified, including Early Proterozoic, Middle to Late Riphean, Late Riphean to Early Paleozoic, Middle and Late Paleozoic, Late Permian–Early Triassic, Late Triassic, Early to Middle Jurassic, Middle to Late Jurassic, Cretaceous, and Cenozoic structural stages. A period of widespread tectonomagmatic activation in the Late Mesozoic is associated with the formation of major metal deposits, though the metallogenic history began as early as the Precambrian.

Geological and metallogenic structures in southeastern Transbaikalia are characterized by regional northeast-trending zones and shorter northwest-trending faults (State Geological Map..., 2010). Given the structural complexity, high mineral potential, and the need to predict the localization of ore-forming systems, the task of decoding and interpreting lineaments marking fracture structures in southeastern Transbaikalia is highly relevant.

Unlike many previous studies, lineament extraction in this work—considering the term's close association with topographic morphology and previous studies by the authors—was based not on satellite imagery but on the analysis of digital elevation models (DEMs) (Ustinov et al., 2024). The

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

DEM was visualized in a GIS environment using open-source FABDEM data (Forest And Buildings removed Digital Elevation Model), filtered to remove anthropogenic and forest elements, with a native spatial resolution of approximately 30 meters per pixel, based on radar interferometric surveying (Hawker et al., 2022).

To optimally extract lineaments using automated tools, a method of nonlinear directional filtering of the DEM was applied, emphasizing morphological structures under different illumination directions. According to widely used techniques (Enoh et al., 2021), filtering was performed in four primary directions: N–S (0°), NE–SW (45°), E–W (90°), and SE–NW (135°), followed by construction of shaded relief maps and extraction of lineaments from each. The extracted linear elements were then combined into a single layer, capturing all possible lineaments at the analyzed DEM scale according to surface structure.

This approach, enabled by the high-resolution DEM (~30 m), made it possible to extract numerous short lineaments that likely correspond to small-scale fracture structures—the highest hierarchical level of detail at the given map scale. These linear features can be interpreted as "mega-fractures" flanking major faults (Petrov et al., 2010; Rebetsky et al., 2017).

To identify large-scale faults represented by more extensive lineaments, and to detect structures across various scale levels, an artificial reduction of the DEM's spatial resolution was introduced. For each step of degradation, the filtering and extraction procedure was repeated. The step size was determined empirically to minimize redundancy while preserving distinct rank-based geometric patterns. As a result, lineaments of varying lengths were extracted, corresponding to faults of differing ranks, accounting for scale effects in the tectonic framework (Petrov et al., 2017; Petrov et al., 2019).

Sequential extraction of lineaments from progressively degraded DEMs allowed tracing the development of fracture networks from regional to local scales. In southeastern Transbaikalia, northeast-trending systems dominate at regional levels, likely marking terrane accretion zones along the Siberian Craton. At finer scales, northwest-trending systems become more distinct and ultimately dominant when analyzing the DEM at native resolution (30 m/pixel).

To reconstruct the geodynamic evolution of the region, orientations of compression and extension axes in the shear stress–strain field were determined, as well as the kinematic types of faults of different ranks, according to P.L. Hancock's model (Hancock, 1985), using the Lineament Stress Calculator software (Svecherevskiy et al., 2025).

The reconstructions identified two main tectonic stages:

Stage I featured sublatitudinal maximum compression. Major northeast-trending faults acted as right-lateral strike-slip zones, accompanied by shorter northwest-trending faults functioning as primary antithetic fractures with left-lateral kinematics. These parameters reflect large-scale deformation likely linked to the accretion–collision events of southeastern Transbaikalia against the Siberian Craton.

Stage II, associated with Late Mesozoic tectonomagmatic activation, was marked by reduced deformation intensity and a change in stress orientation to submeridional compression. Previously antithetic northwest faults developed as right-lateral shears with subordinate mega-fracture systems.

Based on reconstructions of principal stress orientations, shear tendency coefficients were calculated to visualize fault segments with varying susceptibility to shearing and to delineate zones of strain localization and dissipation. The final result includes a map showing fault segments oriented according to the dominant regional anisotropic stress fields, highlighting the most deformed and permeable areas favorable for ore-bearing fluid migration during the Late Mesozoic.

The final product is a comprehensive structural-permeability map of southeastern Transbaikalia, integrating multiscale structural data and tectonophysical interpretations. It serves as a structural-tectonic prediction basis for exploration planning and can be further augmented with geophysical, geochemical, or other datasets depending on the targeted mineralization type.

For uranium system prediction, uranium concentration data in host rocks from previous ground surveys were integrated into the structural framework. This enabled the development of a predictive exploration model focused on uranium deposits, resulting in the identification of several promising zones and recommendations for further exploration.

This research was carried out under the State Assignment of IGEM RAS.

1. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Sheet M-50 – Borzya. Explanatory Note / Eds. E.A. Shivokhin, A.F. Ozersky. SPb.: Cartographic Factory of VSEGEI, 2010. 553 p.
2. Gusev G.S., Khain V.E. On the relationships of the Baikal–Vitim, Aldan–Stanovoy, and Mongol–Okhotsk terranes (southern Central Siberia) // Geotectonics. 1995. No. 5. P. 68–82.
3. Katz Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. Fundamentals of Lineament Tectonics. Moscow: Nedra, 1986. 144 p.
4. Krasny L.I. Tectonotype of interblock (collisional–accretionary) structures: Mongol–Okhotsk and Qinling systems // Pacific Geology. 1997. Vol. 16. No. 5. P. 3–9.
5. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip surfaces to tectonic stresses: Methods and algorithms. Moscow: GEOS, 2017. 235 p. https://elibrary.ru/YPNZQR
6. Svecherevskiy A.D., Ustinov S.A., Lapaev D.S., Petrov V.A. Reconstruction of Shear Stress Parameters During the Formation of Multi-Rank Faults in Western Pribaikalye Using Tectonophysical Interpretation of Lineaments // Physics of the Earth. 2025. No. 2. P. 95–113.
7. Tauson L.V., Antipin N.S., Zakharov M.I., Zubkov V.S. Geochemistry of Mesozoic Latites of Transbaikalia. Novosibirsk: Nauka, 1984. 189 p.
8. Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria // Geodesy and Cartography. 2021. Vol. 47. P. 34–44. https://doi.org/10.3846/GAC.2021.12099
9. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. No. 3/4. P. 437–457. https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3
10. Hawker L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17(2), P. 024016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f
11. Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society of America Bulletin. 1904. Vol. 15. P. 483–506. https://doi.org/10.1130/GSAB-15-483
12. Petrov V.A. et al. Fault tectonics, neotectonic stresses, and hidden uranium mineralization in the area adjacent to the Strel'tsovka Caldera // Geology of Ore Deposits. 2010. Vol. 52. P. 279–288. https://doi.org/10.1134/S1075701510040033
13. Petrov V.A. et al. Rescaling of fluid-conducting fault structures // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 472. P. 130–133. https://doi.org/10.1134/S1028334X17020027
14. Petrov V.A. et al. Scale Effect in a Fluid-Conducting Fault Network // Geology of Ore Deposits. 2019. Vol. 61. P. 293–305. https://doi.org/10.1134/S1075701519040056
15. Ustinov S.A. et al. Structural–Tectonophysical Approach to Interpreting Lineament Analysis Results for the Prediction of Ore-Forming Mineral Systems Using the Example of the Tuyukan Ore Cluster Area // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2024. Vol. 60. P. 1547–1565. https://doi.org/10.1134/S0001433825700215

Дешифрирование и интерпретация структур центрального типа с использованием данных дистанционного зондирования Земли для прогнозного картирования рудообразующих систем на примере юго-восточного Забайкалья

Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Нафигин И.О., Яровая Е.В.
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: stevesa@mail.ru

В рамках многочисленных современных региональных дистанционных исследований геологических структур задаче достоверного дешифрирования, изучения и интерпретации структур центрального типа (СЦТ) часто придаётся второстепенное значение. СЦТ, особенно в зарубежной литературе, часто обозначаются термином «кольцевые структуры» и в наиболее общем определении, представляют собой геологические образования кольцевой, округлой или овальной формы в плане, наблюдаемые на поверхности Земли и других небесных тел (Соловьев, 1978).

Проведенное картирование, систематизация и сравнительный анализ позволили установить во многих рудоносных провинциях мира широкое распространение разнообразных эндогенных рудных месторождений, приуроченных к СЦТ, считавшихся ранее достаточно редкими структурными образованиями (Невский, Фролов, 1985). Таким образом, подтверждена важная практическая роль СЦТ в постановке и решении задач поиска полезных ископаемых и прогнозных металлогенических построений.

В зависимости от степени геоморфологической выраженности, особенностей геометрии, вещественно-структурных признаков, размеров и генезиса, на сегодняшний день существует множество классификаций СЦТ. К наиболее крупным подразделениям генетической классификации обычно относят магматогенные, метаморфоргенные, тектоногенные, тектоногенно-магматогенные, аркогенные, интрегеогенные, эрозионные и импактные.

Исследуемая территория юго-восточного Забайкалья расположена в пределах листа государственной геологической карты (ГГК) М-50 (Борзя), масштаба 1:1 000 000, и характеризуется сложным геологическим строением, а также длительной историей развития, которая, по мнению всех исследователей, во многом определила локализацию мультиметального (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит) эндогенного оруденения, развитого в связи с функционированием различных рудообразующих систем (Государственная геологическая карта…, 2010).

В региональном плане площадь относится к зоне сочленения Центрально-Азиатского подвижного пояса (ЦАПП) и Сибирской плиты, границу между которыми проводят по Монголо-Охотскому разлому (Таусон и др., 1984). ЦАПП к югу от Монголо-Охотского разлома, по мнению одних исследователей, представляет собой чередование разного размера блоков и выступов кристаллического фундамента (микроплит – микроконтинентов), а также фрагментов складчатых и складчато-надвиговых систем (Красный и др., 1997), а по мнению других – коллаж разнородных и разновозрастных террейнов (Гусев, Хаин, 1995).

На территории ГГК М-50 существуют крупные структуры, различающиеся набором вещественных комплексов разного возраста и различной формационной принадлежности. Выделены раннепротерозойский, средне-позднерифейский, позднерифейско-раннепалеозойский, средне- и позднепалеозойский, позднепермско-раннетриасовый, позднетриасовый, ранне-среднеюрский, средне-позднеюрский, меловой и кайнозойский структурные этажи. В позднем мезозое территория испытала обширную тектоно-магматическую активизацию (ТМА), с которой связывают формирование крупнейших месторождений металлов, но предыстория металлогенического развития обусловлена всеми предыдущими этапами, начиная с докембрия.

В целом для геологических и металлогенических структур юго-восточного Забайкалья характерно тесное сочетание региональных северо-восточных зон и разломов с

концентрическими структурами и в первую очередь со структурами Восточно-Забайкальского мегасвода (Томсон и др., 1974). Принимая во внимание обозначенный структурный план, сложность геологического строения и высокие перспективы обнаружения новых рудных объектов, задача дешифрирования и интерпретации СЦТ в пределах юго-восточного Забайкалья с целью прогноза локализации рудообразующих систем, является крайне актуальной.

Дешифрирование предполагаемых СЦТ для большей достоверности проводилось в ручном режиме по результатам анализа цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной на основе данных радарного дистанционного зондирования Земли SRTM (Liping et al, 2011) и визуализированной различными способами: создание теневого рельефа с вариациями положения источника света (фильтрация изображения), искусственное «вытягивание» рельефа, выделение морфологических классов. Всего в пределах площади выявлено 1285 структур, при этом в большем количестве представлены структуры диаметром менее 10 км и площадью менее 80 км^2 (85 %). Более крупные СЦТ развиты в меньшей степени и составляют 15% от общего количества структур.

Для установления пространственных взаимоотношений выявленных СЦТ и известных рудных объектов строилась схема относительной плотности всех металлических полезных ископаемых (месторождения, рудопроявления), известных в пределах территории, с указанием границ выделенных структур. По своему смыслу, с точки зрения пространственного размещения рудных объектов, их относительная удельная пространственная плотность отражает количество месторождений и рудопроявлений на единицу площади и близка к понятию «экстенсивности» оруденения (по С.С. Смирнову). Рассмотрим положение относительно выделенных СЦТ крупнейших рудных полей территории.

Балейское рудное поле (БРП – Au) локализовано вблизи области примыкания и сближения двух крупных СЦТ на юго-востоке и юго-западе (относительно рудного поля), а также нескольких меньших по размерам структур на севере и северо-западе. Необходимо отметить, что в рамках крупных СЦТ наблюдаются «вложенные» структуры более высоких рангов, которые смещены к внешней границе и области локализации месторождений и рудопроявлений БРП. Это говорит либо о многократной магматической активизации, либо об участии в процессе отложения рудной минерализации нескольких одновозрастных и пространственно связанных, но расположенных на различных глубинных уровнях, магматических очагов, что, безусловно, в обоих случаях, повлияло на отложение богатой рудной минерализации.

Стрельцовское рудное поле (СРП – U, Mo) локализовано вблизи развития двух крупных «вложенных» друг в друга СЦТ на северо-востоке, в пределах которых также развиты многочисленные более мелкие структуры, большая часть которых смещена к области пространственных максимумов рудных объектов. На северо-западе к рудному полю примыкает группа СЦТ более низких рангов. Такое пространственное размещение структур также позволяет говорить о полистадийности процесса отложения оруденения и участии нескольких связанных (дочерних) или не связанных друг с другом разновозрастных магматических очагов, выступающих в роли предполагаемых источников минерального вещества.

В качестве ещё одного наглядного примера можно привести Орловское месторождение (Ta, Li), входящее в Орловско-Спокойнинский рудный узел, который приурочен к Хангилайскому плутону мезозойских гранитов, выраженному в рельефе купольным поднятием (Государственная геологическая карта…, 2010) и выделенным нами в отдельную СЦТ. При этом богатое оруденение, наиболее вероятно, связано с сочетанием глубинных магматических очагов, выраженных в рельефе крупными СЦТ, примыкающими к рудному узлу с севера, востока и юга.

Установлено, что все пространственные максимумы плотности оруденения сконцентрированы на периферии крупных СЦТ, а также вне их границ, но в непосредственной

близости, особенно относительно областей интерференции и пространственного сближения, а также примыкания структур. Большинство известных рудных объектов приурочено к внутренним и близпериферическим областям более мелких структур (менее 10 км в поперечнике), в зависимости от степени развития каркаса секущих эти структуры, или развитых в границах структур, разрывных нарушений. Ярким подтверждением этого является СРП, где 19 U-Mo месторождений локализованы в пределах одноименной кальдеры на площади ≈140 км^2 (Ищукова и др., 2007).

Почти все крупные рудные объекты территории демонстрируют подобную установленную зависимость. Исключением является БРП, которое, несмотря на локализацию в области сближения крупнейших СЦТ территории, не приурочено к более мелким морфоструктурам. При этом для золотого оруденения БРП прослеживается четкая пространственная связь с региональными разломами северо-восточного простирания, а также линейными структурами более низкого ранга северо-западной ориентировки, игравшими роль флюидопроводящих каналов, рудоконтролирующих и рудовмещающих структур, создавая связь между предполагаемыми магматическими центрами, которые маркируются выделенными крупными СЦТ.

Для реконструкции глубины локализации предполагаемых магматических очагов, установления их связи с линейными тектоническими структурами и рудными объектами, через всю рассматриваемую территорию строились модельные разрезы по линиям, ориентированным с северо-запада на юго-восток – вкрест простирания линейных глубинных структур северо-восточного простирания и крупных хребтов, а также с юго-запада на северо-восток – субпараллельно глубинным разломам и осевым линиям хребтов первого порядка.

При создании модельных разрезов на начальном этапе с использованием ЦМР отстраивалась современная поверхность рельефа. На основе изолиний, полученных в результате интерпретации глубинных геофизических данных (Духовский и др., 1998), восстанавливалась подошва гнейсо-гранитового «слоя» с фиксацией разломов фундамента и установленных границ Восточно-Забайкальского ареал-плутона. Кроме того, с тектонической карты на разрезы сносились разломы различных рангов, в том числе глубинные, разделяющие территорию на крупные блоки. Также отмечались границы выделенных СЦТ с указанием диаметра структуры и позиции крупнейших рудных объектов. Помимо прочего, по результатам определения глубины эрозионного среза для крупнейших рудных полей и месторождений Дальнего Востока (Ван-Ван-Е, 2001) проведена реконструкция палеоповерхности территории на период позднемезозойской ТМА.

Далее, с использованием границ морфоструктур, геологической карты (Государственная геологическая карта…, 2010) и восстановленной палеоповерхности, решалась задача реконструкции глубины локализации магматических очагов, связанных с выявленными СЦТ. Из модельных разрезов видно, что известные крупные рудные объекты приурочены преимущественно к периферии малых локальных СЦТ, к их кольцевым разломам и трещинам, сформированным над магматическим очагом, который не вскрыт уровнем современного эрозионного среза.

Важно отметить, что СЦТ и связанные с ними реконструированные магматические очаги во всех случаях демонстрируют тесную пространственную связь с заверенными ранее глубинными разломами, которые, вероятно, играли роль магмоподводящих каналов. Кроме того, СЦТ фиксируются нами в основном над областью влияния выделенного Восточно-Забайкальского ареал-плутона, который, подвергаясь процессам неоднократной гранитизации и переплавления (Томсон и др., 1974), мог выступать в качестве глубинного «материнского» магматического очага для всех выявленных нами локальных менее глубинных очагов.

Помимо прочего крайне интересными, но дискуссионными, кажутся полученные результаты интерполяции центров выделенных СЦТ по диаметру (Ustinov et al., 2024). Области развития как малых (до 10 км в диаметре), так и крупных СЦТ (более 10 км в диаметре) формируют чередующиеся пояса (тренды), ориентированные преимущественно на северо-восток. Также среди областей развития СЦТ возможно выделить гораздо менее

протяженные линейные зоны северо-западной ориентировки. При этом, на всём протяжении зона развития крупных СЦТ неоднородна и наблюдается шаг интенсивности формирования структур. Если сравнивать пространственное положение СЦТ относительно развития установленных разрывных нарушений, то видно, что крупные структуры в большинстве случаев откартированы нами вне глубинных нарушений, но в пространственной близости от них. Малые структуры, напротив, формируются практически на глубинных разломах или разломах верхнего структурного этажа. Это может быть объяснено тем, что крупные структуры маркируют глубинные магматические очаги, и связь с конкретной разрывной структурой, выполнявшей роль магмоподводящего канала, устанавливается также на некоторой глубине, в зависимости от элементов залегания плоскости разрывного нарушения. Малые структуры маркируют менее глубинные очаги, центры которых находятся вблизи поверхности или вскрыты эрозионным срезом в виде локальных интрузий. Установлено, что 97 % рудных объектов территории приурочено к областям развития малых СЦТ. Данный вывод может быть использован как дополнительный пространственный критерий при создании комплексной прогнозно-поисковой модели юго-восточного Забайкалья.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

1. Ван-Ван-Е А.П. Эродированность эндогенных месторождений в зонах тектономагматической активизации Дальнего Востока // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 3. С. 97–104.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист M-50 – Борзя. Объяснительная записка. / Отв. исп. Е.А. Шивохин, А.Ф. Озерский. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.
3. Гусев Г.С., Хаин В.Е. О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири) // Геотектоника. 1995. №5. С. 68–82.
4. Духовский А.А., Амантов В.А., Артамонова Н.А., Панфильцев Д.Н., Ступак В.М. Сейсмические и гравитационные образы ведущих рудных районов и полей Юго-Восточного Приаргунья (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 2. С. 99–113.
5. Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В., Наумов Г.Б., Мельников И.В., Кандинов М.Н. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Типография Глазовская, 2007. 260 с.
6. Красный Л.И. Тектонотип межблоковой (коллизионно-аккреционной) структуры: системы Монголо-Охотская и Циньлинская // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 5. С. 3–9.
7. Невский В.Д., Фролов Д.Д. Структуры рудных месторождений кольцевого типа. М.: Недра, 1985. 247 с.
8. Соловьев В.В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-морфологического анализа. Объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1 : 10 000 000. Ленинград: М-во геологии СССР. Всесоюз. ордена Ленина науч.-исслед. геол. ин-т., 1978. 111 с.
9. Таусон Л.В., Антипин Н.С., Захаров М.И., Зубков В.С. Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.
10. Томсон И.Н., Полякова О.П., Кочнева Н.Т. Мегасвод Восточного Забайкалья и связь с ним нижнемелового эпитермального оруденения // В кн.: Проблемы эндогенного рудообразования. М.: Наука, 1974. С. 92–101.
11. Liping Y., Xingmin M., Xiaoqiang Z. SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. 2011. 32:14. P. 3875–3896.
12. Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Nafigin I.O., Yarovaya E.V. Detection and Interpretation of Central Type Structures within the Territory of Southeastern Transbaikalia for Prediction of Ore-Forming Systems // Geology of Ore Deposits. 2024. Vol. 66. P. 345–375.

*Decoding and Interpretation of Central-Type Structures Using Remote Sensing Data for Forecasting Mapping of Ore-Forming Systems: A Case Study from Southeastern Transbaikalia

Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Nafigin I.O., Yarovaya E.V.
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, stevesa@mail.ru

In many contemporary regional remote sensing studies of geological structures, the reliable decoding, study, and interpretation of central-type structures (CTS) are often assigned secondary importance. In international literature, CTS are frequently referred to as “ring structures” and are generally defined as geological features with circular, rounded, or oval outlines observed on the surface of the Earth or other planetary bodies (Soloviev, 1978).

Mapping, systematization, and comparative analysis have demonstrated that a wide variety of endogenous ore deposits are spatially associated with CTS in many metallogenic provinces worldwide—structures previously considered relatively rare (Nevsky, Frolov, 1985). This confirms the important practical role of CTS in mineral exploration and predictive metallogenic modeling.

Depending on their geomorphological expression, geometry, material–structural features, size, and genesis, numerous CTS classifications have been proposed. Major genetic types typically include magmatogenic, metamorphogenic, tectonogenic, tectonomagmatic, arcogenic, intergeogenic, erosional, and impact-related structures.

The study area, located within sheet M-50 (Borzya) of the State Geological Map (SGM) at a 1:1,000,000 scale, southeastern Transbaikalia, features complex geology and a long evolutionary history that, according to numerous researchers, significantly influenced the localization of multimetal (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, fluorite) endogenous mineralization associated with diverse ore-forming systems (State Geological Map..., 2010).

Regionally, the area lies at the junction of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian Craton, with the boundary traced along the Mongol–Okhotsk Fault (Tauson et al., 1984). South of this fault, the CAOB is interpreted either as a mosaic of crystalline basement blocks (microplates–microcontinents) and fragments of fold-and-thrust systems (Krasny et al., 1997), or as a collage of dissimilar and differently aged terranes (Gusev, Khain, 1995).

Within the M-50 sheet, large structural units differing in lithological composition, age, and formational type have been identified, including Early Proterozoic, Middle–Late Riphean, Late Riphean–Early Paleozoic, Middle–Late Paleozoic, Late Permian–Early Triassic, Late Triassic, Early–Middle Jurassic, Middle–Late Jurassic, Cretaceous, and Cenozoic structural levels. A major phase of tectonomagmatic activation (TMA) in the Late Mesozoic is associated with the formation of significant metal deposits, although the metallogenic evolution began as early as the Precambrian.

Geological and metallogenic structures of southeastern Transbaikalia are typified by a close combination of regional NE-trending fault zones and concentric features, particularly those of the East Transbaikalian megadome (Thomson et al., 1974). Considering this structural framework, geological complexity, and the area’s high ore potential, the decoding and interpretation of CTS in this region for the purpose of predicting ore-forming systems is highly relevant.

To improve reliability, CTS were decoded manually using digital elevation models (DEMs) based on radar remote sensing data from SRTM (Liping et al., 2011), visualized through various methods: shaded relief with changing light sources (image filtering), vertical exaggeration, and morphological classification. A total of 1,285 structures were identified, with 85% having diameters less than 10 km and areas under 80 km². Larger CTS account for only 15%.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

To evaluate spatial relationships between CTS and known ore occurrences, a relative density map of metallic mineral deposits (deposits, prospects) was constructed, showing CTS boundaries. Relative spatial density, defined as the number of ore objects per unit area, is close in meaning to Smirnov's concept of mineralization "extensity."

The Balei ore field (Au) is situated near the junction of two major CTS to its southeast and southwest, and several smaller ones to its north and northwest. Larger CTS also contain smaller nested structures shifted toward the outer boundary and the location of ore deposits, suggesting either repeated magmatic activity or simultaneous involvement of spatially related magmatic sources at different depths—both scenarios contributing to mineralization.

The Streltsovka ore field (U, Mo) lies near two nested large CTS in the northeast, surrounded by smaller structures clustered around ore occurrences. This spatial distribution suggests multistage mineralization, involving either genetically related or independent magmatic sources of varying age.

Another example is the Orlovskoe deposit (Ta, Li), part of the Orlovsko–Spokoininsky ore cluster, associated with the Hangilai pluton of Mesozoic granites, expressed as a dome-like elevation in topography and identified as a CTS. Rich mineralization here is likely linked to deep magmatic sources indicated by large CTS surrounding the cluster from the north, east, and south.

All spatial maxima in ore density occur on the peripheries of large CTS or just outside them—especially near interference zones, junctions, or proximity between structures. Most ore objects are associated with interior or near-edge areas of small CTS (<10 km in diameter), depending on the development of fracture frameworks intersecting the structures or internal faults. The Streltsovka field is a prime example, with 19 U–Mo deposits located within the eponymous caldera (~140 km²) (Ishchukova et al., 2007).

Nearly all major ore objects demonstrate similar patterns. An exception is the Balei field, which, despite lying near the junction of large CTS, is not associated with small morphological structures. However, the gold mineralization here is clearly spatially linked to NE-trending regional faults and NW-trending lower-rank structures that likely acted as fluid conduits, ore-controlling and ore-hosting elements, connecting CTS-marked magmatic centers.

To reconstruct the depth of possible magmatic sources and their relationships to tectonic lineaments and ore objects, model cross-sections were constructed across the study area: NW–SE profiles (perpendicular to NE-trending structures and ridges) and SW–NE profiles (parallel to deep faults and axial lines of first-order ridges).

The modern topography was first derived from DEMs. The base of the gneiss–granite "layer" was reconstructed using isolines from interpreted deep geophysical data (Dukhovsky et al., 1998), marking basement faults and boundaries of the East Transbaikalian areal pluton. Various faults, including deep crustal and block-bounding faults, were also mapped on the sections, along with CTS boundaries, diameters, and major ore locations. Additionally, the Mesozoic paleosurface was reconstructed based on erosion level data for major ore fields in the Russian Far East (Van-Van-E, 2001).

Using CTS boundaries, geological maps (State Geological Map..., 2010), and the reconstructed paleosurface, the depth of magmatic centers associated with CTS was determined. Sections show that major ore objects are typically located on the periphery of small local CTS—specifically near ring faults and fractures above deep magmatic centers that are not exposed at the present erosion level.

It is important to note that CTS and the associated inferred magmatic sources consistently show close spatial correlation with previously validated deep faults, likely acting as magma-feeding conduits. Furthermore, CTS are primarily located above the East Transbaikalian areal pluton, which underwent repeated granitization and remelting (Thomson et al., 1974), and may have acted as a deep "parental" source for shallower, local magmatic centers.

Additionally, intriguing though debatable results were obtained from interpolating CTS centers by diameter (Ustinov et al., 2024). Both small (<10 km) and large (>10 km) CTS form alternating NE-trending belts. Less extensive NW-trending linear zones are also identified. Throughout, the distribution of large CTS is uneven, forming intensity steps. Spatial comparisons with known faults show that large CTS were typically mapped outside deep faults but near them, while small CTS tend

to align with deep or upper-crustal faults. This suggests that large CTS reflect deeper magmatic centers, with links to faults located at depth. Small CTS likely mark shallower centers, exposed or near-surface intrusions. It is established that 97% of ore occurrences are associated with small CTS, making this a valuable spatial criterion for constructing predictive exploration models for southeastern Transbaikalia.

This study was conducted under the State Assignment of IGEM RAS.

1. Van-Van-E A.P. Erosion of Endogenous Deposits in Tectonomagmatic Activation Zones of the Russian Far East // Pacific Geology. 2001. Vol. 20. No. 3. P. 97–104.
2. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Sheet M-50 – Borzya. Explanatory Note / Eds. E.A. Shivokhin, A.F. Ozersky. SPb.: Cartographic Factory of VSEGEI, 2010. 553 p.
3. Gusev G.S., Khain V.E. On the Relationships of the Baikal–Vitim, Aldan–Stanovoy, and Mongol–Okhotsk Terranes (Southern Central Siberia) // Geotectonics. 1995. No. 5. P. 68–82.
4. Dukhovsky A.A., Amantov V.A., Artamonova N.A., Panfil'tsev D.N., Stupak V.M. Seismic and Gravity Images of Major Ore Regions in Southeastern Priargunye (Eastern Transbaikalia, Russia) // Geology of Ore Deposits. 1998. Vol. 40. No. 2. P. 99–113.
5. Ishchukova L.P. et al. Uranium Deposits of the Streltsovka Ore Field in Transbaikalia. Irkutsk: Glazovskaya Press, 2007. 260 p.
6. Krasny L.I. Tectonotype of Interblock (Collision–Accretionary) Structures: The Mongol–Okhotsk and Qinling Systems // Pacific Geology. 1997. Vol. 16. No. 5. P. 3–9.
7. Nevsky V.D., Frolov D.D. Ring-Type Ore Deposit Structures. Moscow: Nedra, 1985. 247 p.
8. Soloviev V.V. Central-Type Structures in the USSR Based on Geological–Morphological Analysis. Explanatory Note to the Map of Central-Type Morphostructures of the USSR, Scale 1:10,000,000. Leningrad: Ministry of Geology of the USSR. VSEGEI, 1978. 111 p.
9. Tauson L.V. et al. Geochemistry of Mesozoic Latites of Transbaikalia. Novosibirsk: Nauka, 1984. 189 p.
10. Thomson I.N. et al. The East Transbaikalian Megadome and Its Connection to Lower Cretaceous Epithermal Mineralization // In: Problems of Endogenous Ore Formation. Moscow: Nauka, 1974. P. 92–101.
11. Liping Y. et al. SRTM DEM and Its Application Advances // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32. No. 14. P. 3875–3896.
12. Ustinov S.A. et al. Detection and Interpretation of Central-Type Structures within the Territory of Southeastern Transbaikalia for Prediction of Ore-Forming Systems // Geology of Ore Deposits. 2024. Vol. 66. P. 345–375.

Возможности выделения площадей, перспективных на обнаружение месторождений рудных полезных ископаемых, на основе геофизического изучения палеосистем тепломассопереноса

Тихоцкий С.А.[1], Черкасов С.В.[2]
[1]ИФЗ РАН; [2]ГГМ РАН

Одной из наиболее актуальных проблем рудной поисковой геологии является проблема прогноза рудных месторождений полезных ископаемых, или, другими словами, проблема выделения новых площадей под поиски рудных месторождений.

Большая часть легкодоступных, залегающих на поверхности, или близко к поверхности, месторождений уже открыта, и выделение новых перспективных территорий не может осуществляться традиционными геологическими методами. На первый план в рамках прогноза выходят геофизические методы, дающие возможность картирования особенностей строения земной коры, характерных для участков с аномальным содержанием полезных компонентов.

Пространственная связь месторождений полезных ископаемых с особенностями потенциальных геофизических полей привлекала внимание ученых с того момента, как в их распоряжении появились геофизические и спутниковые данные, равномерно покрывающие целые континенты, или их значительные части (Тихоцкий, 2006). Равномерность информационного покрытия в данном случае необходима как для анализа указанных пространственных связей, так и для дальнейших прогнозных построений. Требованию равномерности отвечают:

- данные спутниковых съемок, в т.ч. – модель геоида – практически на всю территорию Земли;
- гравиметрические и магнитометрические данные масштаба 1:200 000 и мельче, или скомпилированные покрытия масштаба 1:1 000 000 – на территорию Российской Федерации.

Совершенно очевидно, что аномалии, обнаруживаемые в покрытиях такого масштаба, как правило не могут быть связаны непосредственно с месторождениями полезных ископаемых, за исключением экзотических случаев, таких, как, например, Курская магнитная аномалия. Однако, критериями прогноза могут служить особенности строения земной коры, связанные с процессами рудогенеза, и характеризующиеся размерами и физическими свойствами, вызывающими аномалии, проявляющиеся в указанных покрытиях. К таким особенностям относятся, в первую очередь, аномалии, связанные с энергетикой процессов рудообразования (Волков, 2023, Черкасов, 2024).

Огромная доля месторождений рудных полезных ископаемых образуется в результате перераспределения вещества в земной коре, что требует достаточно контрастных P-T условий, обеспечивающих движение растворов, вымывающих и транспортирующих полезный компонент в зону разгрузки в течение долгого (от десятков до сотен тысяч, а иногда – и до миллионов лет) времени, причем зона разгрузки, как правило, представляет собой зону резкого изменения P-T условий. Здесь следует заметить, что формирование месторождений является не целью природных процессов, а лишь их побочным следствием. Это означает, что процессы, обеспечивающие рудообразование, охватывают большие объемы земной коры, изменяя ее физические свойства, в результате чего долговременное соседство массивов, находящихся в разных P-T условиях, однозначно приведет к разнице в физических свойствах этих массивов, которая может сохраниться до нашего времени, и быть достаточно контрастной для обнаружения геофизическими методами. При этом, зона разгрузки представляет собой лишь один элемент палеосистемы тепломассопереноса, «поставляющей» энергию из более глубоких горизонтов земной коры и мантии, и другие элементы такой палеосистемы также могут фиксироваться в земной коре в результате долгосрочного теплового воздействия на породы, вызывающего их гомогенизацию, или изменение физических свойств. Современными геофизическими методами в таких случаях обнаруживаются зоны сейсмической прозрачности

и плотностных аномалий корового масштаба (Черкасов, 2006). Зоны сейсмической прозрачности изначально выделялись по сейсмическим разрезам геотраверсов глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) (Черкасов, 2000), а специалисты ЦНИГРИ использовали информацию о таких зонах, выделенных уже по современным сейсмическим данным профиля 2-ДВ (КМПВ, МОВ-ОГТ), для обоснования существования глубинных многоярусных рудно-магматических систем (Стружков, Константинов, 2005).

Теория транскоровых палеосистем тепломассопереноса использована для прогноза крупных и сверхкрупных рудных месторождений в обрамлениях кристаллических щитов (Черкасов и др., 2008), и по результатам работ были построены 28 карт участков, перспективных на обнаружение 10-ти типов рудных месторождений в обрамлениях Анабарского, Балтийского, Алдано-Станового щитов, и Енисейского кряжа. Выделенные участки имеют размеры от 4х7 км до 12х25 км, что позволяет рассматривать их как объекты для постановки геологоразведочных работ стадии общих поисков.

В дальнейшем Б.В. Стерлиговым была дополнительно разработана методика количественной оценки приуроченности рудных объектов к элементам геологического строения земной коры и потенциальных геофизических полей, позволившая существенно уточнить результаты прогноза для Енисейского кряжа.

В настоящий момент представляется целесообразным создание научного коллектива (лаборатории и пр.) по прогнозу скрытых рудных объектов на основе анализа и переинтерпретации геолого-геофизических данных под углом картирования транскоровых палеосистем тепломассопереноса как источника энергии для формирования эндогенных месторождений для территорий, характеризующихся мощностью осадочного чехла до 1500 м. В качестве методов интерпретации должны использоваться как классические подходы к комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, включая решение обратных задач и построение 3D моделей сред, так и современные разработки в области машинного обучения (Тихоцкий, 2024).

При этом обязательным элементом работ должно быть выборочное заверочное бурение с комплексом геолого-геохимических работ и геофизических исследований в скважинах. В этом случае результатом работ должно стать выделение участков размером от нескольких десятков до нескольких сотен квадратных километров, перспективных на обнаружение рудных объектов. Такие участки, при положительных результатах заверочных работ могут быть привлекательны с точки зрения частных инвестиций в поисковые геологоразведочные работы.

1. Волков А.В. Новые подходы к прогнозированию крупных месторождений стратегических металлов // VM-Novitates, т. 17, № 1, 2023, стр. 22-28. https://doi.org/10.31343/1029-7812-17-1-22-28
2. Стерлигов Б.В., Гумье Ш., Барбазон Л. Методика количественной оценки приуроченности рудных месторождений к геологическим объектам // В сб.: Россия - Франция: Геология без границ. Москва, 2015. С. 78-87.
3. Стружков С.Ф., Константинов М.М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // М.: Научный мир, 2005. 320 с.
4. Тихоцкий С. А. Актуальные направления развития геофизики в целях достижения технологического суверенитета России // Вестник Российской академии наук, 2024. Т. 94, № 10, С. 859–870.
5. Тихоцкий С.А. Размещение крупных и суперкрупных месторождений минерального сырья в аномальных гравитационном и магнитном полях Земли в планетарном масштабе // Крупные и суперкрупные месторождения полезных ископаемых. В трех томах. Т. 1. Глобальные закономерности размещения. Гл. Ред. Д.В. Рундквист / М. ИГЕМ РАН, 2006, стр. 149-176.
6. Черкасов С.В. Основные элементы глубинного строения Северо-Енисейского и Гонжинского золоторудных районов и региональные критерии прогноза на золото.

Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук. М., ЦНИГРИ, 2000.
7. Черкасов С.В. О возможности картирования транскоровых палеосистем тепломассопереноса с целью прогноза крупных рудных объектов // Крупные и суперкрупные месторождения полезных ископаемых. В трех томах. Т. 1. Глобальные закономерности размещения. Гл. Ред. Д.В. Рундквист / М. ИГЕМ РАН, 2006, стр. 337-359.
8. Черкасов С.В. Новая парадигма прогноза рудных месторождений. Сборник тезисов. XXII Менделеевский конгресс. Т. 5, 2024. Стр. 134.
9. Черкасов С.В., Ткачев А.В., Арбузова Е.Е., Н.А. Вишневская, Б.В. Стерлигов. Геологический отчет «Разработать методические рекомендации по прогнозу погребенных крупных рудных объектов в обрамлениях кристаллических щитов. Отчет о НИР по госконтракту № АМ-02-43/16, дополнительным соглашениям №№ 1, 2, 3, 4 по базовому проекту 7.4-08/06.» / ГГМ РАН, Росгеолфонд, инв. № 4926442008, 2008. 384 с.

*Prospects for Identifying Areas Favorable for the Discovery of Ore Deposits Based on Geophysical Studies of Paleosystems of Heat and Mass Transfer

Tikhotsky S.A.[1], Cherkasov S.V.[2]
[1]IPE RAS; [2]SGM RAS

One of the most pressing challenges in ore prospecting geology is the prediction of ore deposits, or, in other words, the identification of new areas suitable for mineral exploration.

Most easily accessible deposits located at or near the surface have already been discovered, and the delineation of new promising territories can no longer rely solely on traditional geological methods. In the context of modern predictive modeling, geophysical methods take the lead, offering the capability to map crustal features that are indicative of zones with anomalous concentrations of ore-forming components.

The spatial association of ore deposits with anomalies in potential geophysical fields has attracted researchers' attention since geophysical and satellite data became available on a continental or global scale (Tikhotsky, 2006). Uniform spatial data coverage is essential both for analyzing these associations and for subsequent predictive modeling. This requirement is met by:

-satellite survey data, including the geoid model, available for nearly the entire Earth's surface;

-gravimetric and magnetometric datasets at 1:200,000 scale or smaller, and compiled coverages at 1:1,000,000 scale for the territory of the Russian Federation.

It is obvious that anomalies detectable at such scales are generally not directly related to ore deposits—exceptions like the Kursk Magnetic Anomaly notwithstanding. However, predictive criteria may include crustal features associated with ore-forming processes, whose scale and physical properties produce anomalies visible at this level of coverage. These features are primarily linked to the energy of ore formation processes (Volkov, 2023; Cherkasov, 2024).

A large proportion of ore deposits result from material redistribution within the Earth's crust, requiring sufficiently contrasting pressure–temperature (P–T) conditions to sustain long-term fluid migration that leaches and transports ore-forming components to discharge zones. These discharge zones usually coincide with areas of abrupt changes in P–T conditions. Importantly, deposit formation is not a goal of these natural processes, but rather a byproduct. The processes that drive ore formation affect large crustal volumes, altering their physical properties. Consequently, long-term juxtaposition of crustal blocks under different P–T regimes leads to contrasts in physical properties that may persist to the present and be sufficiently pronounced to be detectable by geophysical methods.

Discharge zones represent only one element of the paleosystem of heat and mass transfer, which channels energy from deeper crustal or mantle sources. Other elements of such systems may also be preserved in the crust, as long-term thermal effects alter or homogenize the physical properties of the affected rocks. Geophysical methods can identify such features as zones of seismic transparency and crustal-scale density anomalies (Cherkasov, 2006). Seismic transparency zones were first recognized on seismic profiles from deep seismic sounding (DSS) transects (Cherkasov, 2000), and later applied by TSNIGRI specialists using data from profile 2-DV (CMPW, MCS-OGT) to substantiate the existence of deep-seated, multi-tiered ore–magmatic systems (Struzhkov, Konstantinov, 2005).

The theory of transcrustal paleosystems of heat and mass transfer has been employed to predict large and giant ore deposits in the margins of crystalline shields (Cherkasov et al., 2008). Based on this work, 28 predictive maps were generated for ten types of ore deposits in the Anabar, Baltic, Aldan–Stanovoy shields and the Yenisei Ridge. The delineated prospective areas range from 4×7 km to 12×25 km in size—dimensions appropriate for initiating early-stage exploration.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Later, B.V. Sterligov developed a quantitative method to assess the spatial association of ore objects with elements of the Earth's crustal structure and potential geophysical fields, which significantly refined predictive results for the Yenisei Ridge.

At present, it seems appropriate to establish a scientific group (e.g., a laboratory) dedicated to predicting concealed ore bodies based on reinterpretation of geological and geophysical data, with a focus on mapping transcrustal heat and mass transfer systems as sources of energy driving the formation of endogenous deposits. This is particularly relevant for territories with sedimentary cover thicknesses up to 1,500 meters.

Interpretation methods should combine classical approaches to integrated geological–geophysical data analysis—including inverse problem-solving and 3D geological modeling—with advanced developments in machine learning (Tikhotsky, 2024). An essential component of the methodology must be selective verification drilling accompanied by a comprehensive suite of geological, geochemical, and geophysical studies in boreholes.

The expected outcome of such work would be the delineation of prospective areas ranging from several tens to several hundreds of square kilometers, suitable for ore discovery. Upon positive verification results, these areas could become attractive targets for private investment in mineral exploration.

1. Volkov A.V. New approaches to forecasting large deposits of strategic metals // VM-Novitates. 2023. Vol. 17. No. 1. P. 22–28. https://doi.org/10.31343/1029-7812-17-1-22-28
2. Sterligov B.V., Gumyé Sh., Barbazon L. Method for quantitative assessment of ore deposit association with geological structures // In: Russia–France: Geology Without Borders. Moscow, 2015. P. 78–87.
3. Struzhkov S.F., Konstantinov M.M. Metallogeny of gold and silver in the Okhotsk–Chukotka Volcanic Belt. Moscow: Nauchny Mir, 2005. 320 p.
4. Tikhotsky S.A. Current directions in geophysics for achieving Russia's technological sovereignty // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2024. Vol. 94. No. 10. P. 859–870.
5. Tikhotsky S.A. Distribution of large and supergiant mineral deposits in the Earth's gravity and magnetic fields on a planetary scale // In: Large and Supergiant Mineral Deposits. Vol. 1. Global Patterns. Ed. D.V. Rundkvist. Moscow: IGEM RAS, 2006. P. 149–176.
6. Cherkasov S.V. Deep structure elements of the North Yenisei and Gonjinsky gold districts and regional prediction criteria for gold. Author's abstract of candidate thesis. Moscow: TSNIGRI, 2000.
7. Cherkasov S.V. On the possibility of mapping transcrustal heat and mass transfer paleosystems for predicting large ore deposits // In: Large and Supergiant Mineral Deposits. Vol. 1. Global Patterns. Ed. D.V. Rundkvist. Moscow: IGEM RAS, 2006. P. 337–359.
8. Cherkasov S.V. A new paradigm for ore deposit prediction. Abstract Volume. XXII Mendeleev Congress. Vol. 5, 2024. P. 134.
9. Cherkasov S.V., Tkachev A.V., Arbuzova E.E., Vishnevskaya N.A., Sterligov B.V. Geological report: "Development of methodological recommendations for predicting buried large ore bodies in the margins of crystalline shields." R&D report under state contract No. AM-02-43/16 and supplementary agreements Nos. 1–4 under project 7.4-08/06. GIMG RAS, Rosgeolfond, inv. No. 4926442008, 2008. 384 p.

Металлогеническая модель благородного оруденения фанерозоя Северного Кавказа

Черкашин В.И.[2], Рябов Г.В[1,2], Исаева Н.А.[2]
[1]Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Россия, г. Новочеркасск, georg.riabov@yandex.ru; [2]Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Россия, г. Махачкала, dangeo@mail.ru

Аннотация: Исследования благородных металлов, планомерно начатые авторами под руководством И.А. Богуша с началом нынешнего столетия, охватили весь рудоносный Северный Кавказ и прежде всего зону Передового хребта. Работы регулярно проводились в Урупо-Лабинском рудном районе, известном россыпным золотом и находками платины. Одновременно осуществлялись поисковые работы в Северном Приэльбрусье (Худес-Чучкурский рудный узел). По этим территориям у авторов накопился обширный как собственный полевой материал, так и предшествующих работ по геологическому, минералогическому и геохимическому картированию (масштабы 1:10000-1:2000), изучению медноколчеданных месторождений и рудной нагрузки Северного Кавказа.

Работы по благородным металлам начинались с исследования региональной полосы углеродсодержащих черных сланцев девона, аналоги которых содержат мировые гигантские месторождения благородных металлов. Черные сланцы Кавказа впервые были детально охарактеризованы авторами литологически, петрографически, минералогически и геохимически. Новым для Кавказа было площадное обзорное геохимическое исследование по выявлению благородных металлов, проведенное авторами и показавшее аномальную региональную зараженность металлами (Au, Pt, Pd) 200-километровой полосы черных сланцев. Для выяснения первичного источника металлов были изучены серпентинитовые массивы Северного Кавказа в полосе протяженностью более 300 км. Прослеживание благороднометалльного оруденения было продолжено в осадочных юрских толщах Кубань-Малкинской территории. Собранный материал авторами постоянно анализируется и обогащается новыми фактами, что привело в итоге к разработке первой металлометрической модели рудогенеза благородных металлов и выделению Северного Кавказа в качестве новой провинции благородных металлов (рис. 1).

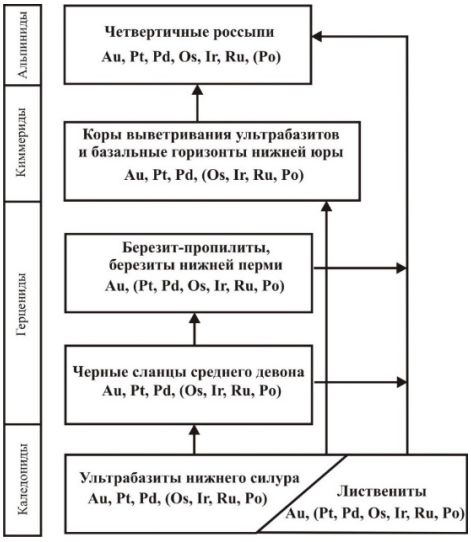


Рис. 1. Металлогеническая модель благородных металлов Северного Кавказа в фанерозое (в скобках указаны металлы неопробованные, т.е. предполагаемые, но обнаруженные в современных аллювиальных отложениях).

В описываемой металлогенической модели впервые указываются первичные источники оруденения для конкретных рудных объектов. Предлагаемая модель существенно дополнена

поисковыми критериями и рекомендациями для изучения конкретных проявлений благородных металлов. Спецификой методики, затрудняющей изучения минералогии благородных металлов, является их физическая размерность - отсутствие макроскопических форм минералов при тонкодисперсности их микроскопических форм. По этой причине благородные металлы визуально не фиксируются, а изучение их может быть проведено только геохимическим путем с применением особо точных методов спектрометрии.

Специфичными новыми положениями рудогенеза благородных металлов для металлогенической модели Северного Кавказа являются следующие геологические факты:

1. Непрерывный, унаследованный процесс рудообразования на протяжении всего фанерозоя, при общем первичном каледонском ультрабазитовом источнике металлов (Au+МПГ). Каждый последующий этап рудообразования содержит материал и предпосылки для рудообразования в последующих этапах, подчеркивая непрерывность и переходность рудообразования. Минералогический, геохимический, тектономагматический, онтогенический подходы к изучению рудного процесса и геологические обобщения позволяют проследить связь и изменения рудного процесса на протяжении каледонского, герцинского, киммерийского и альпийского геологических этапов.

2. Исторически рудогенные процессы заметно отличаются в палеозойский (каледониды, герциниды) от мезо-кайнозойский (киммериды, альпиды) периоды. Палеозойские события зарождения и трансформации рудных металлов и вмещающих пород обусловлены высоко энергетическими эндогенными процессами (магматизм, вулканизм, метаморфизм зеленокаменной фации). Мезо-кайнозойские процессы рудогенеза не связаны с магматизмом, резко изменяются в сторону экзогенных: седиментация, выветривание, перенос, переотложение терригенного материала.

3. Устойчивая ассоциативная связь двух групп благородных металлов Au – МПГ. Равные пропорции содержания Au, Pt, Pd в исходной рудной аномалии и в различных фациальных и генетических типах аномалий благородных металлов, в среднем составляя в сумме содержание металлов около1,0 г/т. При дополнительных наложенных золоторудных источниках на графиках появляются новые точки разброса металлов на фоне первичной группировки их показателей.

Главная генетическая информация по вопросам типизации рудогенеза благородных металлов наглядно отражена на поисково-генетической рудной модели района Беденского ультрабазитового массива (Богуш и др., 2016; Богуш и др., 2020). Она включает следующие основные положения:

- по периферии массива выделен в минеральной форме в россыпях современного аллювия полный набор ассоциации металлов (Au, МПГ), свидетельствующий о присутствии комплекса благородных металлов на Северном Кавказе (Богуш и др., 2016);

- в серпентинитах Беденского массива выделен и доказан первичный базитовый источник рудообразования благородных металлов для всего фанерозоя Северного Кавказа (Богуш и др., 20211);

- юрская кора выветривания ультрабазитов Беденского массива определила выделение нового типа оруденения благородных металлов – рудных кор выветривания ультрабазитов (Богуш и др., 20212). Коры выветривания и продукты их разрушения образуют субпромышленные крупные аномалиии Au, Pt, Pd с содержаниями в сумме металлов до 1,5-2,0 г/т;

- герцинские девонские углеродсодержащие черносланцевые толщи Передового хребта (Богуш и др., 20211) дали возможность детально изучить крупнейшие сланцевые продуктивные комплексы Кавказа, обосновать их металлоносность, условия образования и выявить тождество мировым продуктивным черносланцевым формациям.

В Худесс–Чучкурском рудном районе получены данные о позднегерцинском рудогенезе, подтвержденные разведкой крупного Чучкурского месторождения промышленных благородных металлов (Богуш и др., 2020).

Дополнительным источником благородных металлов послужили руды герцинских медноколчеданных золоторудных месторождений гидротермально-осадочного генезиса, которые показали, наряду с промышленным золотом, присутствие примесной (0,2 г/т) платины в медных колчеданных рудах. Эта минерализация связана с базальтоидными девонскими комплексами офиолитовой формации и по геологическим показателям не обнаруживает связи с ультрабазитовым источником основных масс благородных металлов Кавказа.

В мезозойских осадочных юрских толщах Кубань-Малкинского района, наряду с рудоносными корами выветривания, выделены благородные металлы в продуктах разрушения и переотложения первичных коровых рудоносных осадков (Богуш и др., 20212).

Приведенные геологические факты рудогенеза благородных металлов Северного Кавказа, наряду с установлением его особенностей, представляют большой интерес в глобальной проблеме происхождения металлов. Генетическая модель черносланцевого оруденения благородными металлами в настоящее время относится к наиболее сложным и дискуссионным теоретическим построениям в рудной геологии (Додин и др., 2000; Константинов, 1984). Согласно общепринятым представлениям рудогенез благородных металлов черных сланцев относится к сложному многоэтапному процессу, что позволяет определить его как эндогенно-экзогенный, длительностью до целых геотектонических эпох (Парада, 2017). Модель заключает целый ряд событий от дисперсного рассеивания металлов до их сепарации и собирательной кристаллизации. В формировании рудных аномалий и месторождений благородных металлов последовательно выступают магматогенные экзогенные и седиментогенных факторы. Завершает процесс метасоматоз, как минимум, зеленосланцевого уровня. Именно такие реперные события проявляются при формировании благородных металлов Северного Кавказа. Суть их следующая:

1. Всякое изучение рудного вещества сталкивается с вопросом его происхождения - мантийный? поверхностный? Геологический материал по благородным металлам Северного Кавказа указывает на их глубинный магматический базальтовый источник с последующим перемещением рудного вещества в тектоно-магматические эпохи через промежуточные вторичные источники с его обогащением и формированием аномальных скоплений.

2. Для рудоносных черносланцевых толщ очень важный вопрос заключается в аллогенном (привнесенном) или аутигенном (местном) характере рудного вещества? В черных сланцах Северного Кавказа источник рудного вещества аутигенный, связанный с процессом накопления рудовмещающих толщ.

3. Какова природа первичной дисперсности рудных минералов? По материалам минералогических исследований авторов, для минералов благородных металлов Северного Кавказа типоморфна первичная тонкозернистая размерность. Диспергация зерен благородных металлов дальше увеличивается до молекулярной сорбционной при рассеивании и седиментации рудного материала в форме глинистых минералов, переработанных в гидрослюды при последующем региональном метаморфизме. Постметаморфические процессы сопровождались ростом зерен, сепарацией и собирательной кристаллизацией, особенно при наложении гидротермальных процессов.

Вышеизложенные материалы и факты позволили впервые создать металлометрическую прогнозно-поисковую модель группы благородных металлов (Au+МПГ) Северного Кавказа. Модель создана авторами на основе принципов исторического, онтогенического, фациального и вещественного подхода к изучению благородных металлов, комплекс которых ранее на Кавказе не рассматривался. Главной целью проведенных авторами исследований является доказательство наличия на Северном Кавказе потенциально промышленного оруденения благородных металлов. Многочисленные находки геохимических аномалий, зоны минерализации, рудопроявления и месторождения показали наличие потенциально промышленных металлов на Северном Кавказе в масштабах новой рудной провинции. Приведенная металлогеническая модель (рис.1) определяет общие направления поисков благородных металлов на Северном Кавказе. Конкретные указания и рекомендации

поискового характера содержатся в серии ранее опубликованных статей авторов, дающих описание, генетическую типизацию и поисковые критерии. К сожалению, из более 40 работ авторов по этой тематике в нынешней статье упомянуто только 8 публикаций.

Считаем, что главное богатство благородных металлов Северного Кавказа сосредоточено в углеродсодержащей девонской черносланцевой толще, аналоге мировых продуктивных толщ (Богуш и др., 2020). При протяженности сланцевой полосы в 200 км, мощности 1500 м, ширине 0,5-10 км и среднем содержании суммы металлов (Au, Pt, Pd) в 1 г/т общие запасы благородных металлов неисчерпаемы. Ближайшим аналогом оруденения черных сланцев Кавказа является гигантское месторождение Сухой Лог. Практически вся полоса черных сланцев представлена геохимической аномалией металлов, при невыясненном до сих пор характере ее зональности и наличии многочисленных обогащенных рудных участков. Черные сланцы на Чучкурском месторождении участвуют в рудном процессе и содержат промышленное оруденение (Богуш и др., 2020).

1. Богуш И.А., Черкашин В.И., Рябов Г.В., Абдуллаев М.Ш. Новый тип оруденения благородных металлов на Северном Кавказе // ДАН. 2016. Т.466. № 2. С. 193-195.
2. Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И. Генезис и рудоносные структуры Чучкурского месторождения благородных металлов Северного Кавказа // Геология и геофизика Юга России. № 10(1). 2020. С. 81-95.
3. Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И., Исаева Н.А. Ультрабазиты и источники благородных металлов (Au, Pt, Pd) на Северном Кавказе // Геология и геофизика Юга России. Т. 11, № 4. 2021. С.15-29.
4. Богуш И.А., Рябов Г.В., Черкашин В.И. Юрская кора выветривания и источники благородных металлов в черных сланцах Северного Кавказа // Россыпи и месторождения кор выветривания XX1 века: задачи, проблемы, решение. Воронеж. 2021. С. 147-149.
5. Додин Д.А., Савицкий А.В. Платиноносные углеродсодержащие формации в геологической истории // Углеродсодержащие формации в геологической истории. Петрозаводск. 2000. С. 167-178.
6. Константинов М.М. Генетические системы золоторудных месторождений //Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. №3. С. 696–699.
7. Парада С.Г. Предпосылки и признаки платиноносности гипербазитовых массивов Северного Кавказа // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 1. С. 59-73.

*Metallogenic Model of Phanerozoic Noble Metal Mineralization in the North Caucasus

Cherkashin V.I.[2], Ryabov G.V.[1,2], Isaeva N.A.[2]
[1]South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russia, georg.riabov@yandex.ru; [2]Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; dangeo@mail.ru

Abstract:

Research on noble metals, systematically initiated by the authors under the guidance of I.A. Bogush at the beginning of the current century, has encompassed the entire ore-bearing North Caucasus, with particular emphasis on the Fore Range Zone. Fieldwork has been regularly conducted in the Urup-Labinsk ore district, known for placer gold and platinum occurrences. Simultaneously, exploration has been carried out in the Northern Elbrus region (Khudes-Chuchkur ore cluster). The authors have accumulated extensive field material on these territories, both their own and from previous works on geological, mineralogical and geochemical mapping (scales 1:10000-1:2000), the study of copper pyrite deposits and the ore load of the North Caucasus.

The noble metal research began with studies of a regional belt of Devonian carbonaceous black shales—analogous to globally significant noble metal-bearing formations. These black shales were, for the first time in the Caucasus, characterized in detail lithologically, petrographically, mineralogically, and geochemically by the authors. A novel contribution to Caucasian geology was the regional geochemical survey targeting noble metals, which revealed anomalously high concentrations of Au, Pt, and Pd over a 200 km belt of black shales. To determine the primary source of these metals, serpentinite massifs over a 300 km stretch of the North Caucasus were examined. The noble metal mineralization was further traced into Jurassic sedimentary successions in the Kuban-Malkinsky region.

The continuously expanding data set has led to the development of the first metallometric model of noble metal ore genesis and the designation of the North Caucasus as a new noble metal province (Fig. 1).

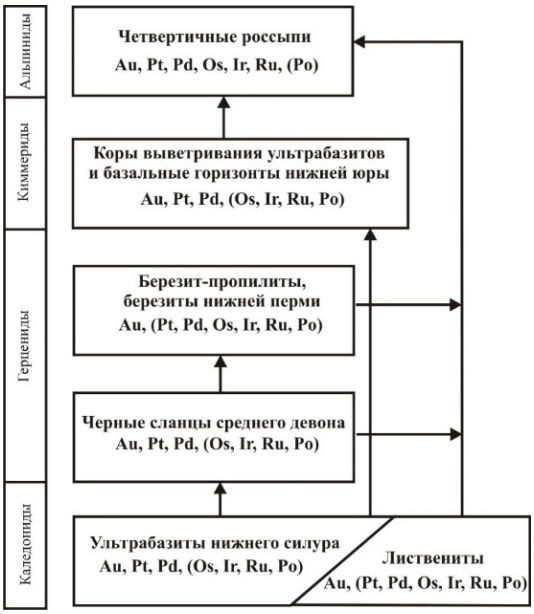


Fig. 1. Metallogenic model of noble metal (Au, PGE) mineralization in the North Caucasus during the Phanerozoic. (Unassayed metals shown in parentheses—i.e., inferred from modern alluvial deposits)

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

The presented metallogenic model identifies for the first time the primary sources of mineralization for specific ore objects. The model is significantly enhanced by exploration criteria and recommendations for studying specific occurrences. A methodological challenge in studying noble metals lies in their physical size: the absence of macroscopic mineral forms and the predominance of fine-grained microscopic particles. As such, noble metals cannot be visually detected and must be studied geochemically using high-precision spectrometric techniques.

The metallogenic model of the North Caucasus includes several specific geological features related to noble metal ore genesis:

Continuous, inherited ore-forming process throughout the Phanerozoic, originating from a common Caledonian ultrabasic metal source (Au + PGE). Each subsequent mineralization stage incorporates material and preconditions from previous stages, emphasizing the continuity and transitional nature of ore genesis. Mineralogical, geochemical, tectonomagmatic, and ontogenetic approaches reveal interrelations across the Caledonian, Hercynian, Cimmerian, and Alpine stages.

Temporal and genetic differences in ore genesis between the Paleozoic (Caledonian, Hercynian) and Meso-Cenozoic (Cimmerian, Alpine) periods. Paleozoic metallogenesis was driven by high-energy endogenous processes—magmatism, volcanism, and greenschist-facies metamorphism. In contrast, Meso-Cenozoic processes were dominantly exogenous—sedimentation, weathering, reworking, and redeposition of terrigenous material.

Stable associative relationship between Au and PGE groups. Equal proportions of Au, Pt, and Pd in initial anomalies and various facies/genetic types of noble metal anomalies average ~1.0 g/t total content. Superimposed gold sources introduce new scatter points on metal ratio plots atop the primary clustering.

The principal genetic framework for noble metal ore genesis is exemplified in the exploration-genetic model of the Bedensky ultrabasic massif (Bogush et al., 2016, 2020), which includes:

A complete Au–PGE assemblage identified in modern alluvial placers surrounding the massif, confirming the presence of a noble metal complex in the North Caucasus (Bogush et al., 2016);

The discovery and confirmation of a primary basic metal source for Phanerozoic mineralization in the serpentinites of the Bedensky massif (Bogush et al., 2021[1]);

Jurassic weathering crusts of the Bedensky ultrabasic massif led to the recognition of a new ore type—ultrabasic weathering crust-hosted noble metal deposits (Bogush et al., 2021[2]). These crusts and their erosional products form sub-economic Au–Pt–Pd anomalies with total metal contents up to 1.5–2.0 g/t;

Devonian carbonaceous black shales of the Hercynian Fore Range allowed for a detailed study of major productive shale complexes in the Caucasus, confirming their metallogenic potential and global analogues (Bogush et al., 2021[1]).

In the Khudes–Chuchkur ore district, data support Late Hercynian ore genesis, validated by the discovery of the industrial-scale Chuchkur noble metal deposit (Bogush et al., 2020).

An additional source of precious metals were the ores of the Hercynian copper-pyrite gold deposits of hydrothermal-sedimentary genesis, which showed, along with industrial gold, the presence of impurity (0.2 g / t) platinum in copper pyrite ores. This mineralization is associated with basaltoid Devonian complexes of the ophiolite formation and, according to geological indicators, does not show a connection with the ultrabasic source of the main masses of precious metals of the Caucasus.

In the Mesozoic sedimentary Jurassic strata of the Kuban–Malkinsky area, in addition to ore-bearing weathering crusts, noble metals were found in redeposited detrital materials derived from primary weathered ores (Bogush et al., 2021[2]).

These geological facts regarding noble metal ore genesis in the North Caucasus—along with the establishment of its unique features—are of significant interest for the global understanding of metal origin. The genetic model of black shale-hosted noble metal mineralization is among the most complex and debated theoretical constructs in ore geology (Dodin et al., 2000; Konstantinov, 1984). According to prevailing views, noble metal ore genesis in black shales is a complex, multistage process that can be classified as endo–exogenic in nature and span entire geotectonic epochs (Parada,

2017). The model incorporates a sequence of events from metal dispersion, separation, and co-crystallization, driven by magmatic, exogenous, and sedimentary factors—culminating in metasomatic overprint at least at the greenschist level. These hallmark stages are clearly reflected in the formation of noble metal mineralization in the North Caucasus.

Key conclusions include:

The origin of ore-forming material—mantle-derived or surface-derived? Geological evidence from the North Caucasus points to a deep-seated magmatic basaltic source, with ore material migrating during tectonomagmatic epochs through intermediate enrichment centers, ultimately forming anomalous accumulations.

In black shale sequences, the critical question is whether the ore material is allogenic (transported) or authigenic (formed in place)? In the North Caucasus, the source is authigenic—formed concurrently with the host strata.

Regarding primary dispersion of ore minerals, mineralogical evidence shows that noble metal grains exhibit a characteristic fine-grained size. Dispersion continues down to molecular sorption levels during sedimentation, often bound in clay minerals later transformed into hydromicas during regional metamorphism. Post-metamorphic processes then promote grain growth, separation, and co-crystallization—especially under hydrothermal influence.

The data and evidence presented have led to the development of the first metallometric predictive–prospecting model for the Au + PGE noble metal group in the North Caucasus. The model is based on historical, ontogenetic, facies, and material approaches that had not previously been applied to noble metals in this region. The authors' primary goal is to demonstrate the presence of potentially industrial-scale noble metal mineralization in the North Caucasus. Numerous geochemical anomalies, mineralized zones, occurrences, and deposits confirm this potential, establishing the region as a new ore province.

The metallogenic model (Fig. 1) outlines the general exploration directions for noble metals in the North Caucasus. Specific exploration recommendations are provided in a series of previously published articles by the authors, which describe genetic classifications and exploration criteria. Unfortunately, only 8 of over 40 relevant publications are cited in this paper.

The authors believe the primary noble metal wealth of the North Caucasus is concentrated in the Devonian carbonaceous black shale sequence—an analogue of globally productive shale units (Bogush et al., 2020). With a belt length of 200 km, thickness of 1,500 m, width of 0.5–10 km, and an average combined metal content (Au, Pt, Pd) of ~1 g/t, the total noble metal reserves are immense. The closest analogue is the giant Sukhoi Log deposit. Virtually the entire shale belt constitutes a geochemical anomaly with still-unclear zonation and numerous enriched ore sites. At the Chuchkur deposit, the black shales participate in the ore-forming process and contain industrial-grade mineralization (Bogush et al., 2020).

1. Bogush I.A., Cherkashin V.I., Ryabov G.V., Abdullaev M.Sh. A new type of noble metal mineralization in the North Caucasus // Doklady Earth Sciences. 2016. Vol. 466. No. 2. P. 193–195.
2. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchkur deposit, North Caucasus // Geology and Geophysics of Southern Russia. No. 10(1). 2020. P. 81–95.
3. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Isaeva N.A. Ultrabasites and sources of noble metals (Au, Pt, Pd) in the North Caucasus // Geology and Geophysics of Southern Russia. Vol. 11. No. 4. 2021. P. 15–29.
4. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I. Jurassic weathering crusts and noble metal sources in black shales of the North Caucasus // Placer Deposits and Weathering Crust Ore Deposits of the 21st Century: Challenges and Solutions. Voronezh. 2021. P. 147–149.
5. Dodin D.A., Savitsky A.V. Platinum-bearing carbonaceous formations in geological history // In: Carbonaceous Formations in Geological History. Petrozavodsk. 2000. P. 167–178.

6. Konstantinov M.M. Genetic systems of gold ore deposits // Dokl. Acad. Sci. USSR. 1984. Vol. 275. No. 3. P. 696–699.
7. Parada S.G. Preconditions and indicators of platinum-bearing potential in hyperbasite massifs of the North Caucasus // Science of the South of Russia. 2017. Vol. 13. No. 1. P. 59–73.

Гидрогенный уран в источниках коромантийного перехода вулканических пород позднего мезозоя и кайнозоя Азии

Чувашова И.С.[1], Рассказов С.В.[1,2], Ясныгина Т.А.[1]
[1]ИЗК СО РАН, chuvashova@crust.irk.ru; [2]ИГУ, kaf-dinamgeol@mail.ru

Мантийные породы характеризуются отношением Th/U = ~4 и Nb/U = ~47. В породах нижней континентальной коры первое отношение возрастает до 6, второе снижается до ~25. Эти отношения сохраняются в базальтовых выплавках из мантийных и коровых источников. В вулканических породах широкого возрастного диапазона позднего мезозоя и кайнозоя Тункинской долины Байкальской рифтовой системы (юг Сибири, Россия), Малого Хингана (Приамурье, юго-восток России), Большого Хингана (юго-восток Монголии), Тянь-Шаня (Кыргызстан с сопредельным Северо-Западным Китаем) и Южного Приморья (юго-восток России), однако, определяются отношения Th/U и Nb/U, существенно различающиеся с мантийными и коровыми значениями. Мы предполагаем, что аномальное повышение или снижение концентрации U относительно Th и Nb в источниках вулканических пород разных районов Азии обусловлено выносом урана из пород источников или, наоборот, его привносом. Миграция урана определяется его подвижностью в окислительных условиях – образованием уранил-иона с валентностью +6, соединение которого растворимо в воде. Элементы сравнения (Th и Nb) в воде слаборастворимы. Цель настоящего сообщения – охарактеризовать феномен Th-Nb/U аномалий в источниках вулканических пород разных районов Азии как результат гидрогенного перераспределения U в области коромантийного перехода (КМП).

Существенные отклонения отношений Nb/U и Th/U в источниках КМП от значений этих отношений мантии и коры выявляется в нижне-среднемиоценовых базальтах Камарско-Становой зоны горячей транстенсии восточной части Тункинской рифтовой долины. Базальтовые магмы генерируются в гранатсодержащем и безгранатовом слоях КМП с вариациями отношения Th/U от 2 до 10 и отношения Nb/U от 25 до 110. Большинство пород имеет Nb/U и Th/U отношения ниже мантийных (обогащены ураном) и только редкие породы превышают мантийные значения (обеднены ураном) (Rasskazov et al., 2021).

В Малом Хингане в раннем миоцене извергаются андезиты и андезибазальты, обедненные ураном на Архаринском и в центральной части Удурчуканского вулканических полей. По субширотному профилю между 49°01' и 49° 19' с.ш. от 130° 11' до 131°10' в.д. выделяются три группы пород (рис. 1). Высокие (La/Yb)n в лавах обусловлены присутствием в источнике граната, низкие – его отсутствием, промежуточные – гранат-шпинелевым составом источника. Источник высококалиевых лав группы 1 располагается на большей глубине, чем умереннокалиевых лав группы 2, а источник группы 3 занимает промежуточный глубинный уровень. Глубинный источник существенно отличается от менее глубинных источников по распределению урана. В лавах группы 1 определяется отношение Th/U = 4.6–5.9 (в образце ПО-3 – 6.6), группы 2 – 3.7–15.9 (в подгруппах А – 3.7–4.0, Б – 5.4–5.9, В – 6.6–7.4, Г – 9.0–15.9), группы 3 – 7.9–13.2. Соответственно, в группе 1 значение Nb/U находится в интервале 33–56 (в образце ПО-3 – 76.9), в группе 2 – в интервале 41–176 (в подгруппах: А – 41–50, Б – 44–50, В – 45–67, Г – 111–176), в группе 3 – в интервале 84–179. В расплавах из глубинного источника пород группы 1 концентрация урана не отличается от концентрации в мантийных породах (Th/U = ~4, Nb/U = ~47), а в менее глубинных источниках пород групп 2 и 3 – частично близки или соответствуют по концентрациям этого элемента в мантии (подгруппы А, Б и В группы 2), а частично обнаруживают резко выраженное обеднение ураном (подгруппа Г группы 2, группа 3). Геохимические характеристики, подобные характеристикам мантии, проявлены на глубинном и малоглубинном уровнях в центральной части рассматриваемой территории, а характеристики с аномальным обеднением ураном – в ее западной и восточной частях.

В западных отрогах Большого Хингана, на востоке Монголии, изучен разрез вулканического покрова по профилю в направлении с юго-востока на северо-запад через

долину р. Нумрэгин-Гол (координаты окончаний профиля: 46°56.916’ с.ш., 119°26.338’ в.д.; 47°01.844’ с.ш., 119°22.658’ в.д.). Толща сложена андезибазальтами, разделяющимися по химическому составу на два пакета. Мощность нижнего пакета в обнажениях составляет до 80 м, верхнего – до 50 м. Верхний пакет занимает неровности рельефа, выработанного в породах нижнего пакета. Концентрации K_2O варьируют в лавах нижнего пакета в интервале 0.26–0.34 мас. % и слегка повышаются (до интервала 0.46–0.51 мас. %) во включениях стекол. В породах верхнего пакета концентрация K_2O возрастает до интервала 0.58–0.91 мас. %. По интервалу отношения Th/U = 4.0–5.5 андезибазальты верхнего пакета сопоставляются с породами подгруппы А группы 2 Малого Хингана. В андезибазальтах нижнего пакета отношение Th/U снижается до интервала 2–3 вследствие относительного возрастания концентрации U в источнике.

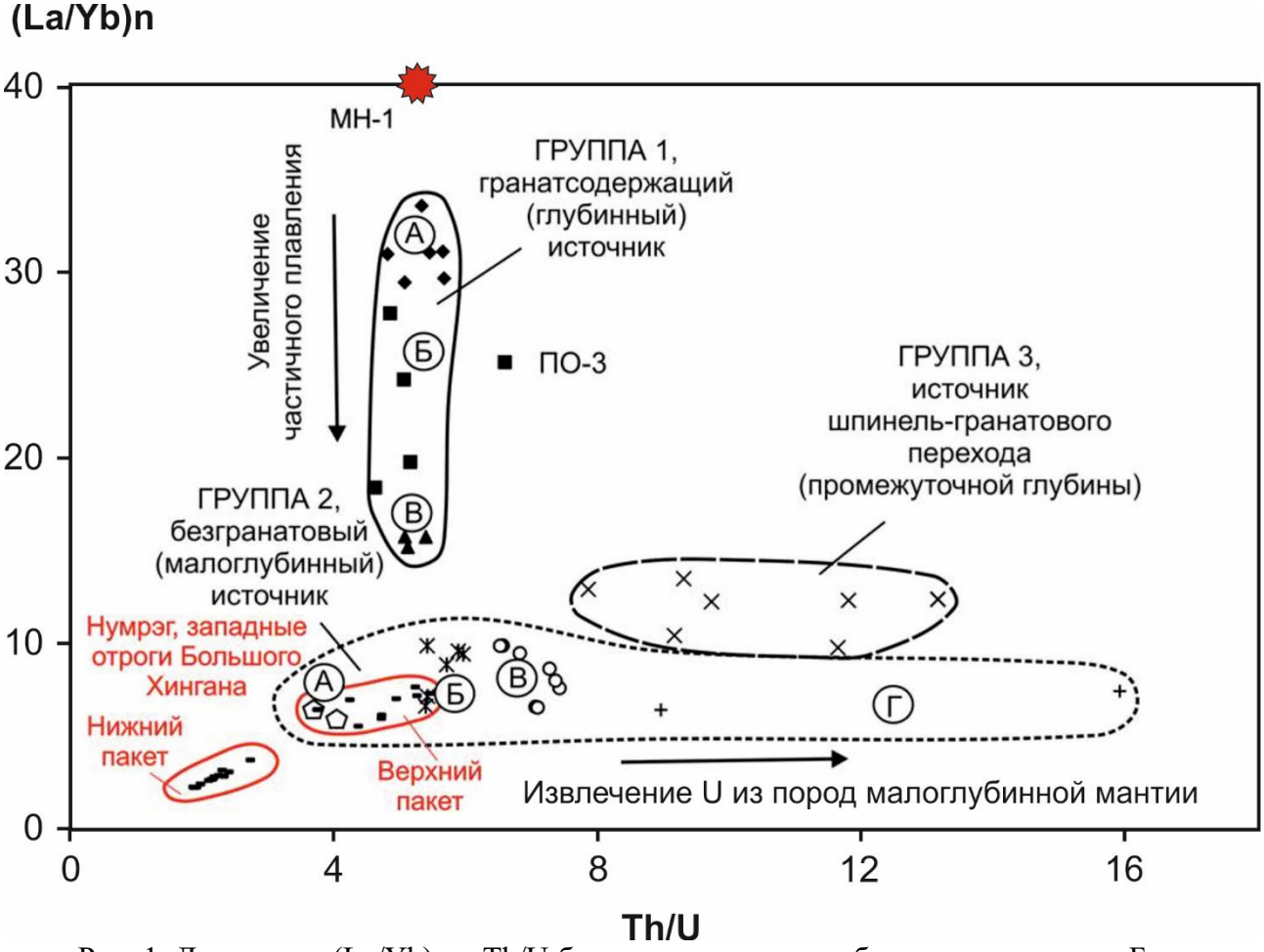


Рис. 1. Диаграмма (La/Yb)n – Th/U базальтов из разноглубинных источников Большого и Малого Хингана. 1–3 – группы: 1 – высококалиевые трахиандезибазальты и трахиандезиты, подгруппы А и Б (K_2O = 2,7–3,4 мас.%, $(La/Yb)_{NPM}$ = 18,3–33,5), сочетающиеся с трахиандезибазальтами и андезибазальтами подгруппы В (K_2O = 1,9–2,5 мас.%, (La/Yb)n = 15,1–15,7); 2 – умереннокалиевые андезибазальты и андезиты подгрупп А–Г (K_2O = 0,9–2,1 мас.%, (La/Yb)n = 5,3–9,8); 3 – умереннокалиевые андезибазальты (K_2O = 1,4–1,8 мас.%, (La/Yb)n = 9,7–13,4). МН-1 – калиевая щелочная порода вулкана Мухенаншан (поле Келуо) (Zhang et al., 1995). Буквами в кружках А,Б,В,Г обозначены различные значки подгрупп, образующих тренды отношений элементов. (La/Yb)n – нормирование к пиролиту (McDonough, Sun, 1995).

Распределение U резко различается в мел-палеогеновых вулканических и субвулканических породах на территориях Северного и Южного Тянь-Шаня (рис. 2). Вариации Th/U и Nb/U в целом согласуются между собой и обусловлены относительным

снижением концентрации U в субстрате магматических источников под Южным Тянь-Шанем и ее повышением – под Северным Тянь-Шанем. В группе базальтов-трахибазальтов Северного Тянь-Шаня отношение Nb/U снижается до интервала 2.2–16.5, а среди базанитов Южного Тянь-Шаня выделяются составы с этим отношением в интервале 80–167. Принимая маркирующее значение урана для источников базанитов Южного Тянь-Шань и базальтов-трахибазальтов Северного Тянь-Шаня, отметим, что первая группа пород является производной малоглубинных шпинелевых перидотитов, вторая – области перехода от мантии к породам типичной коры. Коровый источник обогащается ураном с его комплементарным обеднением в малоглубинном перидотитовом источнике. Здесь вероятен сценарий развития процессов геохимического оформления субстратов КМП с выносом и привносом урана при позднепалеозойском закрытии Туркестанского палеоокеана.

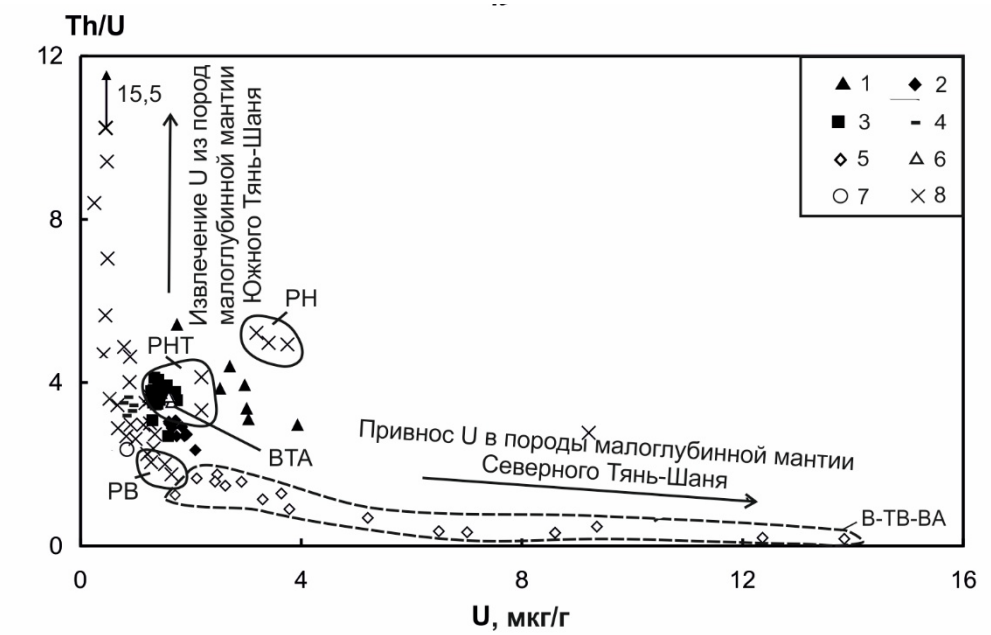


Рис. 2. Диаграмма Th/U — U мел-палеогеновых вулканических и субвулканических пород Тянь-Шаня. 1–6 – породы Северного Тянь-Шаня: 1 – базаниты–фоидиты Кенкол, 2 – базаниты Учкудук, 3 – базаниты Каратоюн, Каргон и Кастек, 4 – трахибазальты Ташкумыр, 5 – базальты и трахибазальты Сулутерек, Байламтал и Торайгыр, 6 – андезибазальты Тоссор; 7–8 — породы Южного Тянь-Шаня: 7 – низко-Ti базальт Текелик, 8 – серия пикробазальт–фонолит впадины Туюн. На диаграммах выделены фигуративные поля групп пород и отдельные составы: Северный Тянь-Шань: В-ТВ-ВА – базальты–трахибазальты–андезибазальты, ВТА – трахиандезибазальты; Южный Тянь-Шань: РВ — пикробазальты, РНТ – фонотефриты, РН – фонолиты. Использованы данные авторов с привлечением химических анализов из работ (Sobel, Arnaud, 2000; Ji et al., 2006; Han et al., 2008).

В Южном Приморье, на Находкинском вулканическом поле, миоценовые базальты содержат компоненты мантийного и корового материала. Мантийный компонент М с характеристикой, подобной мантии типа OIB (Th/U = 4, Ce/Pb = 25), находится в начале тренда извлечения U из пород мантии с относительным возрастанием Th/U отношения до 20 и снижением отношения Ce/Pb до 10. Коровый компонент К (Th/U = 3–4, Ce/Pb = 2) находится в начале тренда извлечения U из пород коры с относительным возрастанием Th/U и Ce/Pb отношений до 10 (Рассказов и др., 2003).

Мы приходим к выводу о том, что аномальное гидрогенное обогащение и/или обеднение U относительно Th и Nb в источниках вулканических пород позднего мезозоя и кайнозоя разных районов Азии характерно в целом для области КМП. В глубокой (гранатсодержащей) части мантии флюиды имеют восстановленный характер, поэтому уран не извлекается из

пород магматических источников. Благодаря мобилизации урана из области КМП могут формироваться месторождения этого металла в вышележащей континентальной коре.

1. Рассказов С.В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чащин А.А., Максимов С.О., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская М.Н., Коваленко С.В. Развитие позднекайнозойского магматизма активной континентальной окраины Южного Приморья // Тихоокеанская геология. 2003. № 1. С. 92–109.
2. Ji J.Q., Han B.E, Zhu M.E, Chu Z.Y., Liu Y.L. Cretaceous-Paleogene alkaline magmatism in Tuyon basin, southwest Tianshan mountains: geochronology, petrology and geochemistry // Acta Petrologica Sinica. 2006. V. 22, N 5. P. 1324–1340.
3. Han B-f., Liu J-b., Zhang L. A noncognate relationship between megacrysts and host basalts from the Tuoyun basin, Chinese Tian Shan // Journ. Geol. 2008. V. 116. P. 499–509.
1. McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.
4. Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // Minerals. 2021. V. 11, N 5. P. 487.
5. Sobel E.R., Arnaud N. Cretaceous - Paleogene basaltic rocks of the Tuyon basin, NW China and the Kirgiz Tian Shan: the trace of a small plume // Lithos. 2000. V. 50. P. 191–215.
6. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Eds. A.D. Sounders, M.J. Norry. Magmatism in the ocean basins. Geological Society Special Publication. 1989. № 42. P. 313–345.
7. Zhang M., Suddaby P., Thompson R.N. et al. Potassic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle source and magma genesis // J. Petrology. 1995. Vol. 36, No. 5. P. 1275–1303.

*Hydrogenic Uranium in Sources of the Crust-Mantle Transition of Late Mesozoic and Cenozoic Volcanic Rocks in Asia

Chuvashova I.S.[1], Rasskazov S.V.[1,2], Yasnygina T.A.[1]
[1]Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, chuvashova@crust.irk.ru; [2]Irkutsk State University, kaf-dinamgeol@mail.ru

Mantle rocks are characterized by Th/U ≈ 4 and Nb/U ≈ 47. In lower continental crustal rocks, the first ratio increases to about 6, while the second decreases to ~25. These ratios persist in basaltic melts derived from mantle and crustal sources. However, in volcanic rocks of a wide age range from the Late Mesozoic to the Cenozoic in the Tunkin Basin of the Baikal Rift System (southern Siberia, Russia), the Lesser Khingan (Amur Region, southeastern Russia), the Greater Khingan (southeastern Mongolia), the Tien Shan (Kyrgyzstan and adjacent northwestern China), and Southern Primorye (southeastern Russia), the Th/U and Nb/U ratios differ significantly from mantle and crustal values. We propose that the anomalous enrichment or depletion of U relative to Th and Nb in the sources of volcanic rocks from different regions of Asia is the result of uranium removal from, or addition to, source rocks. Uranium migration is facilitated by its mobility under oxidizing conditions, forming the water-soluble uranyl ion (U^{6+}), while comparison elements (Th and Nb) are poorly soluble in water. The aim of this paper is to characterize the phenomenon of Th–Nb/U anomalies in volcanic rock sources of various Asian regions as a result of hydrogenic redistribution of U in the crust-mantle transition zone (CMTZ).

Significant deviations in Nb/U and Th/U ratios in CMTZ sources from typical mantle and crust values are observed in the Lower–Middle Miocene basalts of the Kamarsko-Stanovoy transtensional zone in the eastern Tunkin Rift Basin. These basaltic magmas were generated from garnet-bearing and garnet-free layers of the CMTZ, showing Th/U values ranging from 2 to 10 and Nb/U from 25 to 110. Most of these rocks exhibit Nb/U and Th/U ratios below mantle values (U-enriched), while only a few samples exceed them (U-depleted) (Rasskazov et al., 2021).

In the Lesser Khingan, Early Miocene andesites and andesibasalts are U-depleted in the Arkhara and central Udurchukan volcanic fields. Across a W–E profile from 49°01′ to 49°19′ N and from 130°11′ to 131°10′ E, three groups of rocks are distinguished (Fig. 1). High (La/Yb)n values in lavas correspond to garnet presence in the source; low values indicate its absence, and intermediate values suggest a garnet-spinel source. The high-K lavas of Group 1 originate from deeper sources than the moderate-K lavas of Group 2, with Group 3 from an intermediate depth. Uranium distribution in deep sources differs significantly from that in shallower ones. Th/U in Group 1 lavas is 4.6–5.9 (sample PO-3 = 6.6), in Group 2 – 3.7–15.9 (subgroups: A = 3.7–4.0, B = 5.4–5.9, C = 6.6–7.4, D = 9.0–15.9), and in Group 3 – 7.9–13.2. Corresponding Nb/U values are: Group 1 – 33–56 (PO-3 = 76.9); Group 2 – 41–176 (subgroups A–D: A = 41–50, B = 44–50, C = 45–67, D = 111–176); Group 3 – 84–179. In the deep-source melts of Group 1, U concentrations are similar to those in mantle rocks (Th/U ≈ 4, Nb/U ≈ 47), whereas shallower Group 2 and 3 sources show both near-mantle and strongly U-depleted characteristics. Near-mantle geochemistry occurs at central depths, while strong U depletion is seen in the western and eastern margins.

In the western Greater Khingan Range (eastern Mongolia), a volcanic section was studied along a SE–NW profile through the Numregin-Gol Valley (profile endpoints: 46°56.916′ N, 119°26.338′ E and 47°01.844′ N, 119°22.658′ E). The sequence consists of andesibasalts forming two compositional units: a lower unit up to 80 m thick and an upper unit up to 50 m thick. The upper unit fills paleo-relief depressions in the lower one. K_2O concentrations in the lower unit lavas range from 0.26 to 0.34 wt.% and increase slightly in glass inclusions (0.46–0.51 wt.%). The upper unit lavas show K_2O contents of 0.58–0.91 wt.%. Th/U ratios of the upper unit (4.0–5.5) resemble those of Group 2A in

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

the Lesser Khingan. In the lower unit, Th/U drops to 2–3, indicating relative U enrichment in the source.

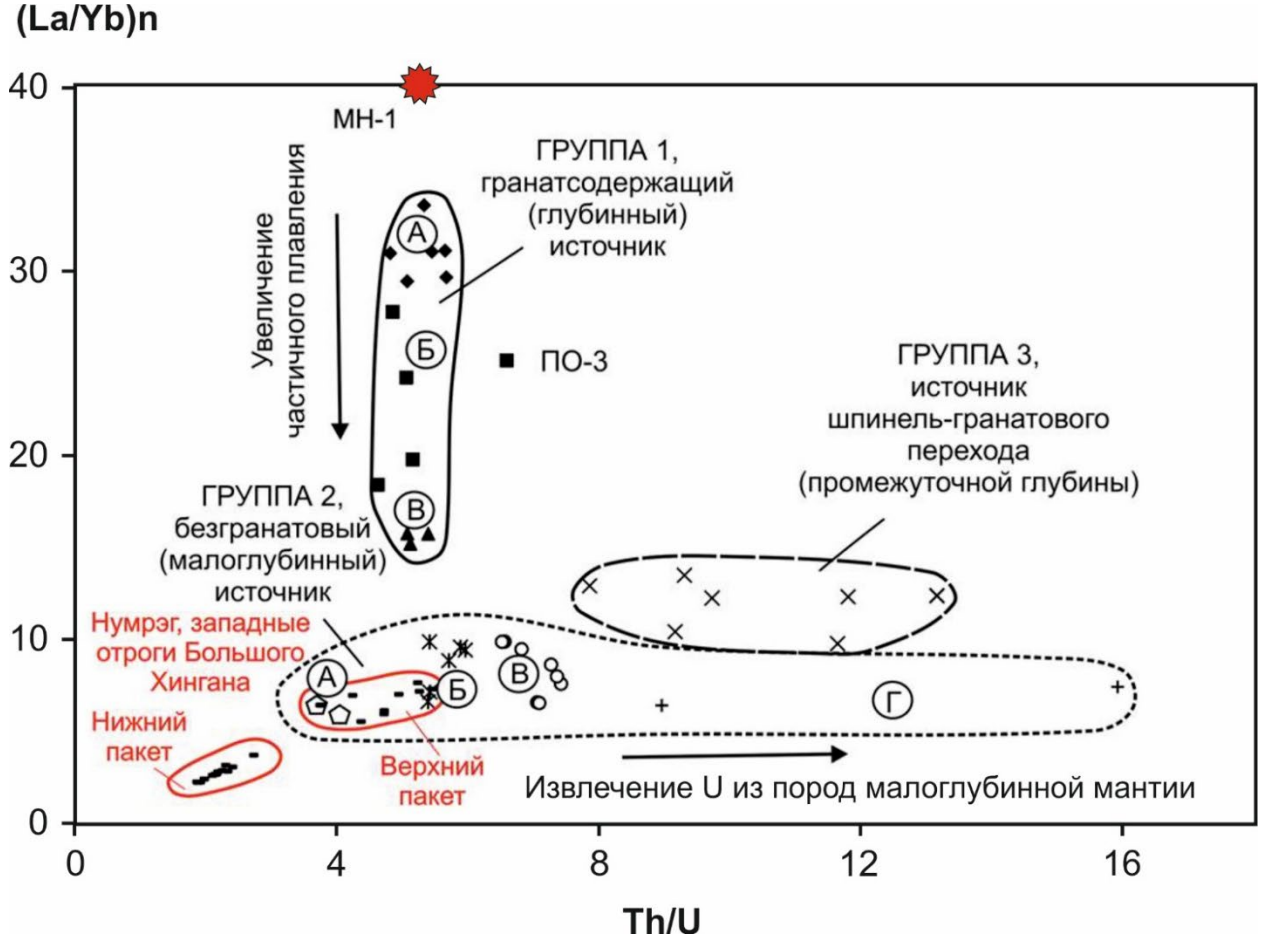


Fig. 1. Diagram of (La/Yb)n – Th/U for basalts from sources at varying depths in the Greater and Lesser Khingan Ranges.

Groups:

1 – high-K trachyandesibasalts and trachyandesites (subgroups A and B), K_2O = 2.7–3.4 wt.%, (La/Yb)NPM = 18.3–33.5; with trachyandesibasalts and andesibasalts (subgroup C), K_2O = 1.9–2.5 wt.%, (La/Yb)n = 15.1–15.7; 2 – moderate-K andesibasalts and andesites (subgroups A–D), K_2O = 0.9–2.1 wt.%, (La/Yb)n = 5.3–9.8; 3 – moderate-K andesibasalts, K_2O = 1.4–1.8 wt.%, (La/Yb)n = 9.7–13.4. Symbols A–D denote element ratio trends. Normalization to pyrolite (McDonough & Sun, 1995).

Uranium distribution also varies significantly in Cretaceous–Paleogene volcanic and subvolcanic rocks of the North and South Tien Shan (Fig. 2). Variations in Th/U and Nb/U ratios generally correlate, reflecting U depletion in South Tien Shan magma sources and enrichment in North Tien Shan sources. In North Tien Shan basalt–trachybasalt groups, Nb/U decreases to 2.2–16.5, whereas South Tien Shan basanites exhibit Nb/U values of 80–167. The U-enriched compositions of North Tien Shan rocks reflect sources at the crust-mantle boundary, while South Tien Shan basanites derive from shallow spinel peridotites depleted in U. This suggests geochemical differentiation of CMTZ substrates via U removal and accumulation during Late Paleozoic closure of the Turkestan Paleo-ocean.

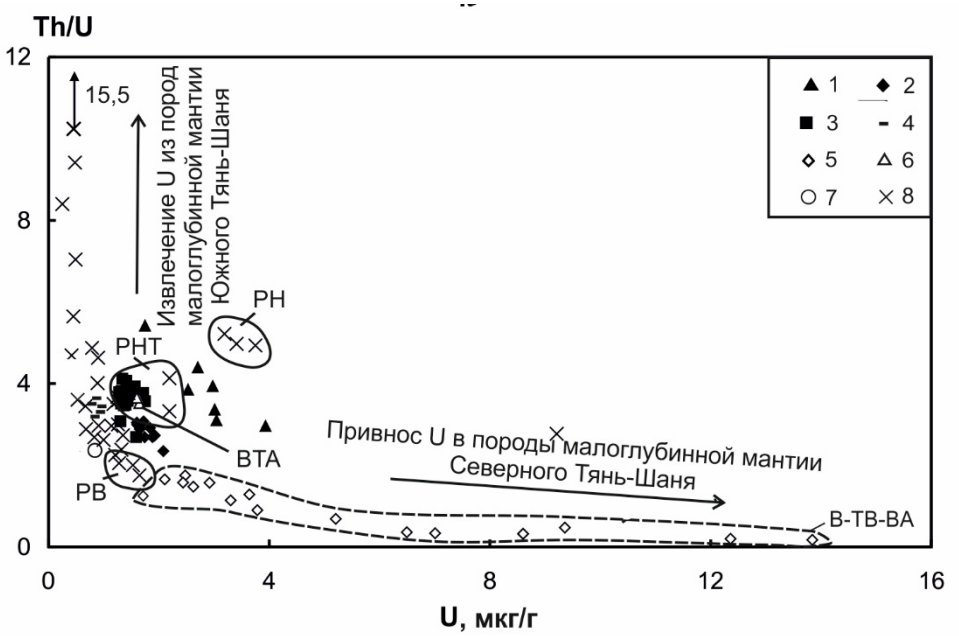


Fig. 2. Th/U – U diagram for Cretaceous–Paleogene volcanic and subvolcanic rocks of the Tien Shan.

1–6 – North Tien Shan: 1 – Kenkol basanites–foidites, 2 – Uchuduk basanites, 3 – Karatoyun, Kargon, and Kastek basanites, 4 – Tashkumyr trachybasalts, 5 – Suluterek, Baylamtal, and Toraygyr basalts–trachybasalts, 6 – Tossor andesibasalts; 7–8 – South Tien Shan: 7 – low-Ti Tekelik basalt, 8 – picrite-basalt to phonolite suite of Tuyon Depression. Fields: North Tien Shan – B-TB-AB: basalts–trachybasalts–andesibasalts; BTA: trachyandesibasalts; South Tien Shan – PB: picrite-basalts, PHT: phonotephrites, PH: phonolites. Data from this study and literature: Sobel & Arnaud (2000); Ji et al. (2006); Han et al. (2008).

In Southern Primorye, Miocene basalts of the Nakhodka volcanic field include both mantle and crustal components. Mantle component M, similar to OIB (Th/U = 4, Ce/Pb = 25), marks the beginning of a trend of U depletion, increasing Th/U to 20 and lowering Ce/Pb to 10. Crustal component K (Th/U = 3–4, Ce/Pb = 2) marks the onset of U removal from crustal rocks, increasing both Th/U and Ce/Pb to 10 (Rasskazov et al., 2003).

We conclude that anomalous hydrogenic U enrichment and/or depletion relative to Th and Nb in sources of Late Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks across various Asian regions is a characteristic feature of the CMTZ. In its deep (garnet-bearing) part, fluids are reducing and do not extract U. However, U mobilization from the CMTZ may lead to the formation of uranium deposits in the overlying continental crust.

1. Rasskazov S.V. et al. Late Cenozoic magmatism of the active continental margin of South Primorye // Pacific Geology. 2003. No. 1. P. 92–109.
2. Ji J.Q. et al. Cretaceous-Paleogene alkaline magmatism in Tuyon Basin, SW Tianshan // Acta Petrologica Sinica. 2006. 22(5): 1324–1340.
3. Han B.-F. et al. Megacryst-host basalt relationships in Tuoyun Basin, Chinese Tian Shan // J. Geol. 2008. 116: 499–509.
4. McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. 120: 223–253.
5. Rasskazov S. et al. Deep magma sources in the Baikal Rift System // Minerals. 2021. 11(5): 487.
6. Sobel E.R., Arnaud N. Cretaceous–Paleogene basalts of Tuyon Basin, NW China and Kyrgyz Tian Shan // Lithos. 2000. 50: 191–215.
7. Sun S.-S., McDonough W.F. Oceanic basalts: chemical–isotopic systematics // Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. No. 42: 313–345.

8. Zhang M. et al. Potassic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle source // J. Petrol. 1995. 36(5): 1275–1303.

Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений в Забайкалье

Шумилова Л.В.[1,2], Юргенсон Г.А.[3]
[1]ЗабГУ; [2]ЧФ ИГД СО РАН, shumilovalv@mail.ru; [3]ИПРЭК СО РАН, yurgga@ mail.ru

В рамках государственной политики инновационного пути развития России и ужесточения требований к технологиям, обеспечивающим баланс между человеком, природой и технологиями, актуальна разработка экологощадящих методов выщелачивания золота заменителями цианида (малотоксичные растворители) в сочетании с интенсифицирующими процессами с целью полного извлечения благородных металлов (Абрамов, 2021). Легкообогатимые руды фактически исчерпали свой потенциал, поэтому возникла необходимость переработки труднообогатимых золотосодержащих руд, которые находятся в районах, где активно ведётся геологоразведка и добыча золота: Австралия, Канада, Китай, США и Россия. Наибольшее внимание привлекает перспективное минеральное сырьё – техногенные отходы, в которых содержание золота значительно превышает содержание благородного металла в природных рудах. Однако, как и ранее, так и в настоящее время, оно является упорным, поскольку в нём золото находится в тесной ассоциации с рассеянным углеродистым веществом (РУВ) и сульфидными минералами.

Объекты исследования – лежалые огарки обжига сульфидного концентрата золотоизвлекательной фабрики, полученные на мышьяковистом заводе (Забайкалье).

Цель исследований – разработка экологощадящей технологии извлечения золота из упорного минерального техногенного сырья.

Исследование показало, что золотосодержащие огарки на промышленной площадке рудника за 50 лет подверглись гипергенному преобразованию в условиях резко континентального климата. Это привело к формированию сложных сульфидно-сульфатных соединений. В результате естественной дезинтеграции основная часть огарков размером более 12,5 мм разрушилась, а фракция с размерами от -2,00 до -0,075 мм составила 81,66%.

Химическим анализом выявлены следующие содержания элементов: золото (Au) – 6,54 г/т, серебро (Ag) – 36,1 г/т, органическое вещество (Сорг.) – 2,5%, общее содержание серы (Sобщ.) – 3,58%, из которой 0,9% в сульфидной форме. Также обнаружены следы мышьяка (As) – 0,015%, железа (Fe) – 12,84% и сурьмы (Sb) – 0,03%. Эти данные свидетельствуют о значительном изменении состава огарков, что важно учитывать при дальнейшей переработке сырья.

В результате проведенных исследований, разработана комбинированная технология предварительного окисления рассеянного углеродистого вещества и тиокарбамидного выщелачивания золота из лежалых сульфидных огарков. Технология реализуется при атмосферном давлении и температуре 20°С (рис. 1). Новое технологическое решение позволяет существенно повысить степень извлечения ценных компонентов из техногенных отходов горно-металлургического производства. Это является важным аспектом устойчивого развития и рационального использования природных ресурсов. Экспериментальным путём определялось влияние следующих технологических параметров на извлечение золота: концентрация тиомочевины (от 0.25 до 3,0%); концентрация серной кислоты (от 0,5% до 3,0 %); отношение Т:Ж (от 1:0,5 до 1:3); концентрация перекиси водорода (от 0,1 до 0,6 %). Изучена кинетика процесса тиокарбамидного выщелачивания. Установлены зависимости концентрации органического углерода в твердой фазе и концентрации тиомочевины в растворе от продолжительности процесса тиокарбамидного выщелачивания. В ходе экспериментов исследовано влияние ряда технологических параметров на показатели извлечения золота в определённом диапазоне значений.

Выбор подготовительных процессов (грохочение, измельчение, промывка, обезвоживание) определялся необходимостью сокращения крупности огарков до оптимального значения, снижением вязкости пульпы и повышением эффективности выщелачивания за счёт удаления глины. Огарки крупностью +0,106 мм измельчали до 80 %

класса 106 мкм. Проводилось активационное выщелачивание с исользованием сильного окислителя (перекись водорода).

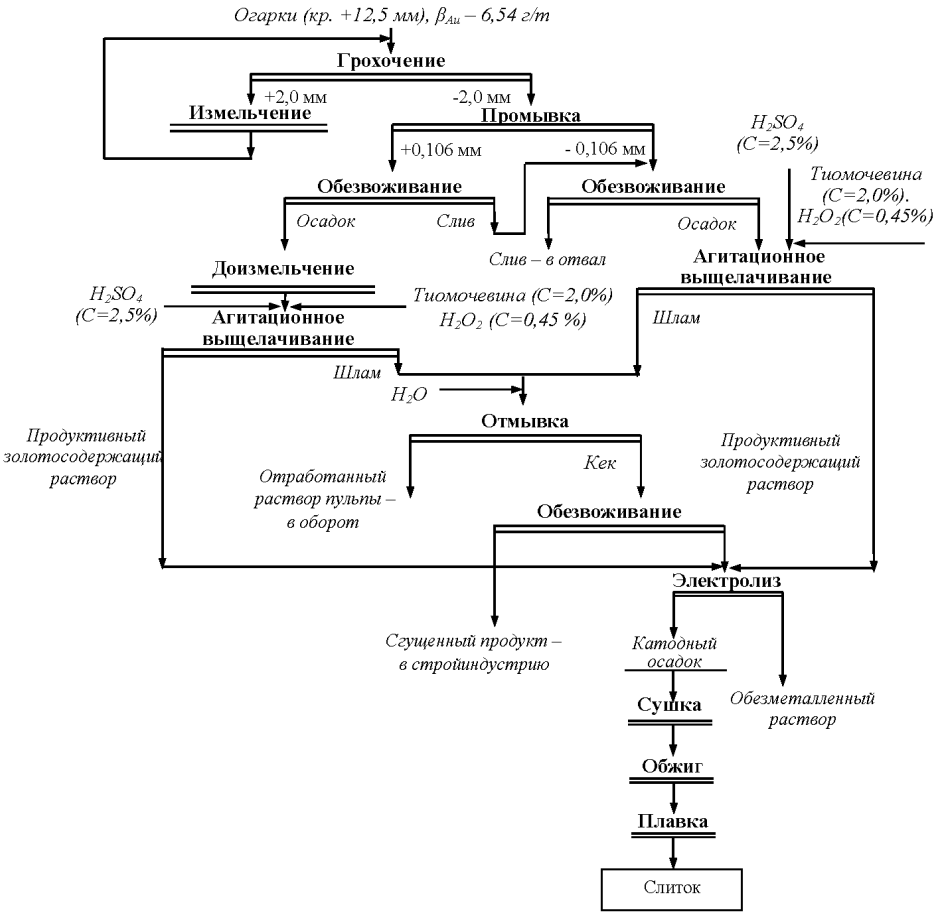


Рис. 1. Технологическая схема тиокарбамидного выщелачивания золота из лежалых сульфидных огарков

Для достижения эффективности процесса тиокарбамидного выщелачивания, определены оптимальные технологические условия: время обработки – 7 часов; концентрация тиомочевины – 2%; концентрация серной кислоты – 2,5%; соотношение твёрдой и жидкой фаз – 1:2; концентрация перекиси водорода – 0,45%.

Экспериментальным путём в лабораторных условиях удалось достичь высокого показателя извлечения золота, равного 89,66%. При этом отпала необходимость в обезвреживании промышленных стоков и отходов выщелачивания. Сгущённый продукт, полученный после промывки от тиомочевины, можно использовать в строительной индустрии.

Создание и развитие металлургии на Дальнем Востоке РФ предполагает усиление экологизации (предотвращения отрицательных воздействий отходов на окружающую среду) и комплексность использования минерального сырья. Селен и теллур – неметаллы, входят в состав примерно 80 собственных минералов. Все имеющиеся в настоящее время технологии получения теллура и селена основаны на извлечении химических элементов из сульфидов Cu, Pb и других минеральных источников, содержащих небольшие их количества при рафинировании меди.

Рентабельных способов добычи селена из руд не существует. Главным образом Se извлекается в виде попутного продукта при рафинировании меди. Соответственно, производство селена в отдельных странах напрямую коррелирует с национальными мощностями по выплавке меди.

Одним из значимых источников теллура в России являются руды Балейского рудного поля, расположенного в Забайкальском крае – регионе России, где в 1929 году начали разрабатывать уникальные золотосеребряные месторождения Балейского рудного поля. По имеющимся данным (Балейское рудное поле, 1984) теллур и теллуриды являются обычными примесями в рудах Балейского и Тасеевского месторождений, входящих в состав Балейского рудного поля.

Цель исследования – технологическое обоснование возможности извлечения теллура и селена из лежалых хвостов обогащения и попутного извлечения в процессе доработки золотосеребряных руд Балейского рудного поля.

Объект исследования – руды Балейского и Тасеевского месторождений (коллекция образцов золотоносных жил и вмещающих горных пород Юргенсона Г.А., д-р геол.-минерал. наук, которые были отобраны за период с 1968 до 1989 гг.) и лежалые хвосты переработки золотосеребряных руд Балейского рудного поля.

В 2019–2022 годах с использованием электронной микроскопии и анализа вещества методами ICP MS получен новые данные о содержании теллура и его минеральных формах, а также селена в рудах Балейского рудного поля. Это показало целесообразность рассмотрения возможности извлечения наряду с золотом и серебром, теллура и селена из руд недоработанных частей Балейского рудного поля.

Анализ данных содержаний теллура и селена в первичной и окисленной рудах, полученных электронно-микроскопическим методом показал, что в рядовых рудах наблюдается корреляция между содержанием теллура и определенными минеральными формами золота и серебра, что позволило установить их парагенетические взаимоотношения. Среднее содержание теллура в рудах Балейского месторождения составляет 0,65 г/т. Содержание селена значительно выше и достигает 2,59 г/т, однако собственные минералы селена в исследуемых рудах не были выявлены. Это свидетельствует о том, что селен, присутствует преимущественно в рассеянном состоянии и связан с другими минералами.

В руде Балейского рудного поля достоверно был определен и описан (Балейское рудное поле, 1984) лишь гессит (Ag_2Te), в основном, в ассоциации с золотом. Предположительно были диагностированы калаверит ($AuTe_2$) и петцит (Ag_3AuTe_2). Кроме известных ранее, в результате исследований методами оптической и электронной микроскопии в рудах Тасеевского и Балейского месторождений впервые установлены следующие минералы: алтаит (PbTe), сильванит $(Au,Ag)_2Te_4$), штютцит Ag_5Te_3, кервелиит Ag_4TeS, эмпрессит (AgTe), пильзенит (Bi_4Te_3), колорадоит (HgTe), телурсодержащий ютенбогаардтит $Ag_{3,24}Au_{0,91}(S_{1,42},Te_{0,43})$ и др. (Юргенсон, 2022).

Гессит наиболее распространен среди всех теллуридов Балейского рудного поля. По наблюдениям, величина его индивидов чаще всего находилась в пределах 10 микрон, а в ассоциации с халцедоновидным кварцем и каолинитом отдельные индивиды достигали величины 0,1 мм (Балейское рудное поле, 1984). По нашим данным гессит ассоциирует с халькопиритом, алтаитом, золотом, тетраэдритом, в том числе, содержащим серебро, аргентотеннантитом, галенитом, миаргиритом, пиритом, ленаитом, вюртцитом, сфалеритом, гетероморфитом, адуляром, мусковитом, кварцем.

Петцит ассоциирует с другими теллуридами золота и серебра, а также с низкопробным золотом, миаргиритом, обычным для балейских руд тетраэдритом и пиритом.

Обнаружен также ютенбогаардтит, содержащий от 2,98 до 8,79% теллура. Выявлен теллурсодержащий веенит (до 11,4% Te), в котором теллур, вероятно, замещает серу. Часть свинца в нем замещена на серебро (1,47%) и золото (6,67%), и количество свинца составляет лишь 40,22%. В пирите иногда содержится до 0,9 % теллура. В руде зоны гипергенеза содержания теллура существенно ниже.

Несмотря на то, что селен и теллур входят в состав нескольких десятков минералов и встречаются в золотосеребряных месторождениях, но, однако ранее не извлекались. Современные технологии получения этих элементов основаны на попутном извлечении при металлургии Cu и Pb.

Авторами разработана комбинированная технология извлечения теллура и селена из лежалых хвостов обогащения золотосеребряных руд Балейского рудного поля, включающая два цикла: первый – извлечение теллура, второй – извлечение селена (рис.2).

Первый цикл извлечения теллура состоит из последовательных операций: измельчение лежалого геоматериала; водное выщелачивание и очистка пульпы; фильтрация, в результате которой получается кек, идущий на плавку, и фильтрат, содержащий теллурит натрия (Na_2TeO_3) и селенит натрия (Na_2SeO_3), направляемый на электроэкстракцию теллура с целью электрохимического восстановления ионов теллура (IV) на катоде; черновой теллур перед рафинированием подвергается растворению и восстановлению в присутствии NaOH и Al, далее проводится аэрации раствора Na_2Te при механическом перемешивании и подачи кислорода. Отработанный электролит электроэкстракции отправляется во второй цикл извлечения селена (восстановление Se: окислительный обжиг обезмеженного шлама алюминиевым порошком с образованием утилизируемого гидроксида алюминия, улавливание диоксида селена из печных газов содо-щелочными растворами; аэрационное выделение кристаллического селена из селенидного раствора с последующей фильтрацией, сушкой и рафинированием чернового селена для удаления от 2,0 до 7,0 % примесей). Отработанный раствор фильтрации селенового цикла направляется в цикл получения теллура.



Рис.2. Комбинированная технология извлечения теллура и селена из хвостов обогащения золотосеребряных руд Балейского рудного поля

Вывод. Разработана экологощадящая технология переработки отходов золотодобычи с использованием нетоксичных растворителей (тиомочевина), физических методов интенсификации выщелачивания и сильного окислителя (перекись водорода), позволяющая увеличить выпуск драгоценного металла, пополнить золотовалютные резервы государства и оптимизировать взаимодействие человека с природой и технологиями, обеспечивая их компромиссное сосуществование.

Получены новые данные о содержаниях теллура и селена в золотосеребряных рудах Балейского рудного поля. Результаты исследования вносят существенный вклад в понимание геохимических особенностей Балейского рудного поля и могут быть использованы для дальнейших исследований в области геологии и минералогии благородных металлов. Разработанная базисная гидрометаллургическая технология получения теллура и селена из хвостов обогащения золотосеребряных руд, протестирована в лабораторных условиях и рекомендуется для проведения дальнейших исследований, как в процессе переработки лежалых хвостов, так и при доработке Балейского рудного поля.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме № FUFR-2021-0005.

1. Абрамов Б. Н. Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 136–145.
2. Балейское рудное поле. М.: ЦНИГРИ, 1984. 270 с.
3. Юргенсон Г.А. Первые данные о ютенбогаардтите в руде Тасеевского золотосеребряного месторождения в Восточном Забайкалье (Россия)// Вестник ЗабГУ,2022.Т.28,№6.С. 26–36.

*Geoecological Issues of Ore Deposit Exploitation in Transbaikalia

Shumilova L.V.[1,2], Yurgenson G.A.[3]
[1]Transbaikal State University; [2]CD IMS RAS, shumilovalv@mail.ru; [3]INREC SB RAS, yurgga@mail.ru

In the context of Russia's national policy on innovation-driven development and increasing regulatory demands for technologies ensuring a balance between human activity, nature, and industry, there is a growing relevance for the development of environmentally friendly methods for gold leaching using cyanide substitutes (low-toxicity solvents), combined with process intensification, aimed at the complete recovery of precious metals (Abramov, 2021). Easily beneficiated ores have largely exhausted their potential, necessitating the processing of refractory gold-bearing ores located in regions with active geological exploration and gold mining: Australia, Canada, China, the USA, and Russia. Of particular interest is promising mineral feedstock in the form of technogenic waste, in which gold content often significantly exceeds that of natural ores. However, both historically and currently, this waste remains refractory due to the close association of gold with dispersed carbonaceous matter (DCM) and sulfide minerals.

Study objects: Spent sulfide concentrate roasting slags from a gold extraction plant processed at an arsenic facility in Transbaikalia.

Research objective: To develop an environmentally friendly technology for gold recovery from refractory technogenic mineral feedstock.

The study showed that gold-bearing slags stored at a mining site over the past 50 years have undergone supergene alteration under the region's sharply continental climate, resulting in the formation of complex sulfide-sulfate compounds. Natural disintegration reduced the fraction size, with over 81.66% of the material now in the −2.00 to −0.075 mm range.

Chemical analysis revealed the following element contents: gold (Au) – 6.54 g/t, silver (Ag) – 36.1 g/t, organic carbon – 2.5%, total sulfur – 3.58% (0.9% in sulfide form), and traces of arsenic (As) – 0.015%, iron (Fe) – 12.84%, and antimony (Sb) – 0.03%. These findings indicate substantial compositional changes in the slags, which must be considered for further processing.

As a result of the research, a combined technology was developed, involving preliminary oxidation of dispersed carbonaceous matter and subsequent thiourea leaching of gold from spent sulfide slags. This process operates at atmospheric pressure and a temperature of 20°C (Fig. 1). The technological solution significantly improves the recovery of valuable components from mining and metallurgical waste, contributing to sustainable development and rational resource use.

Experimental studies assessed the effects of various process parameters on gold recovery: thiourea concentration (0.25–3.0%), sulfuric acid concentration (0.5–3.0%), solid-to-liquid ratio (1:0.5 to 1:3), and hydrogen peroxide concentration (0.1–0.6%). The kinetics of thiourea leaching were investigated, and dependencies between organic carbon content in the solid phase and thiourea concentration in the solution over time were established.

Preparatory processes (screening, grinding, washing, dewatering) were chosen to optimize slag grain size, reduce slurry viscosity, and increase leaching efficiency through clay removal. Slags >0.106 mm were ground to 80% passing 106 μm. Activation leaching was performed using hydrogen peroxide as a strong oxidant.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

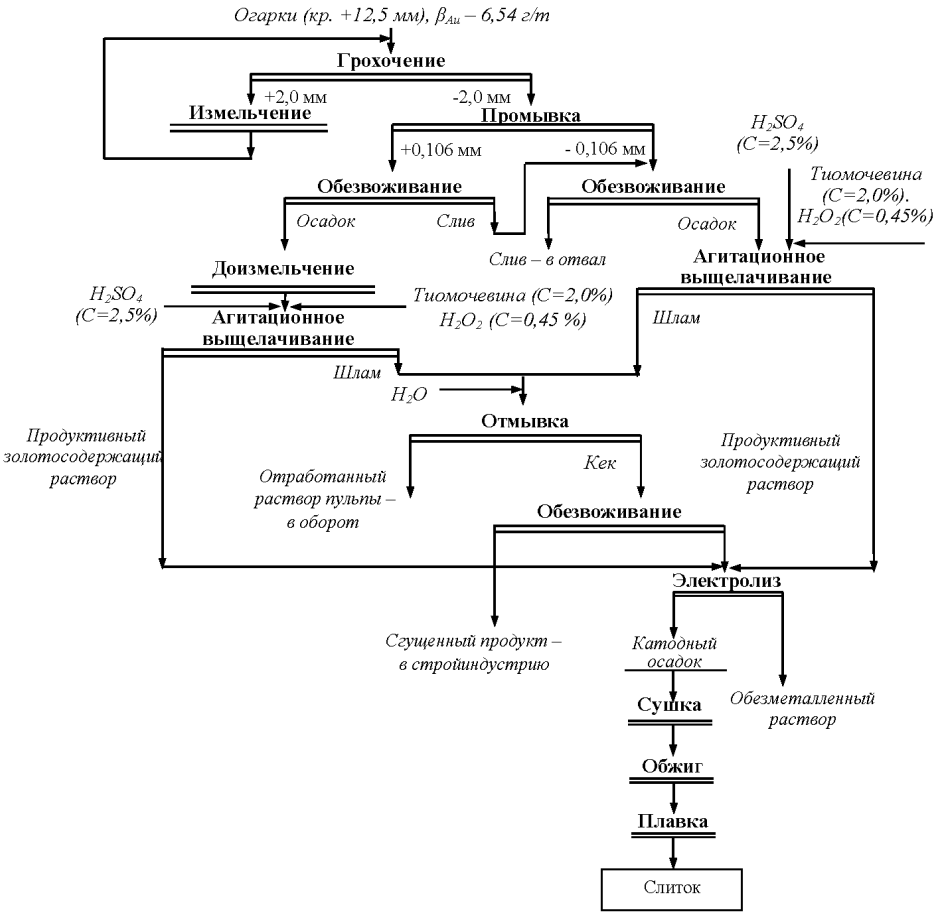


Fig. 1. Technological flowchart of thiourea leaching of gold from spent sulfide slags

Optimal conditions for efficient thiourea leaching were determined as follows: treatment time – 7 hours; thiourea concentration – 2%; sulfuric acid concentration – 2.5%; solid-to-liquid ratio – 1:2; hydrogen peroxide concentration – 0.45%.

Laboratory experiments achieved a high gold recovery rate of 89.66%. Additionally, the process eliminates the need for detoxification of industrial effluents and leaching residues. The thickened product, after thiourea washing, can be used in the construction industry.

The development of metallurgy in Russia's Far East requires increased environmental responsibility (minimizing environmental harm from waste) and comprehensive utilization of mineral resources. Selenium and tellurium, both nonmetals, occur in approximately 80 known minerals. Current production technologies for Te and Se rely on recovery from Cu, Pb, and other sulfides during copper refining.

There are no economically viable methods for direct selenium extraction from ores; instead, Se is primarily obtained as a by-product of copper refining. Accordingly, selenium production in any country directly correlates with its copper smelting capacity.

One of the main tellurium sources in Russia is the ore of the Balei ore field, located in the Transbaikal region, where unique gold-silver deposits have been exploited since 1929. According to available data (Balei Ore Field, 1984), tellurium and tellurides are common in the ores of the Balei and Taseevskoye deposits.

Research objective: To justify the technological feasibility of recovering tellurium and selenium from spent beneficiation tailings and as by-products during reprocessing of gold-silver ores from the Balei ore field.

Study objects: Ores from the Balei and Taseevskoye deposits (sample collection of auriferous veins and host rocks by Dr. G.A. Yurgenson, gathered between 1968 and 1989), and spent tailings from ore beneficiation.

Between 2019 and 2022, using electron microscopy and ICP-MS analysis, new data were obtained on the content and mineral forms of tellurium and selenium in Balei ore field ores. This confirmed the viability of recovering Te and Se alongside gold and silver from underexplored parts of the ore field.

Analysis of primary and oxidized ore samples revealed a correlation between tellurium content and certain gold and silver mineral forms, establishing paragenetic relationships. Average tellurium content in Balei ores is 0.65 g/t. Selenium content is higher, reaching 2.59 g/t, although no discrete selenium minerals were identified, indicating that selenium occurs mainly in dispersed form bound to other minerals.

In Balei ores, hessite (Ag_2Te) is the only telluride definitively identified (Balei Ore Field, 1984), typically associated with gold. Other presumed tellurides include calaverite ($AuTe_2$) and petzite (Ag_3AuTe_2). Additionally, new minerals identified via optical and electron microscopy include altaite (PbTe), sylvanite ($(Au,Ag)_2Te_4$), stuetzite (Ag_5Te_3), cervelleite (Ag_4TeS), empressite (AgTe), pilsenite (Bi_4Te_3), coloradoite (HgTe), tellurium-bearing utenbogaardite ($Ag_{3.24}Au_{0.91}(S_{1.42}Te_{0.43})$), and others (Yurgenson, 2022).

Hessite is the most common telluride, with crystal sizes generally up to 10 μm and occasionally up to 0.1 mm in chalcedonic quartz and kaolinite associations (Balei Ore Field, 1984). It is commonly associated with chalcopyrite, altaite, gold, tetrahedrite (often Ag-bearing), argentotennantite, galena, miargyrite, pyrite, lenaite, wurtzite, sphalerite, heteromorphite, adularia, muscovite, and quartz.

Petzite is associated with other gold-silver tellurides, low-fineness gold, miargyrite, and the common Balei tetrahedrite and pyrite.

Tellurium-bearing utenbogaardite was identified with Te contents ranging from 2.98 to 8.79%. Tellurium-bearing vaesite (up to 11.4% Te) was also found, with Te likely substituting for sulfur. Part of its Pb content is replaced by Ag (1.47%) and Au (6.67%), with Pb accounting for only 40.22%. In pyrite, up to 0.9% Te was detected. Tellurium contents are significantly lower in supergene alteration zones.

Despite the known occurrence of selenium and tellurium in dozens of minerals at gold-silver deposits, they have not been previously extracted. Current technologies recover these elements during Cu and Pb metallurgy.

The authors developed a combined technology for Te and Se extraction from beneficiation tailings of gold-silver ores from the Balei ore field, involving two cycles:

– Cycle 1 – Tellurium extraction: slag grinding → aqueous leaching and pulp purification → filtration (producing cake for smelting and filtrate with sodium tellurite and selenite) → electroextraction of Te(IV) ions at the cathode → crude tellurium refining by NaOH and Al treatment → solution aeration with mechanical stirring and oxygen → spent electrolyte sent to cycle 2.

– Cycle 2 – Selenium extraction: oxidative roasting of de-aluminized sludge with aluminum powder to form recoverable aluminum hydroxide → capturing SeO_2 from furnace gases in soda-alkaline solutions → aeration-induced crystallization of selenium → filtration, drying, and refining to remove 2.0–7.0% impurities → recycled solution directed back to tellurium extraction.

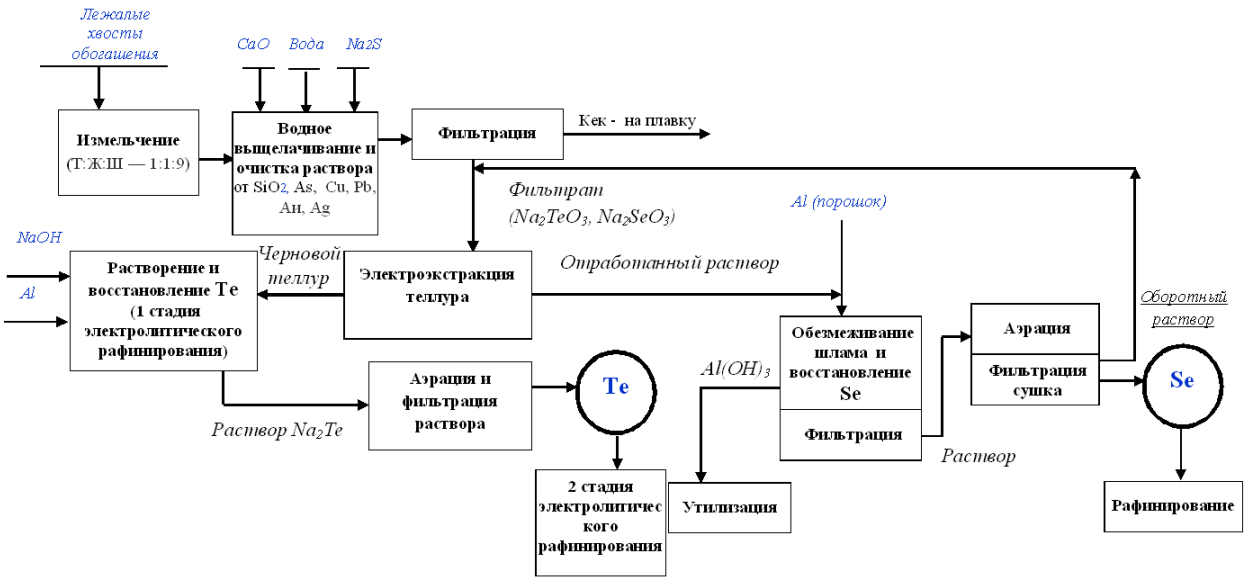


Fig. 2. Combined technology for Te and Se extraction from beneficiation tailings of Balei gold-silver ores

Conclusion:

An environmentally friendly technology has been developed for processing gold extraction waste using non-toxic solvents (thiourea), physical intensification methods, and a strong oxidizer (H_2O_2), enabling increased gold recovery, strengthening the national gold reserves, and fostering a balance between human, natural, and technological systems.

New data on tellurium and selenium contents in Balei ore field gold-silver ores have been obtained. The results provide significant insights into the geochemistry of the field and offer a foundation for further geological and mineralogical studies of precious metals. The developed hydrometallurgical base technology for tellurium and selenium recovery from tailings has been laboratory-tested and is recommended for further research both in tailings reprocessing and in the continued development of the Balei ore field.

This work was conducted under the state assignment project No. FUFR-2021-0005.

1. Abramov B.N. Assessment of tailings toxicity from ore deposits in the Transbaikal Territory // Mining Information and Analytical Bulletin. 2021. No. 11. P. 136–145.
2. Balei Ore Field. Moscow: TsNIGRI, 1984. 270 p.
3. Yurgenson G.A. First data on utenbogaardite in ore from the Taseevskoye gold-silver deposit, Eastern Transbaikalia (Russia) // Bulletin of Transbaikal State University. 2022. Vol. 28, No. 6. P. 26–36.

Состав и свойства жильного кварца Верхнеалиинского месторождения как критерии вертикальной зональности рудоносных зон

Юргенсон Г.А
ИПРЭК СО РАН, г. Чита, Россия, yurgga@mail.ru

Одной из важнейших проблем в изучении рудных месторождений было и остается познание их вертикальной зональности, так как оно является основой для оценки уровня их эрозионного среза и, соответственно, прогноза оруденения на глубину. Одной из главных трудностей этого познания, зачастую является отсутствие фактического материала об изменчивости минерального состава и важнейших свойств минералов с глубиной.

В пределах Верхнеалиинского рудного поля в Балейском рудном районе Восточного Забайкалья в процессе его буровой разведки на полную глубину удалось вскрыть рудную зону V от верхнего до нижнего выклинивания. Её верхняя часть, представляющая собою зону верхнего выклинивания была вскрыта серией канав, а собственно жила прослежена по керну скважин от верхнерудной её части до нижнего выклинивания. Далее с глубиной прослежена нижняя часть зоны околорудных изменений.

Образцы и пробы для изучения отобраны из керна четытрех скважин, подсекших рудную зону на интервалах глубин (м): 27 – 34; 57 – 104; 153 – 168; 285 – 293. Собственно кварцевая жила имеет длину по падению около 100 м, затем переходит в зону окварцевания, которая продолжается до глубины 293 м и переходит в нижнюю зону околорудных изменений.

Используя многолетний опыт изучения жильного кварца месторождений различных рудных формаций, был использован был выбрани комплекс методов. Он включал определение химического состава жильного кварца и вмещающих горных пород, степени совершенства кристаллического строения (СКС) кварца по методике, описанной в работе (Юргенсон, Тумуров, 1980), температур α→β перехода кварца, его удельного электрического сопротивления, а также K_2O/Na_2O как одного из критериев золотоносности вмещающих оклорудноизмененных горных пород (Юргенсон Г.А., Юргенсон Т.Н.,1991).

Изученная V-я рудная зона локализована в монцонитах Западной части месторождения. Одна из кварцевых жил при максимальной мощности около 2 м имеет длину по простиранию до 700 м, по падению около 100 м, затем переходит в зону окварцевания и и околорудных пород и продолжается до глубины 293 м и, вероятно, глубже, поскольку не прослежена до выклинивания. Околорудные изменения вмещающих горных пород имеют максимальную ширину до 6-7 м в обе стороны от контактов кварцевой жилы, выклиниваясь вверху на расстоянии 18 м от её выклинивании и до глубины около 300 м в виде узкой зоны кварцевого и кварц-турмалинового прожилкования в пропилитах и березитах. В верхней части рудной зоны околорудные изменения выражены в виде аргиллзации и пропилитизации монцонитов, сменяясь с глубиной пропилитами, частью – березитами. Непосредственно в приконтактовых частях жилы наблюдается возрастание доли слюд и, частью, калиевого полевого шпата.

Жила сложена кварцем, пиритом, арсенопиритом, присутствуют низкопробное самородное золото, частью электрум, галенит, сфалерит, халькопирит, висмутин и тетрадимит, сульфоантимониты и сульфовисмутиты, самородный висмут и серебро. Пирит верхней части жилы содержит мышьяк в количестве 0,62 – 1,81%, а в нижней – до 0,55%. И лишь в верхней части жилы в нем присутствует до 0,46% сурьмы, ассоциирующей с мышьяком (1,25%). В нижней части жилы в пирите появляется кобальт до 0,45%. Подобная закономерность в изменении с глубиной содержаний примеси мышьяка, сурьмы и кобальта в пирите была выявлена в 2021г. в Первой рудной зоне Тасеевского золото-серебряного месторождения в Забайкалье. Арсенопирит в верхней части жильной зоны содержит до 0,49% сурьмы, а в нижней из примесей в нем присутствует только кобальт до 0,05%.

Жильные минералы представлены кварцем, гидромусковитом, турмалином, каолинитом, хлоритом. Из акцессорных минералов выявлены рутил и монацит-Се. В минеральных продуктивных комплексах жилы среди структурно-текстурных разновидностей кварца

развиты массивные, полосчато-массивные, брекчиевидные, реже – шестоватые агрегаты, но преобладают тонко- и мелкозернистые, содержащие слоистые силикаты (каолинит, хлорит, гидрослюду). Особенностью кварца является присутствие в нем алюминия в пределах сотых долей процента, а также в поздних генерациях и железа до первых сотых долей процента.

Отмечена следующая общая последовательность образования минералов: сульфидно-турмалиново-кварцевые агрегаты краевых частей сменяются в направлении к оси жилы существенно кварцевыми с сульфидами и сульфосолями. Эта последовательность может неоднократно повторяться в результате внутриминерализационного взламывания, брекчирования и залечивания. Здесь обилен пирит, развивающийся как во вкрапленниках полевого шпата, так и в массе аргиллизита и пропилита.

В результате взламывания кварцево-сульфидно-сульфосольный комплекс, также как и краевые части жил, брекчируется и цементируется тонкозернистым агрегатом слюдисто-кварцево-турмалинового состава, а затем рассекается мелко-шестоватым кварцем. Структурно-текстурные особенности жильного кварца изменяются с глубиной. Если в верхних частях жилы развиты, в основном, мелкозернистые, иногда халцедоновидные его агрегаты, то на глубинах, превышающих 100 и более метров, появляются среднезернистые, шестоватые и гребенчатые их разности. Эта их особенность отражается, как показано ниже, на вариациях чисел, характеризующих совершенство их кристаллического строения.

Результаты изменения величины СКС с глубиной и в сечениях самих жил показаны в таблице и на рисунке.

Таблица - Результаты определения степени совершенства кристаллического строения

Номер п/п	Номер образца	Положение в разрезе, глубина, м	Интервал сечения жильной зоны скважинами, м	Величина СКС	Среднее по интервалу
1	329	Зона окварцевания, 27	27 – 34	59	63
2	330	Приконтактовая часть жилы, 29		68	
3	332	Осевая часть жилы, 30		73	
4	335	Приконтактовая часть жилы, 31.5		71	
5	337	Зона окварцевания, 33.5		60	
6	339	Краевая часть зоны окварцевания, 34		47	
7	340	Зона окварцевания, 57.5	57 – 104	54	67.2
8	343	Зона пропилитизации и окварцевания, 58		56	
9	346	Приконтактовая часть зоны пропилитизации и окварцевания, 81		67	
10	348	Приконтактовая часть жилы, 81.5		76	
11	350	Осевая часть жилы 82.3		79	
12	352	Приконтактовая часть жилы 87		74	
13	353	Зона окварцевания на контакте с жилой, 87.7		66.3	
14	355	Зона окварцевания на контакте с вмещающими монцонитами, 104		65.3	
15	357	Гребенчато-шестоватый, 154	153 – 168	86	89.2
16	359	Шестовато-гребенчатый кварц в зоне окварцевания, 156		88	
17	361	Гребенчатый кварц, 158		90	
18	363	Гребенчатый кварц из зоны окварцевания, 160.2		93	

Из данных таблицы и рис. 4 видно, что величины степени СКС симметричны относительно срединной части жилы: минимальны в зонах окварцевания в боках жилы, возрастая к срединной. Закономерность изменения величины меры СКС, полученная в результате изучения кварцево-жильной зоны V Верхнеалиинского месторождения, подтверждает известные выводы о том, что это свойство жильного кварца закономерно

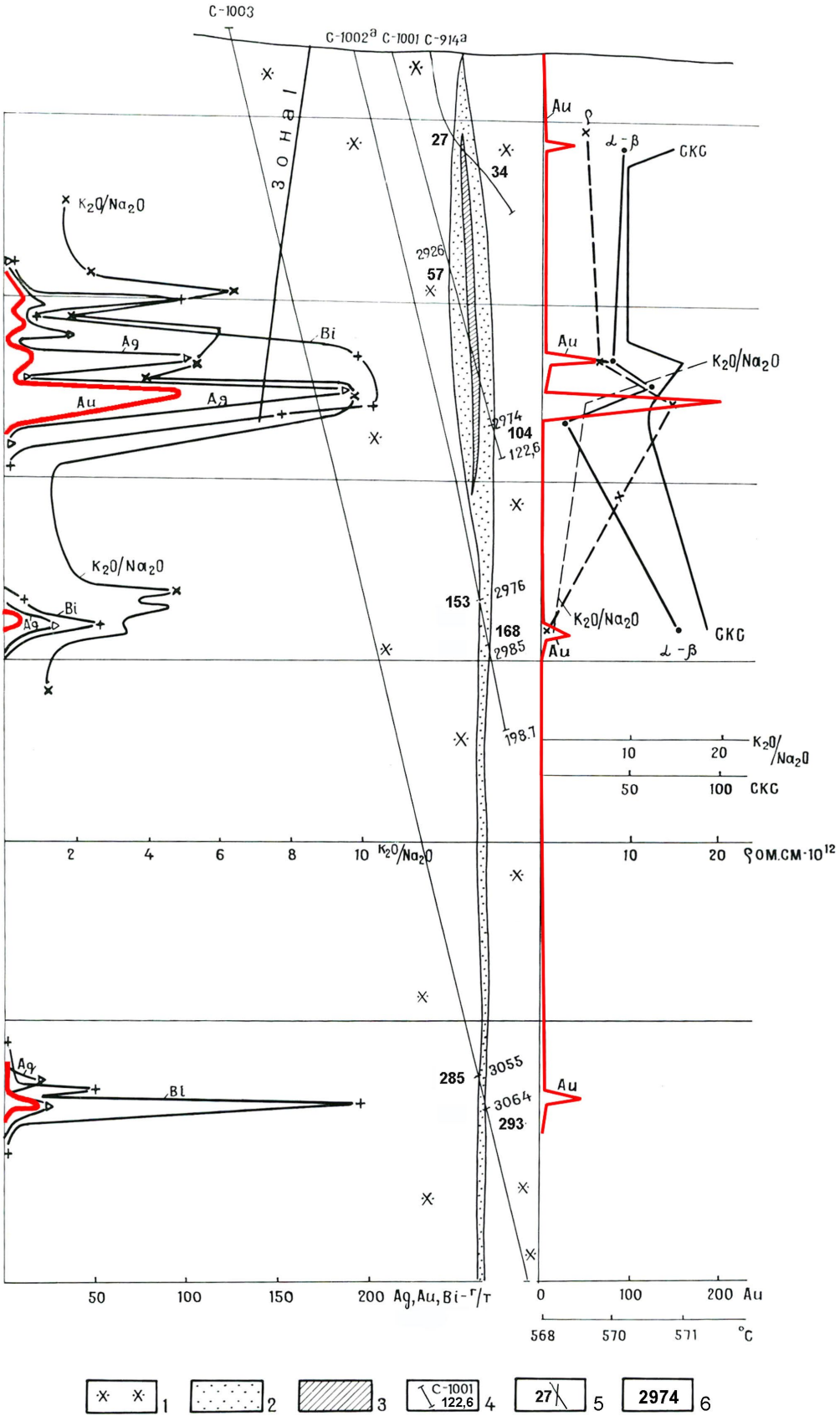


Рис. Изменчивость состава и свойств жильного кварца и вмещающих горных пород V рудной зоны Верхнеалиинского месторождения.

1 – монцониты; 2 – зона околорудных изменений; 3 – сульфидно-кварцевая жила; 4 – скважина и её номер; 5 – проекция линии пересечения жильной зоны скважиной и отметка в м её глубина; 6– номер пробы.

изменяется в отдельных жилах, месторождениях и рядах рудных формаций (Юргенсон, 2003). Это показано на примере нескольких десятков месторождений СССР различных рудных формаций. Но для отдельной жильной зоны от её верхнего выклинивания до нижнего, переходящего в околорудно-измененные горные породы, удалось сделать впервые.

Аналогично изменяются и температуры α→β перехода в кварце, увеличивающиеся с возрастанием совершенства кристаллического строения от 570.3°С в верхнем сечении до 571.1°С в среднем и 572.3°С в нижнем.

Величины удельного электрического сопротивления (ρ ом·см10^{12}) в кварцевой жиле и зоне окварцевания также возрастают, достигая максимума на участке почти сплошного окварцевания со значением СКС, равным 74, а затем в околорудноизмененных породах резко уменьшается. Это обусловлено тем, что жильный кварц в жиле и близконтактовых её частях, содержит меньше примесей, а в зоне слабого окварцевания количество их возрастает и удельное сопротивление уменьшается. Эти данные подтверждают целесообразность использования измерения удельного электрического сопротивления при поисках кварцевых жил с использованием методов электроразведки.

В левой части рис. приведены кривые содержаний золота, серебра и висмута в каждом из изученных сечений жильной зоны V, включая зоны околорудных изменений. Из их анализа следует, что существует корреляция между содержаниями золота и висмута, а также серебра. Но ореолы повышенных содержаний серебра выходят за пределы непосредственно жилы. При этом K_2O/N_2O четко отображает как жильную зону в целом, так и повышенные содержания золота в кварцевой жиле.

Анализ данных по изменчивости с глубиной золота, серебра и висмута показал, что в пределах кварцевой жилы содержания золота возрастают с глубиной, уменьшаясь в зоне нижнего выклинивания с сохранением промышленных содержаний, и сохраняется в зоне окварцевания до глубины 293 м. При этом оно сопровождается содержаниями висмута, возрастающими с глубиной. В то же время содержания серебра уменьшаются, а золота возрастают. С возрастанием висмута возрастает содержание золота. Эта тенденция подчеркивается тем, что с глубиной уменьшается количество сульфосолей и галенита, с которыми связано серебро, и возрастает доля тетрадимита, являющегося носителем не только висмута, что самое важное, – теллура, с которым и переносится существенная часть золота.

Выводы

1. Впервые, на примере кварцево-жильной зоны V Верхнеалиинского месторождения золота, от её верхнего до нижнего выклинивания, выполнен комплекс исследований, включающий измерение степени совершенства кристаллического строения (СКС), температур α→β перехода и удельного электрического сопротивления.

2. Подтверждена возможность использования величины СКС в комплексе с данными по содержанию золота, серебря и висмута для оценки уровня эрозионного срез вновь открываемых проявлений золота как в отдельных подсечениях буровыми скважинами, так и в виде свалов или коренных выходов кварцевых жил.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме № FUFR-2021-0005.

***Composition and properties of vein quartz at the Verkhnealiinskoye deposit as indicators of vertical zoning in ore-bearing zones**

Yurgenson G.A.
INREC SB RAS, Chita, Russia, yurgga@mail.ru

One of the most important problems in the study of ore deposits has been and remains the knowledge of their vertical zonation, as it is the basis for assessing the level of their erosion section and, consequently, predicting mineralization to depth. One of the main difficulties of this knowledge is often the lack of factual material about the variability of the mineral composition and the most important properties of minerals with depth.

Within the Verkhnealiinsky ore field in the Baleysky ore region of Eastern Transbaikalia, during its drilling exploration, it was possible to uncover ore zone V from upper to lower wedging to full depth. Its upper part, which is a zone of upper wedging, was opened by a series of ditches, and the vein itself was traced along the core of the wells from its upper part to the lower wedging. Further, the lower part of the zone of near-ore changes is traced with depth.

Samples and samples for study were taken from the core of four wells that cut through the ore zone at depth intervals (m): 27 – 34; 57 – 104; 153 – 168; 285 – 293. The quartz vein itself has a length of about 100 m along the fall, then passes into the zone of calcification, which continues to a depth of 293 m and passes into the lower zone of near-ore changes.

Using many years of experience in studying vein quartz deposits of various ore formations, a set of methods was used and selected. It included the determination of the chemical composition of vein quartz and host rocks, the degree of perfection of the crystalline structure (SCS) of quartz according to the method described in the work (Yurgenson and Tumurov, 1980), the temperatures of the α→β transition of quartz, its electrical resistivity, as well as K2O/Na2O as one of the criteria for the gold content of host ore-modified rocks (Yurgenson G.A., Yurgenson T.N., 1991).

The V ore zone studied is localized in the monzonites of the Western part of the deposit. One of the quartz veins, with a maximum thickness of about 2 m, has a length of up to 700 m, a drop of about 100 m, then passes into the zone of calcification and near-ore rocks and continues to a depth of 293 m and probably deeper, since it has not been traced to wedging. The near-ore changes of the host rocks have a maximum width of up to 6-7 m in both directions from the contacts of the quartz vein, wedging at the top at a distance of 18 m from its wedging and to a depth of about 300 m in the form of a narrow zone of quartz and quartz-tourmaline veining in propylites and berezites. In the upper part of the ore zone, near–ore changes are expressed in the form of argillation and propylitization of monzonites, alternating with depth with propylites, and partly with berezites. An increase in the proportion of mica and, partly, potassium feldspar is observed directly in the contact parts of the vein.

The vein is composed of quartz, pyrite, arsenopyrite, low-grade native gold, partly electrum, galena, sphalerite, chalcopyrite, bismuthin and tetradymite, sulfoantimonites and sulfovismuthites, native bismuth and silver are present. The pyrite of the upper part of the vein contains arsenic in the amount of 0.62 – 1.81%, and in the lower part – up to 0.55%. And only in the upper part of the vein it contains up to 0.46% of antimony, which associates with arsenic (1.25%). In the lower part of the vein, cobalt up to 0.45% appears in pyrite. A similar pattern in changes with the depth of the contents of arsenic, antimony and cobalt impurities in pyrite was revealed in 2021. in the First ore zone of the Taseevsky gold and silver deposit in Transbaikalia. Arsenopyrite in the upper part of the vein zone contains up to 0.49% antimony, and in the lower part of the impurities it contains only cobalt up to 0.05%.

Vein minerals are represented by quartz, hydromuscovite, tourmaline, kaolinite, and chlorite. Rutile and monazite-Ce were identified from accessory minerals. In the mineral productive

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

complexes of the vein, massive, banded-massive, breccia-shaped, and less often hexagonal aggregates are developed among the structural and textural varieties of quartz, but fine– and fine-grained, containing layered silicates (kaolinite, chlorite, and hydrous) predominate. A special feature of quartz is the presence of aluminum in it within hundredths of a percent, as well as in late generations and iron up to the first hundredths of a percent.

The following general sequence of mineral formation is noted: the sulfide-tourmaline-quartz aggregates of the marginal parts are replaced towards the axis of the vein by substantially quartz with sulfides and sulfosols. This sequence can be repeated repeatedly as a result of intramineralization cracking, breccation and healing. Pyrite is abundant here, developing both in feldspar inclusions and in the mass of mudstone and propylite.

As a result of cracking, the quartz-sulfide-sulfosol complex, as well as the edge parts of the veins, is breccated and cemented with a fine-grained aggregate of mica-quartz-tourmaline composition, and then dissected with finely hexagonal quartz. The structural and textural features of quartz veins vary with depth. If mainly fine-grained, sometimes chalcedony-shaped aggregates are developed in the upper parts of the vein, then at depths exceeding 100 meters or more, medium-grained, hexagonal and comb-like differences appear. This feature is reflected, as shown below, in the variations in numbers that characterize the perfection of their crystalline structure.

The results of the change in the value of the SCS with depth and in the sections of the veins themselves are shown in the table and in the figure.

Table - Results of determining the degree of perfection of the crystal structure

No	No sample	Position in section, depth, m	Vein zone intersection interval by drillholes, m	SCS value	The average of the interval
1	329	Silicification zone, 27		59	
2	330	Vein contact zone, 29		68	
3	332	Axial part of the vein, 30	27 – 34	73	63
4	335	Vein selvage, 31.5		71	
5	337	Silicification zone, 33.5		60	
6	339	Silicification fringe, 34		47	
7	340	Silicification zone, 57.5		54	
8	343	Propylitic-silicified zone, 58		56	
9	346	Contact aureole of propylitic-silicified zone, 81		67	
10	348	Vein selvage, 81.5	57 – 104	76	67.2
11	350	Axial zone of the vein, 82.3		79	
12	352	Vein selvage, 87		74	
13	353	Vein-contact silicification zone, 87.7		66.3	
14	355	Quartzification zone at the contact with host monzonites, 104		65.3	
15	357	Comb-to-prismatic, 154		86	
16	359	Prismatic-to-comb quartz in the silicified (quartzified) zone, 156	153 – 168	88	89.2
17	361	Comb quartz, 158		90	
18	363	Comb quartz from the silicified (quartzified) zone, 160.2		93	

From the data in the table and Fig. 4, it can be seen that the values of the degree of SCS are symmetrical relative to the median part of the vein: they are minimal in the zones of calcification in the sides of the vein, increasing towards the median. The pattern of changes in the magnitude of the SCS measure obtained as a result of studying the quartz-vein zone V of the Verkhnealiinskoye deposit confirms the well-known conclusions that this property of vein quartz changes naturally in individual veins, deposits and rows of ore formations (Yurgenson, 2003). This is shown by the example of several dozen deposits of the USSR of various ore formations. But for a separate vein zone from its upper wedging to the lower one, passing into near-ore-altered rocks, it was possible to do this for the first time.

Similarly, the temperatures of the α→β transition in quartz change, increasing with increasing perfection of the crystalline structure from 570.3° C in the upper section to 571.1° C in the middle and 572.3° C in the lower. The values of electrical resistivity (ρ ohms cm10^{12}) in the quartz vein and the calcification zone also increase, reaching a maximum in the area of almost continuous calcification with a SCR value of 74, and then sharply decreases in the near-ore rocks. This is due to the fact that quartz veins in the vein and its near-contact parts contain fewer impurities, and in the zone of weak hardening their number increases and the resistivity decreases. These data confirm the expediency of using electrical resistivity measurements in the search for quartz veins using electrical exploration methods.

The curves of the contents of gold, silver, and bismuth in each of the studied sections of the vein zone V, including the zones of near-ore changes, are shown in the left part of Fig. It follows from their analysis that there is a correlation between the contents of gold and bismuth, as well as silver.

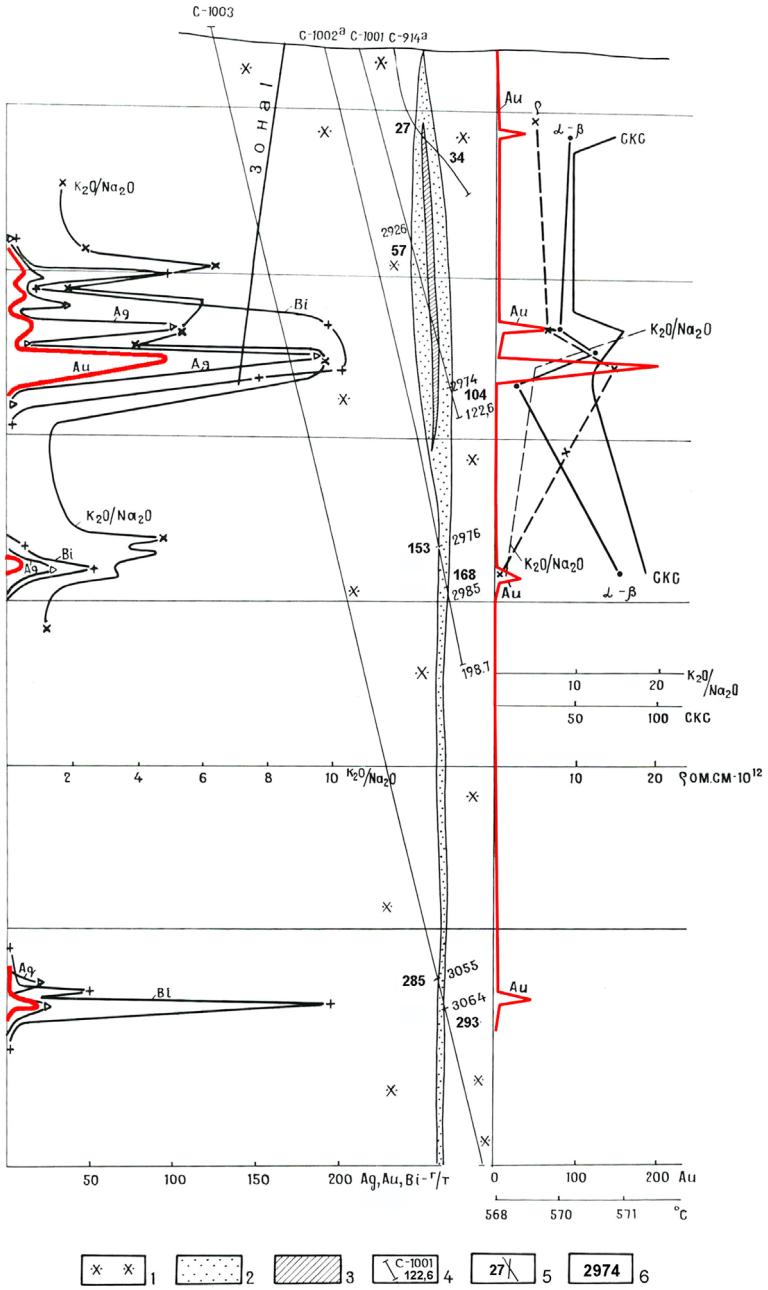


Fig. Variability of composition and properties of vein quartz and host rocks of the V ore zone of the Verkhnealiinskoye deposit. 1 – monzonites; 2 – zone of near–ore changes; 3 - sulfide–quartz

vein; 4 – well and its number; 5 - projection of the line of intersection of the vein zone by the well and a mark in m of its depth; 6 – sample number.

But the halos of increased silver content go beyond the core itself. At the same time, K2O/N2O clearly reflects both the vein zone as a whole and the increased gold content in the quartz vein. Analysis of data on variability with depth of gold, silver and bismuth showed that within the quartz vein, the gold content increases with depth, decreasing in the zone of lower wedging while maintaining industrial concentrations, and persists in the zone of hardening to a depth of 293 m. At the same time, it is accompanied by bismuth concentrations that increase with depth. At the same time, the silver content decreases and the gold content increases. As bismuth increases, the gold content increases. This trend is emphasized by the fact that the amount of sulfosols and galena associated with silver decreases with depth, and the proportion of tetradymite increases, which is a carrier not only of bismuth, but most importantly of tellurium, with which a significant part of gold is transported.

Conclusions 1. For the first time, using the example of the quartz-vein zone V of the Verkhnealiinsky gold deposit, from its upper to lower wedging, a set of studies was performed, including measurements of the degree of perfection of the crystalline structure (SCS), temperatures of the α→β transition and electrical resistivity. 2. The possibility of using the SKS value in combination with data on the content of gold, silver and bismuth to assess the level of erosive shear of newly discovered gold occurrences both in individual sections by drilling wells and in the form of landfills or bedrock outcrops of quartz veins has been confirmed.

The work was carried out within the framework of the state task on the topic No. FUFR-2021-0005.

Neotectonic Controls on Large-Scale Uranium Mineralization in the Meso-Cenozioc Basins, Northern China

Cheng Yinhang[1, 2], Jin Ruoshi[1, 2], Miao Peisen[1, 2]
[1]Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China, e-mail: weicheng1858@163.com; [2]Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Anomalous uranium enrichment has been notably observed in the Mesozoic-Cenozoic terrestrial basins of Northern China, prompting a critical discussion of the driving force. Sandstone-hosted uranium deposits are very susceptible to tectonic uplift events due to their hydrological mobility, dynamic nature, and vulnerability to dispersal and concentration. These events have significant influence on the redistribution and enrichment of uranium, with their impact being markedly pronounced within the Cenozoic tectonic regime. Our investigation centers on the spatiotemporal dynamics of the Eurasian, Indian, and Pacific Plates during the Cenozoic and their association with the regional uranium mineralization. The study outlines two crucial findings: Firstly, the initiation of the collision between the Eurasian and Indian Plates in the Paleocene, culminating in significant uplift during the Miocene, gave rise to the expansive Tibetan Plateau. This tectonic upheaval led to the reconfiguration of adjacent basins, thereby engendering environments conducive to the enrichment of uranium within notable basins such as Junggar, Ili, Qaidam and so on. Secondly, the northwestward subduction of the Pacific Plate beneath the Eurasian Plate throughout the Oligocene-Miocene interval induced swift uplifts and fostered the formation of fold-thrust fault systems within basins like Hailar and Ordos, further facilitating uranium enrichment. The chronology of uranium mineralization across these northern basins, spanning both Mesozoic and Cenozoics, predominantly aligns with the Oligocene-Miocene, with a conspicuous surge noted in the post-Miocene period (< 25 Ma). This chronology correlates with the significant uplift events that follow the collision between the Eurasian and Indian Plates and the subduction of the Pacific plate, thereby laying the foundational conditions for the observed uranium enrichment. Taking these results into consideration, the study proposes a novel taxonomic approach for the classification of sandstone-hosted uranium deposits in the terrestrial basins of Northern China, delineating those influenced by Tethys dynamics from those associated with Pacific dynamics. This classification provides a nuanced understanding of the ore-forming environments, evolutionary patterns, and mechanistic processes pertinent to sandstone-hosted uranium deposits, thereby contributing significantly to the theoretical discourse within the geosciences.

*Неотектонический контроль крупномасштабной урановосности в мезо-кайнозойских впадинах Северного Китая

Чэн Иньхан[1,2] Цзинь Жоши[1,2], Мяо Пэйсэн[1,2]
[1]Тяньцзиньский центр Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай, e-mail: weicheng1858@163.com; [2]Ключевая лаборатория геологии урана, Геологическая служба Китая, Тяньцзинь 300170, Китай

Аномальное обогащение ураном чётко прослеживается в мезо-кайнозойских континентальных впадинах Северного Китая, что вызывает необходимость обсуждения факторов, определяющих данный процесс. Урановые месторождения, приуроченные к песчаникам, обладают высокой чувствительностью к тектоническим поднятиям из-за своей гидродинамической подвижности, динамической природы и склонности к перераспределению и концентрации. Подобные тектонические события оказывают существенное влияние на перераспределение и обогащение урана, особенно ярко проявляющееся в условиях кайнозойского тектонического режима.

Наше исследование сосредоточено на пространственно-временной динамике Евразийской, Индостанской и Тихоокеанской плит в течение кайнозоя и их взаимосвязи с региональной урановосностью. В ходе исследования получены два ключевых результата:

Во-первых, начавшаяся в палеоцене коллизия Евразийской и Индостанской плит, достигшая своего пика в миоцене, привела к формированию обширного Тибетского нагорья. Этот тектонический подъём вызвал перестройку прилегающих впадин, создав благоприятные условия для обогащения ураном в таких значимых бассейнах, как Джунгарский, Или, Цайдам и других.

Во-вторых, северо-западная субдукция Тихоокеанской плиты под Евразийскую плиту в интервале от олигоцена до миоцена вызвала резкие поднятия и способствовала формированию складчато-надвиговых систем в таких впадинах, как Хайлар и Ордос, что дополнительно стимулировало накопление урана.

Хронология уранообразования в этих северных впадинах, охватывающая как мезозой, так и кайнозой, в основном совпадает с интервалом олигоцен–миоцен, при этом отчётливо выражен всплеск в постмиоценовую эпоху (< 25 млн лет). Эта временная корреляция тесно связана с основными тектоническими событиями — коллизией Евразийской и Индостанской плит, а также субдукцией Тихоокеанской плиты, что и создало фоновую тектоническую обстановку, благоприятную для уранонакопления.

С учётом полученных данных в работе предлагается новая таксономическая схема классификации урановых месторождений в песчаниках континентальных впадин Северного Китая, разграничивающая месторождения, контролируемые тетисской динамикой, и месторождения, формирование которых связано с влиянием Тихоокеанской плиты. Такая классификация позволяет глубже понять условия рудообразования, закономерности их эволюции и механизмы накопления урана, что вносит значимый вклад в развитие теоретических основ геологических наук.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Exudative Mineralization of Sandstone-type Uranium Deposits in the Lower Cretaceous of the Ordos Basin

Feng He., Ziying Li, Zilong Zhang
Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, China, e-mail: hefeng@briug.cn

The Ordos Basin serves as a crucial resource base for sandstone-type uranium deposits in China, with significant exploration breakthroughs recently achieved in the Lower Cretaceous strata. Research indicates that the Luohe and Huanhe formations of the Lower Cretaceous are the primary uranium-hosting horizons, exhibiting substantial exploration potential. The Triassic uranium-rich source rocks generate oil-gas-uranium-bearing fluids, which may serve as a deep-source for uranium mineralization. Fault systems play a pivotal role in facilitating the connection between these oil, gas, and uranium-bearing fluids, promoting the migration of reducing agents and deep uranium-bearing fluids. Paleo-structural mapping reveals that the southwestern part of the Ordos Basin has a predominantly north-south oriented structural pattern. From west to east, it comprises the Western Margin Faulted Fold Belt, the central Tianhuan Depression, and the eastern Yishan Ramp. Uranium mineralization is primarily located in the nose-like uplifts of the Western Margin Faulted Fold Belt and the eastern ramp area. These paleo-uplifts, which are favorable zones for oil and gas accumulation, also represent favorable structural settings for uranium mineralization. Exudative uranium mineralization is closely related to the genesis minerals of deep exudative uranium-rich, polymetallic, and organic-rich fluids, including asphaltic organic matter, dolomite, apatite, calcite, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, and anatase.

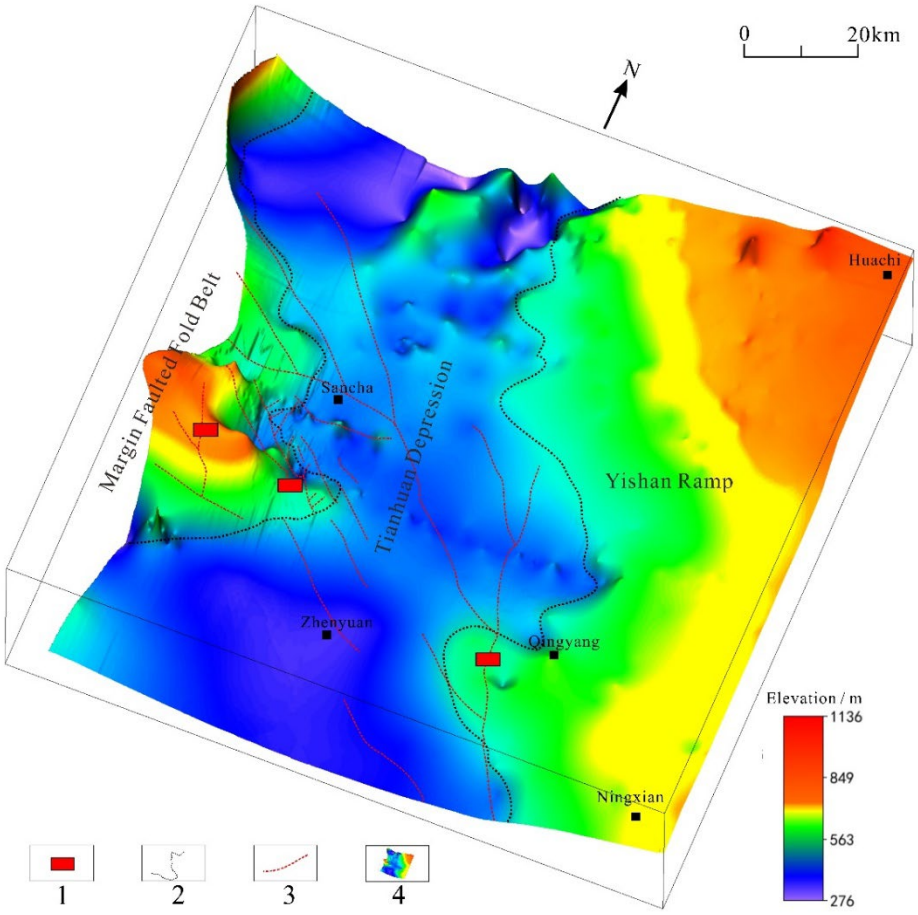


Fig.1 Palaeogeomorphology and uranium mineralization distribution of Lower Cretaceous in the southwestern Ordos Basin

1.Uranium mineralization area; 2.Boundary of structural units; 3.Ore-controlling faults; 4.Structure of the top surface of the Luohe Formation.

The exudative uranium mineralization system primarily involves the process where uranium-rich oil shale and dark mudstone in the Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Formation, after being buried to a certain depth, enter the stage of organic matter thermal maturation. The resulting uranium-rich and organic-rich fluids migrate vertically along faults from the uranium-rich hydrocarbon source rocks of the Chang 7 Member to the Lower Cretaceous red heterogeneous layers. These fluids then migrate laterally within permeable sand bodies, such as the interface between the Huanhe and Luohe Formations, alluvial fans, and aeolian sands, reducing the red sandstone to gray-green sandstone. Ultimately, uranium mineralization occurs within these gray-green post-reduced sand bodies. For example, at the Xinzhuang mineral occurrence in northern Zhenyuan, the lower segment of the Huanhe Formation and the Luohe Formation host the mineralization, with the main ore-bearing lithology being gray-green medium-fine sandstone, along with some red conglomeratic sandstone and yellow sandstone. Oil-stained sand is often observed at the top of the uranium mineralization, and the mineralization depth is generally greater than 1,000 meters. The superposition and transformation of infiltration and exudative fluid systems also play a significant role in uranium mineralization, forming a combined infiltration-exudative mineralization process, with mineralization depths typically ranging between 800 and 1,000 meters.

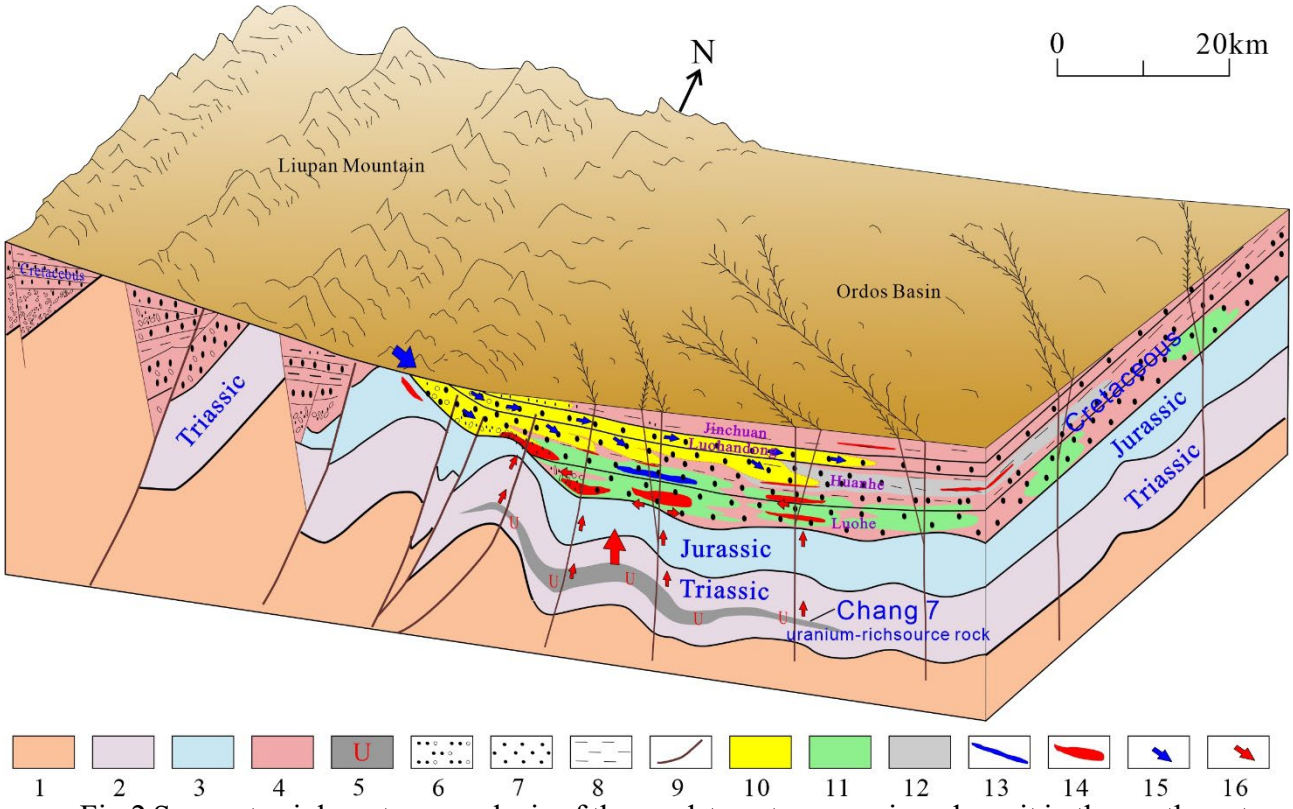


Fig.2 Source to sink systems analysis of the sandstone type uranium deposit in the southwestern Ordos basin

1. Basement; 2. Triassic; 3. Jurassic; 4. Cretaceous; 5. Uranium-rich hydrocarbon source rock; 6. Conglomerate sandstone; 7. Sandstone; 8. Mudstone; 9. Fault; 10. Secondary oxidized sand body; 11. Secondary reduced gray-green sand body; 12. Primary gray sand body; 13. Uran ium mineralization; 14. Industrial uranium ore body; 16. Infiltration flow path; 17. Exudation flow path.

The mechanism of sandstone-type uranium mineralization has been analyzed, and in conjunction with existing exploration results, the ore-controlling structures, sedimentary configurations, alterations, modifications, and mineralization characteristics of the Lower Cretaceous strata have been summarized. New "exudation" methods for identifying uranium mineralization in Lower Cretaceous sandstone include: (1) combining information from the upper red and lower dark sedimentary formations, (2) identifying the pathways connecting the upper red formation with the

lower dark formation, and (3) locating the gray-green sandstone units within the red-mottled formation that host uranium mineralization. This innovative mechanism and model of exudative sandstone-type uranium deposits aim to guide metallogenic predictions and exploration efforts for uranium deposits.

1. Li Ziying, Qin Mingkuan, Guo Qingyin, He Feng., et al. Metallogenic Prediction and Exploration Indication of Exudative SandstoneType Uranium Deposit. Uranium Geology. 2024. 40 (1): 1-15.
2. Li Ziying, LIU Wusheng, LI Weitao, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1009-1047.
3. ZHANG Zilong, HE Feng, LI Ziying, et al. Material composition characteristics of uranium ore of Zhidan group in Zhenyuan area, southwest Ordos basin [J]. Uranium Geology, 2023, 39 (6)：892-903.
4. He Feng, Zhang Zilong, Liu Hongxu., et al. Palaeogeomorphic restoring of the Jurassic Zhiluo Formation and its effect on uranium mineralization in Binxian area, southern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography. 2017. 19(04):692-702.
5. HE Feng, ZHANG Zilong, WU Zhengqian, et al. Source-to-sink system of sandstone uranium mineralization[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(3):419-433.
6. Liu xinyang, He Feng, Kuai Hongbing., et al. Prospecting Direction of Lower Cretaceous Sandstone Type Uranium Deposit in Ordos Basin. Uranium Geology. 2022. (002): 038.
7. Wang Tingting, Qiu Linfei, He Feng., et al. Characteristics and geological implications of ore-forming fluids of the Lower Cretaceous U-bearing sandstones in the southwestern Ordos basin. World Nuclear Geoscience. 2024.41(06): 1089-1105.

*Экссудативная минерализация урановых месторождений в песчаниках нижнемеловых отложений Ордосского бассейна

Фэн Хэ, Цзыин Ли, Цзилун Чжан
Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, Пекин, Китай, e-mail: hefeng@briug.cn

Ордосский бассейн является важнейшей ресурсной базой песчаниковых урановых месторождений Китая. В последние годы в нижнемеловых отложениях здесь достигнуты значительные успехи в разведке. Исследования показывают, что свиты Лохэ и Хуаньхэ нижнего мела являются основными ураноносными горизонтом с высоким потенциалом рудоносности. Уран-содержащие нефтегазовые флюиды, формирующиеся в триасовых урановых породах-источниках, могут служить глубинным источником урана. Разломные системы играют ключевую роль, обеспечивая связь между нефтью, газом и ураном, способствуя миграции восстановителей и глубинных ураносодержащих флюидов.

Палеоструктурное картирование показывает, что юго-западная часть Ордосского бассейна характеризуется преимущественно меридиональным (с севера на юг) строением. С запада на восток здесь выделяются: сбросо-складчатый пояс западной окраины, центральная депрессия Тяньхуань и восточная зона наклонного поднятия Ишань. Урановая минерализация в основном локализуется в поднятиях носовидной формы сбросо-складчатого пояса западной окраины и в зоне восточного наклонного поднятия. Эти палеоподнятия, благоприятные для аккумуляции нефти и газа, также создают благоприятные тектонические условия для формирования урановых месторождений. Экссудативная урановая минерализация тесно связана с минералами, сопровождающими глубинные ураносодержащие полиметаллические и органоносные флюиды, такими как асфальтовое органическое вещество, доломит, апатит, кальцит, пирит, халькопирит, сфалерит и анатаз.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

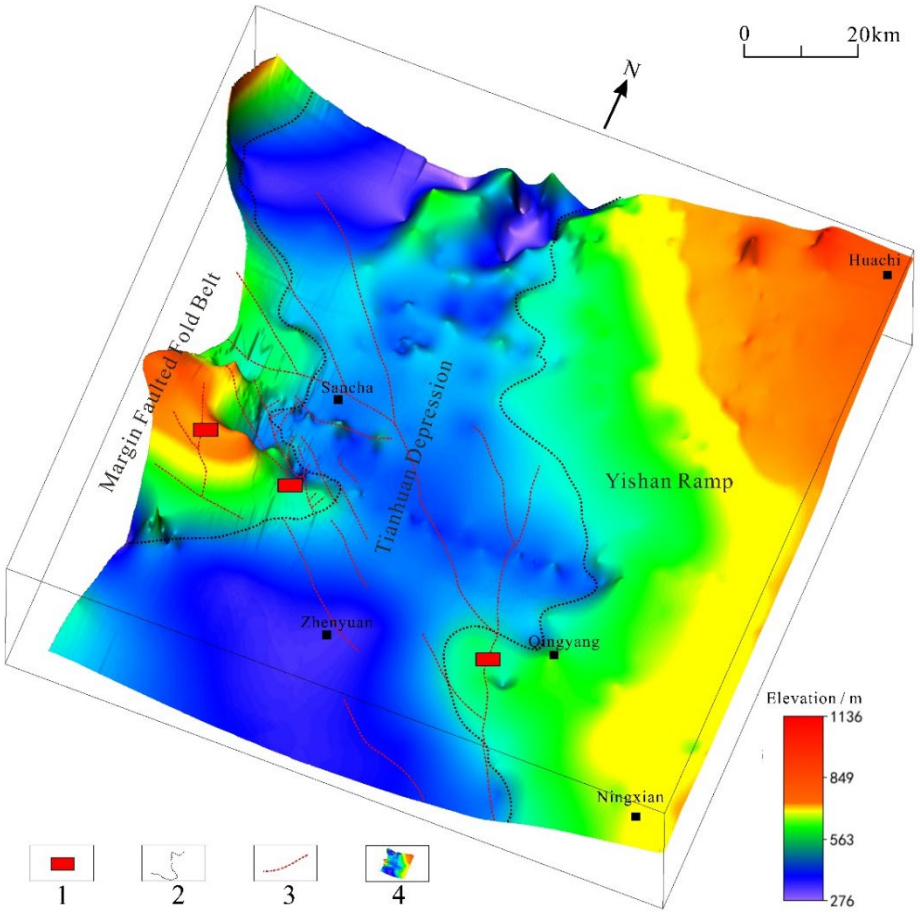


Рис. 1. Палеогеоморфология и распределение урановой минерализации в нижнем мелу юго-западной части Ордосского бассейна. 1 — зона урановой минерализации; 2 — граница структурных единиц; 3 — рудоконтролирующие разломы; 4 — структура кровли свиты Лохэ.

Система экссудативной урановой минерализации в первую очередь включает процессы, при которых уран-содержащие сланцы и тёмноцветные аргиллиты члена Чан7 янчанской свиты триаса, достигнув определённой глубины захоронения, переходят в стадию термального преобразования органического вещества. Образующиеся уран- и органоносные флюиды мигрируют по разломам из ураносодержащих нефтематеринских пород Чан7 в красноцветные гетерогенные отложения нижнего мела. Затем они распространяются латерально по проницаемым песчаным телам, таким как граница между свитами Хуаньхэ и Лохэ, аллювиальные конусы и эоловые пески, восстанавливая красные песчаники до серо-зелёных. В конечном итоге урановая минерализация формируется именно в этих восстановленных серо-зелёных песчаниках.

Например, на проявлении Синьчжуан (север Чжэньюаня) урановая минерализация приурочена к нижней части свит Хуаньхэ и Лохэ. Главными рудоносными литотипами являются серо-зелёные средне- и мелкозернистые песчаники, а также местами — красные конгломератоподобные и жёлтые песчаники. В верхней части зон урановой минерализации часто наблюдаются нефтяные пятна, а глубина залегания рудных тел обычно превышает 1000 м. Сложное наложение и трансформация инфильтрационных и экссудативных флюидных систем также играет важную роль, формируя комбинированный механизм инфильтрационно-экссудативной минерализации с характерными глубинами 800–1000 м.

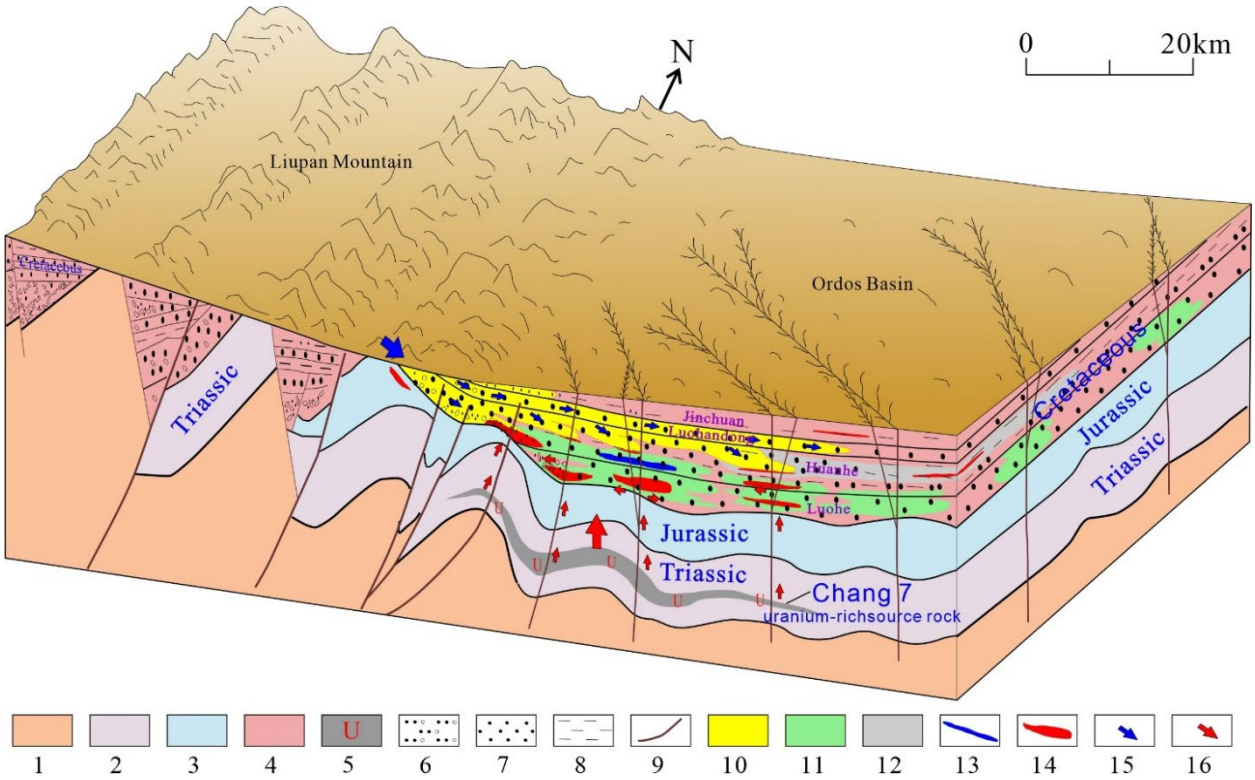


Рис. 2. Анализ системы от источника к приёмнику песчаниковых урановых месторождений юго-западной части Ордосского бассейна. 1 — фундамент; 2 — триас; 3 — юра; 4 — мел; 5 — ураносодержащая нефтематеринская порода; 6 — конгломератоподобный песчаник; 7 — песчаник; 8 — аргиллит; 9 — разлом; 10 — вторично окисленный песчаник; 11 — вторично восстановленный серо-зелёный песчаник; 12 — первичный серый песчаник; 13 — урановая минерализация; 14 — промышленное урановое рудное тело; 16 — путь инфильтрационного потока; 17 — путь экссудативного потока.

В результате анализа механизма формирования песчаниковых урановых месторождений, а также на основе имеющихся данных разведки, обобщены рудоконтролирующие структуры, осадочные комплексы, процессы изменений и преобразований, а также характеристики минерализации нижнемеловых отложений. Предложены новые методы выявления урановой минерализации экссудативного типа в нижнемеловых песчаниках:

1. анализ сочетания верхних красноцветных и нижних тёмных отложений,
2. выявление путей, соединяющих эти две стратиграфические зоны,
3. локализация серо-зелёных песчаников в пределах красноцветной формации, вмещающих урановую минерализацию.

Предложенный инновационный механизм и модель экссудативной песчаниковой урановой минерализации направлены на повышение точности прогноза рудоносности и оптимизацию поисковых работ.

1. Li Ziying, Qin Mingkuan, Guo Qingyin, He Feng., et al. Metallogenic Prediction and Exploration Indication of Exudative SandstoneType Uranium Deposit. Uranium Geology. 2024. 40 (1): 1-15.
2. Li Ziying, LIU Wusheng, LI Weitao, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Geologyin China, 2022, 49(4): 1009-1047.

3. ZHANG Zilong, HE Feng, LI Ziying, et al. Material composition characteristics of uranium ore of Zhidan group in Zhenyuan area，southwest Ordos basin [J]. Uranium Geology，2023，39 (6)：892-903.
4. He Feng, Zhang Zilong, Liu Hongxu., et al. Palaeogeomorphic restoring of the Jurassic Zhiluo Formation and its effect on uranium mineralization in Binxian area, southern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography. 2017. 19(04):692-702.
5. HE Feng，ZHANG Zilong，WU Zhengqian，et al. Source-to-sink system of sandstone uranium mineralization[J]. World Nuclear Geoscience，2024，41(3):419-433.
6. Liu xinyang, He Feng, Kuai Hongbing., et al. Prospecting Direction of Lower Cretaceous Sandstone Type Uranium Deposit in Ordos Basin. Uranium Geology. 2022. (002): 038.
7. Wang Tingting, Qiu Linfei, He Feng., et al. Characteristics and geological implications of ore-forming fluids of the Lower Cretaceous U-bearing sandstones in the southwestern Ordos basin. World Nuclear Geoscience. 2024.41(06): 1089-1105.

In-situ SIMS U-Pb dating and oxygen isotope study of cassiterite from polymetallic mineralization in Xiangshan uranium ore field

GUO Jian, HE Sheng
[1]National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China; [2]Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; [3]CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Techniques, Beijing 100029, China, e-mail: guojian9818@briug.cn

The Xiangshan orefield, located in Fuzhou, Jiangxi province, is a typical representative of volcanic-type uranium deposit in China and has been investigated for about 60 years (Guo et al., 2020; Li et al., 2016). Within a range of 300 square kilometers, over 30 uranium deposits/occurrences were discovered, and most of them were kept above the depth of 500 meters. At long-term exploration and study, geologists have accumulated many sources about structural evolution (e.g., Li et al., 2014), magmatism (e.g., Guo et al., 2016), ore-forming fluid (e.g., Fan et al., 2013) and metallogenic age (e.g., Liu et al., 2015). In the recent decade, a lot of polymetallic mineralization under the uranium ore (700m-2000m), discovered by deep drilling, has attached wide attention as a new focus of metallogenic research. So far, studies on polymetallic mineralization is just on the ascent, and several studies in Chinese refers to the mineralogy, metallogenic characteristics, fluid inclusion, and ore genesis (Guo et al., 2018; Wang et al., 2014; Wu et al., 2014; Nie et al., 2015; Wang et al., 2015) . There is still a lack of research on the determination of the era of multi metals

So far, almost 30 uranium deposits have been discovered, mainly distributed in the western and northern Xiangshan. Uranium mineralization occurs in fractures attached to NE-trending faults, which cut the volcanic-intrusive complex without dependence on wall rock. Polymetallic mineralization has been discovered at depths of 500–1500 meters below uranium ore bodies, such as in the Niutoushan area (boreholes ZK26-9, ZK26-11, ZK26-101), the Heyuanbei area (CUSD3), and the Niuonaoshang area (CUSD1). The mineralization occurs in both overlying volcanic rocks and basement metamorphic rocks, showing no selectivity toward host rocks. Spatially, the two mineralization types (uranium and polymetallic) exhibit a vertical zoning characterized by "uranium above and polymetallic below".

Uranium mineralization occurs in cataclastic rhyolite at shallow depths of 200-900 meters in borehole CUSD1, with strongly developed hydrothermal alteration such as albitization, hematitization, fluoritization, carbonatization, and pyritization. The ore exhibits vein-type and stockwork-type mineralization. The main ore minerals are pitchblende, brannerite, conffinite, thorite, pyrite, minor molybdenite, chalcopyrite, galena, sphalerite, and native bismuth. The main gangue minerals are calcite, fluorite, quartz, apatite, minor rutile and monazite.

Polymetallic mineralization occurs within the deep-seated basement metamorphic rocks at vertical depth of 1400-2800 meters in borehole CUSD1, primarily characterized by hydrothermal alterations such as silicification, carbonatization, sericitization, and chloritization. The main ore minerals are galena, sphalerite, arsenopyrite, pyrite, pyrrhotite, minor chalcopyrite, and argentite. The main gangue minerals are quartz, calcite, siderite, minor sericite, chlorite, and cassiterite.

This study used SIMS technology to determine the U-Pb isotope composition of cassiterite and obtained the formation age of polymetallic mineralization. Simultaneously utilizing oxygen isotope testing of cassiterite and quartz, the sources of ore-forming fluids for polymetallic mineralization and the binary mixing ratio of atmospheric precipitation and magmatic fluids were obtained. The analysis of cassiterite U-Pb and oxygen isotopes was completed at the Beijing Research Institute of Uranium Geology.

This study conducted U-Pb age testing on 18 measuring points of cassiterite, and the test results showed that the SIMS uranium lead age of cassiterite was 135.2±6.8Ma, very close to the volcanic rock mineralization age (135-132Ma) of the Xiangshan ore field, significantly earlier than the polymetallic mineralization age (100-90Ma) of the Xiangshan ore field.

The oxygen isotope compositions of cassiterite and quartz are between (3.68-5.52) and (11.2-13.8), respectively, indicating that cassiterite mainly comes from magmatic fluids, while quartz mainly comes from shallow atmospheric precipitation fluids. Using first principles and oxygen isotope data, a study was conducted on the mixing ratio of binary fluids in polymetallic mineralization. The results showed that during the process of magma and atmospheric precipitation mixing mineralization, the mixing ratio of atmospheric precipitation could reach 0.35, and the ore-forming fluid was mainly magmatic fluid, but atmospheric precipitation still played a relatively important role.

Based on the above research, this article preliminarily analyzes the process of polymetallic mineralization in the Xiangshan ore field. Following the large-scale volcanic and magmatic activity in Xiangshan, polymetallic mineralization occurred in the Xiangshan ore field, mainly located in the deep part of the ore field. The ore-forming fluid mainly comes from deep source magma. During the upward migration of ore-forming materials, it encountered shallow atmospheric precipitation and underwent binary fluid mixing, resulting in the enrichment and precipitation of polymetallic elements and mineralization formation.

1. Cannon, R. S., Pierce, A. P., Antweiler, J. C., & Buck, K. L. (1961). The data of lead isotope geology related to problems of ore genesis. Economic Geology, 56(1), 1-38.
2. GUO J.， LI Z. Y.， NIE J. T.， HUANG Z. Z., LI X. Z., WANG J., & WANG J. F. (2020). Trace-element geochemistry characteristics of pyrite in polymetallic mineralization in the depth of Xiangshan uranium orefield， Jiangxi Province. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(03), 257-266.
3. Guo, J., Li, Z., Nie, J., Huang, Z., Wang, J., & Lai, C. K. (2018). Genesis of Pb–Zn mineralization beneath the Xiangshan uranium orefield, South China: Constraints from H–O–S–Pb isotopes and Rb–Sr dating. Resource Geology, 68(3), 275-286.
4. LI Z. Y., & ZHANG W. L. (2016). Main uranium mineralization types and their comparison of geochemical characteristics in Xiangshan orefield， Jiangxi. Geoscience， 30(1), 1-16.
5. FAN H. H.， LING H. F.， WANG D. Z.， LIU C. S., SHEN W. Z., & JIANG Y. H. (2003). Study on metallogenic mechanism of Xiangshan uranium ore-field . Uranium Geology， 4(4), 208-213.
6. LI Z. Y.， HUANG Z. Z.， LI X. Z.， ZHANG J. D., LIN Z. Y., & ZHANG Y. Y. (2014). Xiangshan igneous rocks and uranium mineralization. Beijing：Geological Publishing House.
7. GUO F. S.， YANG Q. K.， MENG X. J.， XIE C. F., SHI G., CHEN L. Q., & LUO N. H. (2016). Geochemical characteristics and petrogenesis of the acidic volcanic-intrusive complexes， Xiangshan， Jiangxi. Acta Geologica Sinica， 90(4), 769–784.

*U-Pb датирование методом SIMS и исследование изотопов кислорода касситерита из полиметаллической минерализации уранового рудного месторождения Сяншань

Го Цзянь, Хэ Шэн
[1]Национальная лаборатория по разведке и добыче урановых ресурсов и ядерному дистанционному зондированию, Пекин 100029, Китай
[2]Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, Пекин 100029, Китай
[3]Ключевая лаборатория КНКК по разведке и оценке урановых ресурсов, Пекин 100029, Китай, e-mail: guojian9818@briug.cn

Уранорудный район Сяншань, расположенный в г. Фучжоу провинции Цзянси, представляет собой типичный вулканогенный урановый объект Китая, изучаемый на протяжении более 60 лет (Guo et al., 2020; Li et al., 2016). На территории около 300 км² выявлено более 30 урановых месторождений и проявлений, большинство из которых расположены на глубине до 500 м. В ходе многолетних исследований накоплены обширные данные о структурной эволюции (Li et al., 2014), магматизме (Guo et al., 2016), рудоносных флюидах (Fan et al., 2013) и возрасте минерализации (Liu et al., 2015).

В последние десять лет в процессе глубинного бурения на глубинах 700–2000 м под урановыми телами была открыта полиметаллическая минерализация, что привлекло значительное внимание исследователей и стало новым направлением металлогенетических работ. Пока исследования полиметаллической минерализации находятся на начальном этапе. Несколько публикаций на китайском языке освещают минералогию, рудообразующие особенности, включения флюидов и генезис руд (Guo et al., 2018; Wang et al., 2014; Wu et al., 2014; Nie et al., 2015; Wang et al., 2015). Однако определение возраста этой минерализации остаётся недостаточно изученным.

На сегодняшний день в районе Сяншань выявлено около 30 урановых месторождений, преимущественно в западной и северной частях района. Урановая минерализация приурочена к трещинам, связанным с субширотными разломами, которые пересекают вулкано-интрузивный комплекс и не зависят от вмещающих пород. Полиметаллическая минерализация зафиксирована на глубинах 500–1500 м ниже урановых руд, в районах Нютоушань (скважины ZK26-9, ZK26-11, ZK26-101), Хэюаньбэй (CUSD3) и Нюонаошан (CUSD1). Она наблюдается как в перекрывающих вулканических породах, так и в метаморфических породах фундамента, без выраженной литологической избирательности. Пространственно эти два типа минерализации образуют вертикальную зональность: «уран сверху, полиметаллы снизу».

В скважине CUSD1 урановая минерализация локализована в катаклазированном риолите на глубинах 200–900 м. Сильно развиты гидротермальные изменения: альбитизация, гематитизация, флюоритизация, карбонатизация и пиритизация. Типы оруденения — жильный и штокверковый. Основные рудные минералы: уранинит, браннерит, коффинит, торит, пирит; в меньших количествах — молибденит, халькопирит, галенит, сфалерит и самородный висмут. Главные породообразующие минералы: кальцит, флюорит, кварц, апатит; второстепенные — рутил и монацит.

Полиметаллическая минерализация зафиксирована в глубинных метаморфических породах фундамента на глубинах 1400–2800 м (скважина CUSD1). Характеризуется гидротермальными изменениями: кремнизация, карбонатизация, серицитизация и хлоритизация. Основные рудные минералы: галенит, сфалерит, арсенопирит, пирит, пирротин; второстепенно — халькопирит и аргентит. Главные породообразующие минералы: кварц, кальцит, сидерит; в меньших количествах — серицит, хлорит и касситерит.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

В настоящем исследовании методом SIMS (вторичная ионная масс-спектрометрия) было выполнено определение изотопного состава U–Pb в касситерите, что позволило установить возраст полиметаллической минерализации. Параллельно выполнены изотопные анализы кислорода в касситерите и кварце, позволившие оценить источники рудоносных флюидов и определить соотношение смешения метеорных и магматических вод. Все анализы были выполнены в Пекинском НИИ геологии урана.

Проведено U–Pb-датирование 18 точек касситерита. Возраст по SIMS составил 135,2±6,8 млн лет, что близко к возрасту вулканической минерализации (135–132 млн лет) в районе Сяншань, но значительно раньше ранее предполагаемого возраста полиметаллической минерализации (100–90 млн лет).

Изотопный состав кислорода в касситерите и кварце составил соответственно 3,68–5,52‰ и 11,2–13,8‰. Это указывает на магматическое происхождение касситерита и на метеорное происхождение кварца. На основе этих данных и теоретических моделей было рассчитано соотношение смешения двух типов флюидов: в процессе формирования полиметаллической минерализации доля метеорной составляющей могла достигать 35%. Несмотря на преобладание магматического компонента, метеорные воды играли заметную роль в минерализационном процессе.

На основе проведённых исследований выполнен предварительный анализ процесса полиметаллической минерализации в районе Сяншань. После масштабной вулканической и магматической активности происходила полиметаллическая минерализация, сосредоточенная в глубинных частях рудного поля. Рудоносные флюиды имели преимущественно магматическое происхождение. При их восходящей миграции происходило смешение с метеорными водами, что способствовало обогащению руд и осаждению полиметаллов.

1. Cannon, R. S., Pierce, A. P., Antweiler, J. C., & Buck, K. L. (1961). The data of lead isotope geology related to problems of ore genesis. *Economic Geology*, 56(1), 1–38.
2. Guo J., Li Z. Y., Nie J. T., Huang Z. Z., Li X. Z., Wang J., & Wang J. F. (2020). Trace-element geochemistry characteristics of pyrite in polymetallic mineralization in the depth of Xiangshan uranium orefield, Jiangxi Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(03), 257–266.
3. Guo, J., Li, Z., Nie, J., Huang, Z., Wang, J., & Lai, C. K. (2018). Genesis of Pb–Zn mineralization beneath the Xiangshan uranium orefield, South China: Constraints from H–O–S–Pb isotopes and Rb–Sr dating. *Resource Geology*, 68(3), 275–286.
4. Li Z. Y., & Zhang W. L. (2016). Main uranium mineralization types and their comparison of geochemical characteristics in Xiangshan orefield, Jiangxi. *Geoscience*, 30(1), 1–16.
5. Fan H. H., Ling H. F., Wang D. Z., Liu C. S., Shen W. Z., & Jiang Y. H. (2003). Study on metallogenic mechanism of Xiangshan uranium ore-field. *Uranium Geology*, 4(4), 208–213.
6. Li Z. Y., Huang Z. Z., Li X. Z., Zhang J. D., Lin Z. Y., & Zhang Y. Y. (2014). *Xiangshan igneous rocks and uranium mineralization*. Beijing: Geological Publishing House.
7. Guo F. S., Yang Q. K., Meng X. J., Xie C. F., Shi G., Chen L. Q., & Luo N. H. (2016). Geochemical characteristics and petrogenesis of the acidic volcanic-intrusive complexes, Xiangshan, Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*, 90(4), 769–784.

A new exudation Metallogeny and model for uranium deposit in the red-mottled sedimentary sandstone system in northern basins of China

LI Ziying, QIN Mingkuan, QIU Linfei, TIAN Mingming, HE Feng, ZHOING Jun, LIU Wusheng, LIU Chiheng, WANG Junxian, ZHANG Yunlong, WANG Wenquan, JI Hongwei, HAN Meizhi, LI Weitao, LI Menghua
Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, China, email: lzy@briug.cn

The recently discovered uranium deposits occur in the red-mottled sedimentary sandstone system in northern basins of China, such as Hadatu deposit in Erlian basin and Hailijin deposit in south part of Songliao basin and Xinzhuang deposit in south Ordos basin etc. Unlike traditional sandstone-type uranium deposits, the uranium orebodies of these deposits exhibit multiple stratiform and tabular morphologies, which occur in grey-greenish sandstone layers within the red-mottled sandstone units, but do not appear to be controlled by a redox zone. The ore-bear grey-greenish sandstone layers display islet-, bead-like shapes in the bedding plane, and lens- and trumpet- or mushroom-like shapes in profile. These ore-bearing layers are associated with faults. The colour of ores can be reddish to dark, which are geochemically rich in uranium, copper, lead, cobalt, nickel and zinc etc, showing similar element association of the source rocks rich in organic material below the ore beds. The uranium mineral is dominated by uranite and coffinite, which are often associated with copper-, lead-, zinc-sulfide etc.. Uranium is closely related with organic material which is mostly determined to be bitumen. Multiple ages of the deposit have been determined to be Paleogene or Neogene, much younger than the hosted rocks. These signatures of these uranium deposits can not be explained in terms of the traditional infiltration (phreatic and interlayer oxidization-reduction) metallogenic theory.

Based on a comprehensive studies on the orebodies, the ore-controlling grey-greenish sandstone layers, isotope, organic and inorganic geochemistry, mineralogy, fluid inclusion of the mentioned deposits, a new exudation uranium Metallogeny and model for the formation of the deposit has been established, which can be defined as the metallogenic uranium and fluid come from the deeply buried organic matter and uranium-rich sedimentary formation (including hydrocarbon-sources rocks), which are of relatively high temperature and pressure with abundant soluable organic uranium and associated element-binded compound or complex. The uranium-bearing fluid rise up to low stress places through channel like faults and their physical-chemical conditions change rapidly such as temperature, pressure, Eh, pH etc., which lead to that the compound/complex disintegrate or unstable. Uranium & associated elements precipitate to be enriched for formation of the deposit (Fig.1). Its key points can be described as follows:

1. Origin of ore-hosting bed: The ore-hosting red-mottled formation is evidenced to be syngenetic in origin, resulting from oxidization during primary sediment deposition. By contrast, the ore-controlling grey sandstone layers in the uranium-bearing formation are epigenetic in origin, resulting from secondary reduction by deep-seated organic matter-rich reducing fluids that were mainly controlled by faults that connect the lower dark and upper red-mottled parts of the sedimentary system in a basin.

2. Source of uranium: The uranium is believed to be from deep-seated dark sediments rich in uranium-included various metals and organic materials. Both thermal simulation and organic acids leaching experiments on uranium-rich shale show that uranium can be leached and migrated out, which is also evidence by the deeply derived organic materials together with uranium and geochemical trace elements pattern similar to the mentioned source rocks etc. Those elements also come from the same deep-seated source rocks.

3. Ore-forming fluid: It is produced and expelled from hydrocarbon source rocks or thick dark mudstone under a certain temperature and pressure during the sedimentary-tectonic evolution of the basin, i.e., deep metallogenic fluid. The fluid is reductive, rich in uranium and organic acids functional groups, and high in both temperature and pressure. Fluid inclusion study shows that the temperature ranges often from 100-200℃.

4. Uranium migration: These organic acids in fluids can leach and transport not only uranium, but also zinc, cobalt, nickel, copper, and other metals; The organic functional groups can easily complex or combine with uranium and associated metals, which are soluble and possibly also in colloid form as well.

5. Fluid migration channel: The channel is considered to be faults and its linked paleo-channels, permeable sandstone body, unconformity and uplifting structures, i.e., decompression space. The faults should be connected underlying source rocks with overlying ore beds

6. Uranium precipitation: U-bearing fluids migrate upwards into the overlying red-mottled sedimentary units, the uranium complexes, compounds, or colloids dissociate due to decreases in temperature and pressure, changes in pH and Eh values, oxidation, and other factors, resulting in precipitation of uranium and formation of the deposit.

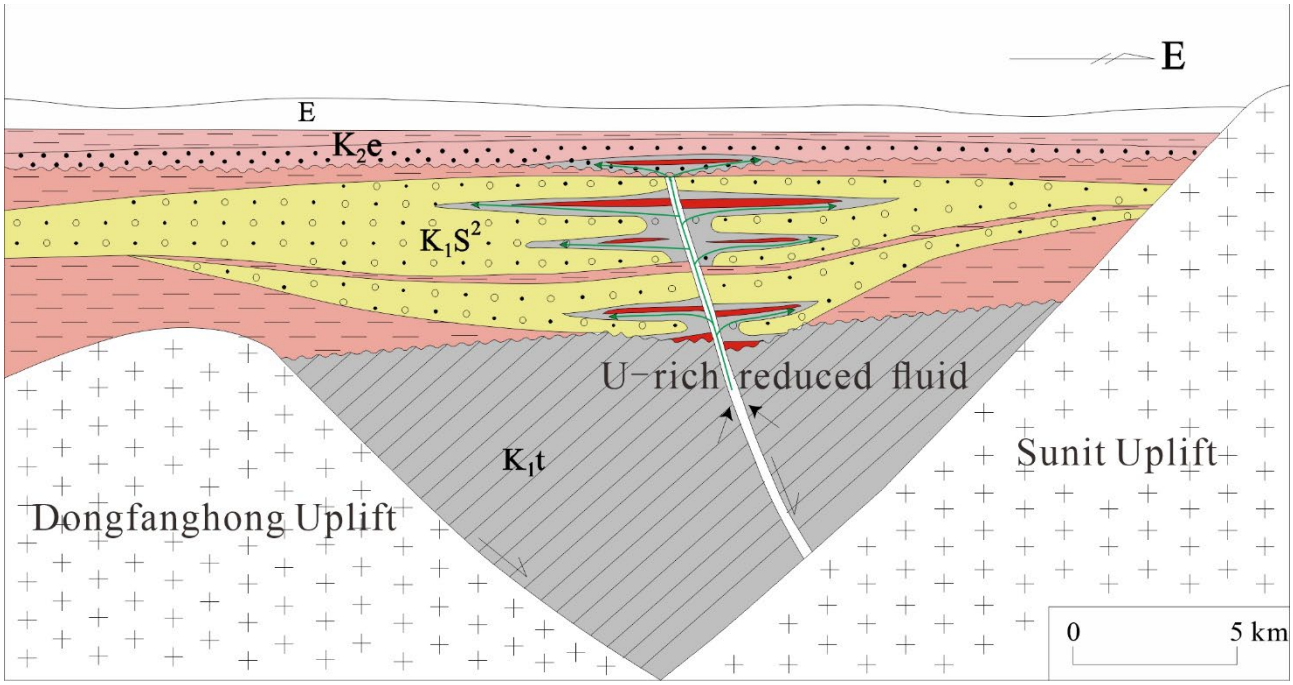


Fig.1 Exudative metallogenic model for Hadatu sandstone-hosted uranium deposit in reddish sediments in Erlian Basin, China (Li Ziying et al, 2022)

The new exploration model has been established and indications for targeting the perspective area proposed, such as (1) combining information derived from the upper red and lower dark sedimentary formations; (2) Identifying pathways connecting the upper red formation with lower dark formation; (3) Finding grey or greenish sandstone units in red-mottled formation, which hosts uranium mineralisation. They are applied to identify new prospective areas and a number of new discoveries on this new type of uranium deposit have been made in the red-mottled sedimentary formations of Meso- and Cenozoic basins in north China for recent years.

1. LI Ziying et al. 2022. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 49(4): 1009-1047. Doi: 10.12029/gc20220401 (in Chinese with English abstract).

2. LI Ziying et al. 2024. Metallogenic Prediction and Exploration Indication of Exudative Sandstone-type Uranium Deposit [J]. Uranium Geology, Vol.40 No.1: 1-15. DOI : 10.3969/j.issn.1000-0658.2024.40.001 (in Chinese with English abstract).

3. LI Ziying et al. 2019. Sandstone-hosted Uranium Mineralization in Northern Ordos Basin, China[B]. Geological Press, Beijing.

4. Junxian Wang, Ziying Li✉, Feng He et al. Evaluation of uranium migration during the maturation of hydrocarbon source rocks, Scientific Reports, 2024, 10.1038.

5. Tian, M.; Li, Z.✉; Zhang, Y.; Jia, L.; Ning, J.; Li, J.; He, H.; Tang, G. Genetic Mechanism of Tabular-Shaped Orebody of the Hailijin Sandstone-Type Uranium Deposit in the Songliao Basin: Constraints on the Clay Mineralogy of Ore-Bearing Sandstone. Minerals, 2023, 13, 1324.

*Новая модель уранонакопления за счёт глубинных флюидов в красноцветной пятнистой толще песчаников в северных впадинах Китая

Ли Цзыин, Цинь Минькуань, Цю Линьфэй, Тянь Минмин, Хэ Фэн, Чжун Цзюнь, Лю Ушэн, Лю Чжихэн, Ван Цзюньсянь, Чжан Юньлун, Ван Вэньцюань, Цзи Хунвэй, Хань Мэйчжи, Ли Вэйтао, Ли Мэнхуа
Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, Пекин, Китай, e-mail: lzy@briug.cn

Недавно открытые урановые месторождения в северных впадинах Китая приурочены к красноцветной пятнистой песчаниковой толще. К ним относятся месторождения Хадату в Эрляньском бассейне, Хайлицзинь на юге Сунляоского бассейна, Синьчжуан на юге Ордосского бассейна и др. В отличие от традиционных песчаниковых урановых месторождений, урановые рудные тела здесь имеют многослойную, пластообразную морфологию и залегают в серо-зелёных прослоях песчаника внутри красной пятнистой толщи, не демонстрируя привязки к классической зоне окислительно-восстановительного перехода. На плоскости напластования рудоносные слои имеют островковидную или прерывисто-цепочечную форму, а в разрезе — линзовидную, раструбчатую или грибовидную. Они пространственно ассоциированы с разломами.

Цвет руды варьируется от красноватого до тёмного, а её состав обогащён ураном, медью, свинцом, кобальтом, никелем, цинком и другими элементами — аналогично ассоциациям, свойственным органоносным породам-источникам, залегающим ниже. Основные урановые минералы — уранинит и коффинит, часто в сопряжённости с сульфидами меди, свинца и цинка. Уран тесно связан с органическим веществом, преимущественно в виде битума. Возраст минерализации, установленный по разным методам, относится к палеогену и неогену и значительно моложе вмещающих пород.

Наблюдаемые признаки не могут быть объяснены в рамках традиционной инфильтрационной (фреатической или межпластовой окислительно-восстановительной) модели уранонакопления.

На основе комплексного изучения рудных тел, рудоконтролирующих серо-зелёных песчаников, изотопного состава, органической и неорганической геохимии, минералогии и включений флюидов в указанных месторождениях предложена новая модель уранонакопления за счёт глубинных (органо-металлоносных) флюидов. Её суть заключается в следующем: рудообразующие флюиды формируются в глубинных осадочных толщах, богатых органикой и ураном (включая нефтематеринские породы), при относительно высоких температурах и давлениях. Эти флюиды содержат растворённые органические ураносодержащие соединения и комплексы с сопутствующими элементами.

Под действием структурных путей, таких как разломы, флюиды поднимаются вверх в области пониженного давления. При этом резко изменяются физико-химические условия (температура, давление, Eh, pH и др.), что приводит к распаду комплексов и осаждению урана и сопутствующих металлов. Модель (рис. 1) включает следующие ключевые положения:

1. Происхождение вмещающих пород: Красноцветная пятнистая толща — сингенетического происхождения, сформирована при первичном окислении осадков. Контролирующие руду серо-зелёные песчаники — эпигенетического происхождения, сформированы в результате вторичного восстановления глубинными органоносными восстановительными флюидами, миграция которых контролировалась разломами, соединяющими нижние тёмные и верхние красные части осадочной толщи.

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

2. Источник урана: Уран поступает из глубинных тёмных осадков, богатых металлами и органическим веществом. Тепловые эксперименты и опыты по выщелачиванию урана из углеродистых сланцев доказывают возможность его мобилизации. Это подтверждается также наличием глубинного органического вещества в рудных телах и геохимическими ассоциациями, сходными с породами-источниками.

3. Рудоносный флюид: Образуется и выжимается из нефтематеринских пород или мощных тёмных аргиллитов при определённых температурах и давлениях в ходе осадочно-тектонической эволюции бассейна. Такие флюиды восстанавливающего характера богаты ураном, органическими кислотами, обладают высокой температурой (100–200 °C) и давлением.

4. Миграция урана: Органические кислоты способны выщелачивать и транспортировать уран, а также Zn, Co, Ni, Cu и другие металлы. Органические функциональные группы легко образуют комплексы с ураном и металлами, как в растворённой, так и в коллоидной форме.

5. Каналы миграции: Роль каналов выполняют разломы, палеорусловые структуры, проницаемые песчаники, несогласия и зоны поднятий — т.е. области декомпрессии. Важно, чтобы разломы соединяли глубинные источники с зонами рудоотложения в верхних частях.

6. Осаждение урана: При подъёме флюиды достигают красноцветных осадков, где в условиях снижения температуры и давления, а также изменения pH, Eh и степени окисления, урановые комплексы и коллоиды распадаются, что приводит к осаждению урана и формированию рудных тел.

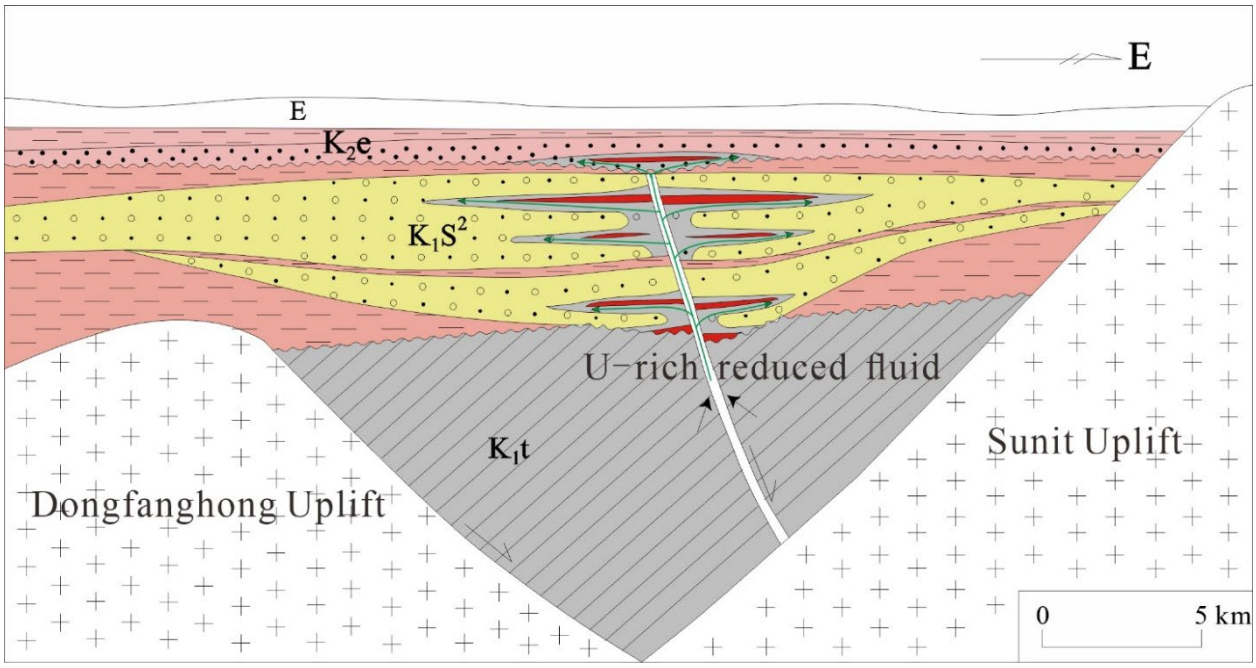


Рис. 1. Модель уранонакопления за счёт глубинных флюидов для песчаникового месторождения Хадату в красноцветных отложениях Эрляньского бассейна (Li Ziying et al., 2022)

На основе данной модели разработаны новые критерии прогноза перспективных участков, включая:
(1) анализ сочетания верхних красных и нижних тёмных осадков,
(2) выявление путей, соединяющих эти толщи,
(3) поиск серых или серо-зелёных песчаников внутри красноцветных толщ, содержащих урановую минерализацию.

Применение этих подходов позволило в последние годы выявить ряд новых объектов урановой минерализации в красноцветных осадках мезо- и кайнозойских бассейнов Северного Китая.

1. Li Ziying et al. 2022. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia. Geology in China, 49(4): 1009–1047.
2. Li Ziying et al. 2024. Metallogenic Prediction and Exploration Indication of Exudative Sandstone-type Uranium Deposit. Uranium Geology, 40(1): 1–15.
3. Li Ziying et al. 2019. Sandstone-hosted Uranium Mineralization in Northern Ordos Basin, China. Geological Press, Beijing.
4. Wang J., Li Ziying, He Feng et al. Evaluation of uranium migration during the maturation of hydrocarbon source rocks, Scientific Reports, 2024.
5. Tian M., Li Ziying, Zhang Y., et al. Genetic Mechanism of Tabular-Shaped Orebody of the Hailijin Sandstone-Type Uranium Deposit in the Songliao Basin: Constraints on the Clay Mineralogy of Ore-Bearing Sandstone, Minerals, 2023, 13, 1324.

Research on Polymetallic Mineralization Mechanisms in Xiangshan Uranium Deposit Field

Junang LIU[1,2], Ziying LI[1,2], Jiangtao NIE[1,2]
[1]National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing, 100029, China; [2]Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing 100029, China

The Xiangshan Uranium Orefield, located in the southeastern segment of the Gan-Hang Tectonic Belt, is China's largest volcanic-type uranium orefield. Recent drilling projects in the western part of Xiangshan have revealed deep Pb-Zn-Ag-Cu mineralization, forming a vertical metallogenic zonation characterized by "uranium above, polymetallics below"(Liu et al., 2019a). Current research primarily focuses on uranium mineralization, while studies on the metallogenic processes of deep polymetallic mineralization and their relationship with uranium mineralization remain limited (Lin et al., 2006; Hu et al., 2009; Li et al., 2014). Therefore, conducting petrogenetic, mineralogical, and metallogenic geochemical studies on deep polymetallic mineralization in this area, along with comparative analyses of uranium mineralization characteristics, will provide a basis for further investigating the metallogenic series in the western Xiangshan region and guiding deep mineral exploration. Additionally, such studies hold significant importance for understanding the metallogenic processes of uranium-polymetallic deposits in the Gan-Hang Volcanic-Tectonic Belt.

Polymetallic Pb-Zn-Ag-Cu mineralization in the Xiangshan Uranium Orefield is mainly distributed in the central-western and northern regions of the orefield. Vertically, it exhibits a spatial distribution pattern where uranium mineralization is relatively separated from polymetallic mineralization (with uranium above and polymetallics below), though localized spatial superposition occurs in some areas. Both uranium and polymetallic minerals occur on both sides of the He Yuanbei-Xiao Pi Fault Structure, primarily hosted in porphyritic rhyolite and rhyodacite (Liu et al., 2019a).

Based on microscopic observations and electron probe analyses, the primary ore minerals in uranium mineralization of the western Xiangshan area include uranothorite, pitchblende, and titanium uranium oxides, with associated metallic minerals such as pyrite, molybdenite, galena, and sphalerite. Gangue minerals mainly consist of illite, fluorite, apatite, and calcite. For polymetallic mineralization, the primary metallic minerals are cassiterite, arsenopyrite, galena, sphalerite, pyrite, and argentite, with gangue minerals including calcite, siderite, chlorite, and quartz (Liu et al., 2019).

Based on mineral assemblages and cross-cutting relationships, the deep polymetallic mineralization process is divided into 3 stages and 4 substages: a pre-mineralization oxide stage, a Pb-Zn-Cu-Ag metallogenic stage, and a post-mineralization carbonate stage without ore. The metallogenic stage is further subdivided into four substages: quartz-arsenopyrite (S1), arsenic-free pyrite (S2), Pb-Zn polymetallic mineralization (S3), and Pb-Zn-Ag carbonate (S4). Among these, the S3 substage represents the primary Pb-Zn mineralization stage (Liu et al., 2019).

Single-mineral trace element analyses of deep polymetallic mineralization at various stages indicate that minerals are depleted in compatible elements and relatively depleted in high-field-strength elements, suggesting that the metallogenic fluids originated from the crust. The Co/Ni ratio in pyrite, Ga/In ratio, Ga and In contents, and Zn/Cd ratio in sphalerite from the S3 substage indicate that mineralization formed under medium- to high-temperature conditions. The Cd-In relationship in sphalerite and lnBi-lnSb relationship in galena suggest that polymetallic mineralization is associated with volcanic-subvolcanic hydrothermal fluids. Metallogenic fluids at all stages are Cl-rich reducing fluids that preserve the initial rare earth element (REE) distribution patterns.

Alteration rock geochemical studies reveal that uranium metallogenic fluids are deep-source alkaline reducing fluids enriched in alkaline earth elements (Na, Ca), transition group elements (V, Cr, Co, Ni, Zr, Hf, etc.), heavy rare earth elements (HREE), sulfur-loving elements (Cu, Pb, Zn), metallogenic elements (U, Th), and volatile components (F, PO_4^{3-}, CO_2). Lead-zinc polymetallic metallogenic fluids are magmatic hydrothermal fluids rich in alkali metal elements (Li, Cs), sulfur-loving metallogenic elements (Cu, Pb, Zn, Sb, Mo), and volatile ions (H^+, OH^-, K^+, HS^-, Cl^-, CO_2).

An increase in fluid pH, a decrease in K^+, and gradual escape of CO_2 are the primary factors driving the precipitation of Pb, Zn, and other metallogenic elements.

Fluid inclusion studies on deep polymetallic mineralization at various stages show that metallogenic temperatures decrease from early to late stages (386.8°C, 312.4°C, 245.1°C, 151.7°C), with corresponding salinities of 15.32% NaCl equivalent, 11.40% NaCl equivalent, 6.12% NaCl equivalent, and 2.61% NaCl equivalent. Early-stage fluids are relatively CO_2- and Ca^{2+}-rich magmatic fluids, while late-stage fluids are primarily H_2O-rich meteoric fluids. Fluid evolution progresses from a medium-high-temperature, medium-salinity, medium-density unsaturated NaCl-H_2O-CO_2-CH_4 system in the early stage to a medium-low-temperature, low-salinity, medium-density NaCl-H_2O system in the later stages. Fluid mixing plays a critical role in the formation of hydrothermal deposits. The metallogenic depth ranges from 1581 m to 1803 m, with an average of 1676 m.

C-H-O isotopic characteristics of deep lead-zinc polymetallic mineralization indicate that the metallogenic fluids are derived from magmatic hydrothermal fluids mixed with minor meteoric water, with increasing meteoric water contribution during fluid evolution. He-Ar isotopic compositions suggest no significant mantle-derived components in the metallogenic fluids; the enrichment of Li in the fluids may be one of the reasons for their higher $^3He/^4He$ ratios compared to normal crustal values, distinguishing them from the deep-source (mantle-derived) fluid characteristics associated with uranium mineralization.

Sulfur isotopes ($\delta^{34}S$) of deep polymetallic mineralization range from 1.9‰ to 6.5‰, indicating a magmatic source. Comparative studies of Pb and Sr isotopes between ores and host rocks (porphyritic rhyolite, rhyodacite, basement metamorphic rocks, and nearby granitic porphyry) suggest that the ores and host rocks likely do not share the same source. Early-stage metallogenic fluids and materials primarily originated from the upper crust, possibly mixed with orogenic belt materials.

Using the Rb-Sr isotope dating method on sphalerite, the metallogenic age of lead-zinc polymetallic mineralization is determined to be 121.0 ± 8.8 Ma, consistent with the timing of late subvolcanic activity. Combined with field and microscopic observations, polymetallic mineralization occurred after alkali metasomatism but significantly predates late-stage acidic metasomatism and uranium mineralization (Liu et al., 2019b).

Uranium-polymetallic mineralization in the western Xiangshan area formed through the spatial superposition of different mineralization types under regional extension induced by Mesozoic continental hotspot activity, driven by volcanic-magmatic processes of varying stages and types.

1. Hu R.Z, Burnard P.G, Bi X.W., et al. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi province, China: evidence from He, Ar and C isotopes. Chemical Geology, 266(1-2), 86-95
2. Li Z.Y, Huang Z.Z., Li X.Z., et al. 2014. Igneous rocks and uranium mineralization of Xiangshan ore field. Beijing: Geology Press: 1–324. (in Chinese with English abstract)
3. Lin G., Zhou Y., Wei X.R., et al. 2006. Structural controls on fluid flow and related mineralization in the Xiangshan uranium deposit, Southeastern China. J. Geochem. Explor. 89(1-3), 231～234.
4. Liu J.G., Li Z.Y., Nie J.T., et al. 2019a. Ore fabric and mineralogy of polymetallic mineralization in western Xiangshan uranium orefield, Jiangxi Province. Mineral Deposits, 038(02): 367～381(in Chinese with English abstract).
5. Liu J.G., Li Z.Y., Nie J.T., et al. 2019b. The timing and ore-forming fluid evolution of deep polymetalic mineralization in western Xiangshan uranium ore field, South China: Constraints from Rb-Sr isotope systematics. Acta Petrologica Sinica, 35(9):14 (in Chinese with English abstract).

*Исследование механизмов полиметаллической минерализации в уранорудном районе Сяншань

Лю Цзюнан[1,2], Ли Цзыин[1,2], Не Цзянтао[1,2]
[1]Национальная лаборатория по разведке и добыче урановых ресурсов и ядерному дистанционному зондированию, Пекин 100029, Китай; [2]Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, КННК, Пекин 100029, Китай

Уранорудный район Сяншань, расположенный в юго-восточном сегменте тектонического пояса Гань-Хан, является крупнейшим вулканогенным урановым рудным районом Китая. Недавние буровые работы в его западной части выявили глубинную минерализацию Pb-Zn-Ag-Cu, образующую вертикальную металлогенетическую зональность типа «уран сверху — полиметаллы снизу» (Liu et al., 2019a). В настоящее время основное внимание уделяется урановой минерализации, в то время как исследования процессов образования глубинной полиметаллической минерализации и её связи с ураном ограничены (Lin et al., 2006; Hu et al., 2009; Li et al., 2014).

Изучение петрогенеза, минералогии и металлогенетической геохимии полиметаллической минерализации, а также сравнительный анализ с урановой минерализацией создают основу для реконструкции металлогенетической последовательности в западной части Сяншаня и служат ориентиром для глубинной геологоразведки. Такие исследования также имеют важное значение для понимания механизмов формирования уран-полиметаллических рудных систем в пределах вулкано-тектонического пояса Гань-Хан.

Полиметаллическая минерализация (Pb-Zn-Ag-Cu) в районе Сяншань локализуется преимущественно в центрально-западной и северной частях рудного поля. В вертикальном разрезе наблюдается пространственное разделение с урановой минерализацией (уран выше, полиметаллы ниже), хотя в некоторых участках фиксируется их наложение. Обе минерализации приурочены к зонам по обе стороны разломной структуры Хэюаньбэй – Сяопи, главным образом во вмещающих порфировидных риолитах и риодакитах (Liu et al., 2019a).

По результатам микроскопических наблюдений и электронно-зондового анализа, в урановой минерализации западной части Сяншаня доминируют ураноторит, уранинит и титаноуранистые оксиды. Сопутствующие минералы — пирит, молибденит, галенит, сфалерит. Главные породообразующие минералы — иллит, флюорит, апатит, кальцит. В полиметаллической минерализации преобладают касситерит, арсенопирит, галенит, сфалерит, пирит и аргентит; среди породообразующих — кальцит, сидерит, хлорит и кварц (Liu et al., 2019).

На основе минеральных ассоциаций и пересекающих отношений, процесс полиметаллической минерализации подразделён на 3 стадии и 4 подсистемы: докварцевая оксидная стадия, металлогенетическая стадия Pb-Zn-Cu-Ag и пострудная стадия карбонатного изменения. Стадия рудообразования включает четыре этапа: кварц-арсенопиритовый (S1), пиритовый без As (S2), основную свинцово-цинковую минерализацию (S3), и свинцово-цинково-серебряный карбонатный этап (S4). Основная минерализация приходится на этап S3.

Трассологический анализ отдельных минералов по стадиям показывает, что руды обеднены совместимыми элементами и элементами с высокой силой поля, что указывает на коровое происхождение флюидов. Отношения Co/Ni в пирите, Ga/In, содержания Ga и In, а также Zn/Cd в сфалерите (S3) свидетельствуют о формировании минерализации в условиях средне-высоких температур. Связь Cd-In в сфалерите и lnBi-lnSb в галените указывают на

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

вулкано-субвулканические гидротермальные флюиды. Все стадии минерализации сопровождаются Cl-богатыми восстановительными флюидами, сохраняющими исходную распределённость редкоземельных элементов.

Геохимия изменений вмещающих пород показывает, что урановосные флюиды — глубинного происхождения, восстановительного щелочного характера, обогащены щёлочноземельными элементами (Na, Ca), переходными металлами (V, Cr, Co, Ni, Zr, Hf), тяжёлыми РЗЭ, халькофильными элементами (Cu, Pb, Zn), ураном, торием и летучими компонентами (F, PO_4^{3-}, CO_2). Полиметаллические рудоносные флюиды — магматического гидротермального генезиса, обогащены Li, Cs, Sb, Mo и другими элементами, а также ионами H^+, OH^-, K^+, HS^-, Cl^-, CO_2. Осаждение рудных элементов происходит при увеличении pH, снижении K^+ и дегазации CO_2.

Изучение включений флюидов по стадиям полиметаллической минерализации показывает понижение температур от 386,8 °C (ранний этап) до 151,7 °C (поздний этап) при понижении солёности от 15,32% до 2,61% (NaCl экв.). Ранние флюиды — магматические, обогащённые CO_2 и Ca^{2+}, поздние — обогащены H_2O, вероятно метеорного происхождения. Эволюция идёт от средне-высокотемпературной $NaCl–H_2O–CO_2–CH_4$ системы к низкотемпературной $NaCl–H_2O$ системе. Смешение флюидов играло ключевую роль в рудообразовании. Глубина рудообразования — от 1581 до 1803 м, в среднем 1676 м.

Изотопы C–H–O показывают, что флюиды имеют магматическое происхождение с незначительной примесью метеорных вод, вклад которых возрастал в процессе эволюции. По He–Ar изотопам мантия не является значимым источником флюидов; повышенные значения $^3He/^4He$, вероятно, связаны с обогащением флюидов литием, а не мантийным влиянием — в отличие от урановой минерализации, где мантия могла играть большую роль.

Значения $\delta^{34}S$ для серы в рудах варьируют от 1,9‰ до 6,5‰, указывая на магматический источник. Сравнение изотопов Pb и Sr между рудами и вмещающими породами (порфировидные риолиты, риодакиты, метаморфические породы фундамента, гранитный порфир) свидетельствует о несогласованности источников. Флюиды и вещества ранней стадии, по-видимому, происходили из верхней коры с участием орогенных компонентов.

Методом Rb–Sr-изохрон на сфалерите установлен возраст свинцово-цинковой минерализации: 121,0 ± 8,8 млн лет, что соответствует поздней стадии субвулканической активности. По данным наблюдений, полиметаллическая минерализация произошла после щелочного метасоматоза, но значительно раньше позднего кислотного метасоматоза и уранонакопления (Liu et al., 2019b).

Уран-полиметаллическая минерализация в западной части Сяншаня сформировалась при наложении различных типов рудообразования в условиях регионального растяжения, вызванного мезозойской внутриконтинентальной горячей точкой и последующей вулкано-магматической активностью разного генезиса.

1. Hu R.Z, Burnard P.G, Bi X.W., et al. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi province, China: evidence from He, Ar and C isotopes. Chemical Geology, 266(1-2), 86-95
2. Li Z.Y, Huang Z.Z., Li X.Z., et al. 2014. Igneous rocks and uranium mineralization of Xiangshan ore field. Beijing: Geology Press: 1–324. (in Chinese with English abstract)
3. Lin G., Zhou Y., Wei X.R., et al. 2006. Structural controls on fluid flow and related mineralization in the Xiangshan uranium deposit, Southeastern China. J. Geochem. Explor. 89(1-3), 231～234.
4. Liu J.G., Li Z.Y., Nie J.T., et al. 2019a. Ore fabric and mineralogy of polymetallic mineralization in western Xiangshan uranium orefield, Jiangxi Province. Mineral Deposits, 038(02): 367～381(in Chinese with English abstract).
5. Liu J.G., Li Z.Y., Nie J.T., et al. 2019b. The timing and ore-forming fluid evolution of deep polymetalic mineralization in western Xiangshan uranium ore field, South China: Constraints

from Rb-Sr isotope systematics. Acta Petrologica Sinica, 35(9):14 (in Chinese with English abstract).

New progress in deep drilling of uranium science in China and Enlightenment for deep ore searching

Nie Jiangtao, Li Ziying, Guo Jian, Liu Jungang, Tian Mingming, Lai Hainan
Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029

1. Geological characteristics:

The Xiangshan ore field is located in the south-west section of the NE-trending Ganhang volcanic uranium metallogenic belt. The regional strata of Xiangshan volcanic basin can be divided into two parts: basement rock and caprock. The basement rock is mainly Mesoproterozoic low-grade metamorphic rock, mainly schist and phyllite. The caprock is composed of lower Cretaceous volcanic rock series and upper Cretaceous red clastic rock. Volcanic rock series consist of acid，intermediate-acid volcanic lavas and pyroclastic rocks, and are divided into two cycles, namely, the Daguding Group and the Ehuling Group. The first cycle is fissure eruption, forming intermediate-acid rhyodacite and rhyolitic welded tuff; the second cycle is central eruption, forming intrusive-overflow facies acid volcanic lava-porphyry rhyolite. In the late stage of large-scale volcanism, the crater collapsed and formed a series of annular fractures. Subvolcanic magma upward invaded along the annular fractures and emerged around the edge of Xiangshan Basin in an arc shape (Fig.1).

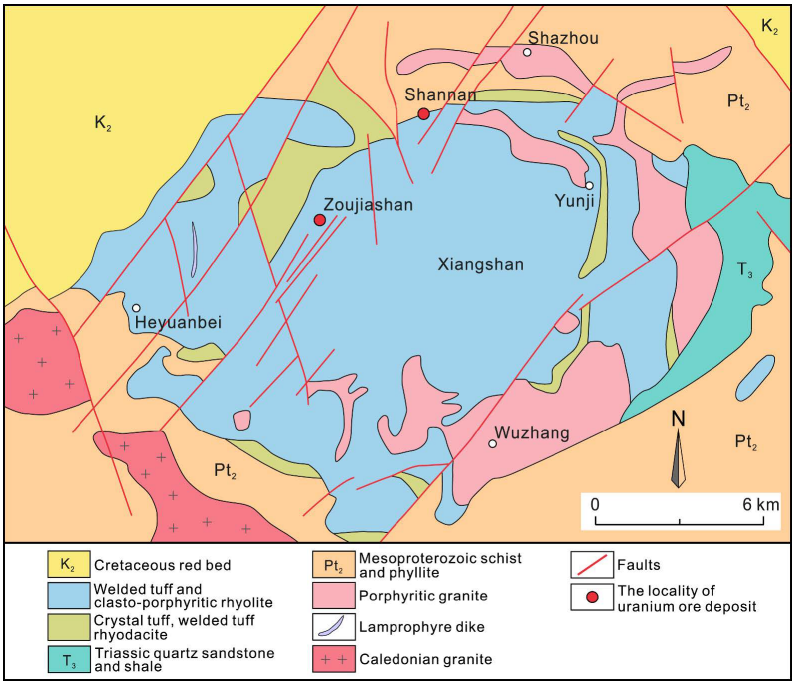


Fig.1 Geological map of the Xiangshan uranium ore field

2. Uranium scientific deep drilling:

Scientific deep drilling was carried out in the Xiangshan Uranium Ore Field, and by complex geological, physical and chemical exploration, remote sensing and other diversified geological information, a deep drilling construction site was selected, and scientific deep drilling of 3,016 meters for uranium was successfully carried out, and scientific deep drilling geological, physical and chemical exploration, logging and other standardized profiles were set up, which revealed the fine geological structure and metallogenetic environment of the Xiangshan Uranium Producing Volcanic Basin down to 3,000 meters deep.

3. Research progress and conclusions:

Through the scientific deep drilling project, the magmatic pulsation process at the beginning of the eruption was restored, the volcanic eruption cycle in the Xiangshan area was reclassified, and limited by high-precision U-Pb dating, and the age of formation of the tuffaceous siltstone and gray-green sedimentary tuff in the lower member of the Daguding group was determined for the first time,

and the time limit of the complete volcanic activity in the Xiangshan area was remodeled to be 140 Ma-130 Ma, and the four sections of gray-white crystalline glassy tuff exposed in the scientific deep drilling CUSD2-1. They are the marker layers, and the four segments of the marker layers have experienced a long period of eruption interruptions. The project team classified the Daguding group into the main process of five pulsations, each of which has experienced the evolution of sedimentation, eruption, and overflow of explosions, and formed a volcanic ash cloud phase (purple-red tuff), a volcanic clastic gush phase (fusion tuff), a volcanic clastic mudflow phase (tuff conglomerate), volcanic clastic ash cloud phase (gray-green sedimentary tuff), and explosive overflow phase (gray-white crystalline tuff) of vertical petrographic changes.

The formation of the Xiangshan collapsed volcanic basin has experienced a repeated accumulation of energy in the early stage, and a large-scale volcanic eruption as a result of a sharp release of energy and materials.1~4 sub-cycle are all complete cycle of volcanic sedimentation-eruption, and the fifth sub-cycle forms purple-red rhyodacite by strong volcanic intrusion after a short period of volcanic debris sedimentation. The second sub-cycle of volcanism formed the Ehuling group, represented by Cataclastic Rhyolite.

Scientific deep drilling shows that uranium mineralization in the Xiangshan Uranium ore Field is controlled by the superposition of hot spots, tectonics, magma and fluids, deep fracture tectonics is a key constraint on the shallow surface hydrothermal activity and the location of mineralization, and tectonic-magmatic activities provide sufficient heat source and good tectonic conditions for the formation of volcanic-type uranium ore.

4. Enlightenment of deep ore searching:

The multi-phase tectonic activities, regional metamorphism, and magmatism developed in and around the Xiangshan area indicate that the Xiangshan area is a long-term thermodynamic activity area, especially the strong multi-phase tectonic-magmatic-metamorphic-mineralization developed in the Meso-Cenozoic era, all of which are the manifestation of the hot spot activities of the Xiangshan area in the crust Uranium mines were formed in the specific tectonic phase of the Cretaceous stretching and thinning, which was related to the continental hot spot activities. The hotspot activity in the Xiangshan area is the driving force of the comprehensive geological events and mineralization in the Xiangshan volcanic basin, and it is the manifestation of the strength and weakness of the deep thermal activity in the crust.

Within the range of hot spot activity, the superposition of deep tectonics and shallow tectonics is a favorable site for mineralization, and there is a huge potential for finding minerals in the deep part of the Xiangshan. At present, most of the uranium mines are concentrated in the 0m elevation, and the -500m, -1000m, and -1500m of the Xiangshan Uranium Ore Field are favorable mineralization sites in the deep part.

1. Ziying Li. 2006. Hot spot uranium mineralization in South China. Uranium Geology, 22(2): 65-69.
2. Ziying Li, Zhizhang Huang, Xiuzhen Li et al. Xiangshan igneous rocks and uranium mineralization [M]. Beijing: Geology Press, 2014:1-10.

***Новые достижения в области глубокого научного бурения урана в Китае и выводы для глубокого прогнозирования рудных объектов**

Не Цзянтао, Ли Цзыин, Го Цзянь, Лю Цзюньган, Тянь Минмин, Лай Хайнань
Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, Пекин, 100029, Китай

1. Геологическая характеристика

Уранорудное поле Сяншань расположено в юго-западной части субширотного вулкано-уранового металлогенического пояса Ганьхан. Региональная стратиграфия вулканической впадины Сяншань подразделяется на два структурно-стратиграфических комплекса: фундамент и перекрывающую толщу. Фундамент представлен низкометаморфизованными породами среднего протерозоя — преимущественно сланцами и филлитами. Перекрывающая толща включает нижнемеловую серию вулканических пород и верхнемеловые красноцветные терригенные отложения.

Вулканические породы представлены кислыми и среднекислыми лавами и пирокластическими породами, подразделяемыми на два цикла: свиты Дагудин и Эхулин. Первый цикл связан с трещинным вулканизмом и представлен среднекислыми риодацитами и риолитовыми спаянными туфами; второй — с центральными извержениями, формирующими интрузивно-экструзивные порфировидные риолиты. На позднем этапе крупномасштабного вулканизма произошло обрушение кратера с образованием кольцевых разломов. По этим структурам в субвулканической стадии происходило внедрение магмы с образованием дугообразного пояса по краям впадины Сяншань (рис. 1).

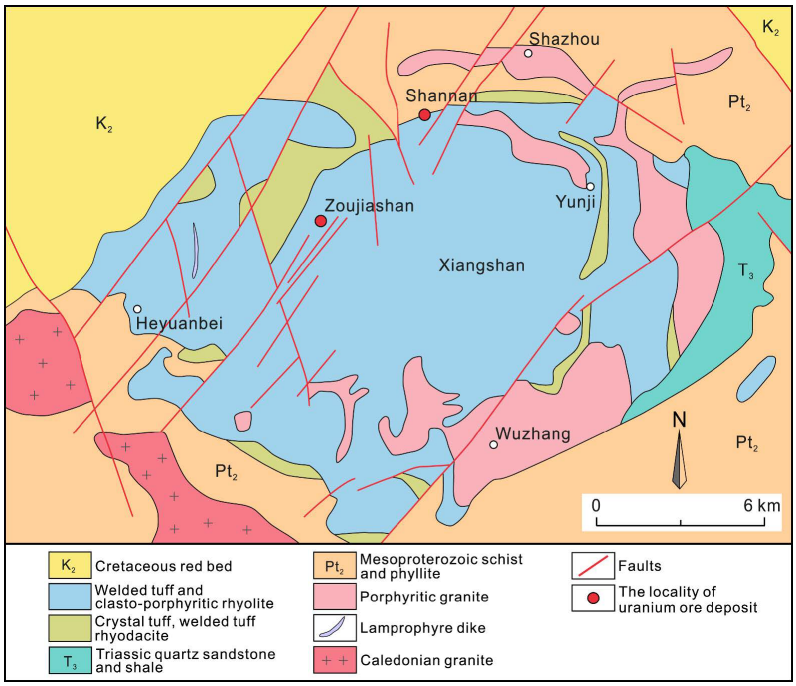


Рис. 1. Геологическая карта уранорудного поля Сяншань

2. Научное глубокое бурение урана:

В уранорудном поле Сяншань был реализован проект глубокого научного бурения, в рамках которого, с использованием комплекса геологических, физико-химических методов и дистанционного зондирования, было выбрано оптимальное место заложения скважины. Бурение до глубины 3016 м позволило впервые получить непрерывное геолого-геофизическое

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

и геохимическое разрезы, раскрывающие глубинную структуру и металлогенетическую обстановку вулканической впадины Сяншань.

3. Научные результаты и выводы:

Благодаря проекту глубокого бурения были уточнены этапы магматического пульсационного процесса начала вулканизма, пересмотрена классификация вулканических циклов и впервые по данным высокоточного U–Pb-датирования установлены абсолютные возраста туфового алевролита и серо-зелёного осадочного туфа нижнего подъяруса свиты Дагудин. Полный цикл вулканической активности в районе Сяншань охватывает интервал 140–130 млн лет.

В скважине CUSD2-1 были вскрыты четыре участка стекловатого серо-белого туфа — маркерных горизонта, между которыми фиксируются длительные перерывы в вулканической активности. Авторы выделили пять пульсаций вулканизма в составе свиты Дагудин, каждая из которых включает этапы осадконакопления, извержения, эффузивного перекрытия и формирует вертикальные литологические зоны: туфы пепловых облаков (пурпурно-красные), взрывные туфы, туфоконгломераты, осадочные туфы серо-зелёного цвета и стекловатые туфы.

Формирование впадины Сяншань происходило в результате накопления энергии и последующего резкого высвобождения при масштабном вулканическом извержении. Подъяруса 1–4 представляют собой полные циклы осадконакопления и извержения, а пятый — завершается интрузией пурпурно-красных риодацитов после кратковременного осадконакопления. Второй цикл представлен свитой Эхулин, характеризующейся катаклазированными риолитами.

Результаты глубокого бурения показывают, что урановая минерализация в Сяншань контролируется наложением горячих точек, тектоники, магматизма и гидротермальных флюидов. Глубинные разломы играют ключевую роль, контролируя гидротермальную активность в приповерхностных зонах, а тектоно-магматическая активность создаёт необходимые термические и структурные условия для образования вулканогенных урановых месторождений.

4. Выводы для глубокого прогноза урановых руд:

Многофазовая тектоническая активность, региональный метаморфизм и магматизм, развившиеся в районе Сяншань, указывают на его принадлежность к долгоживущей зоне термодинамической активности земной коры. Особенно выражены горячеточечные процессы мезо-кайнозойского времени, что и определило формирование урановых месторождений в условиях растяжения и утонения земной коры в меловой период. Эти процессы — следствие и проявление глубинной термальной активности.

В пределах зон горячей активности наиболее перспективными для рудообразования являются участки наложения глубинных и приповерхностных тектонических структур. В глубинных горизонтах уранорудного поля Сяншань (-500 м, -1000 м, -1500 м) выявлены благоприятные условия для формирования новых урановых объектов, тогда как большинство известных месторождений приурочено к приповерхностным уровням (отметка 0 м).

1. Li Ziying. 2006. Hot spot uranium mineralization in South China. Uranium Geology, 22(2): 65–69.
2. Li Ziying, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen et al. Xiangshan igneous rocks and uranium mineralization. Beijing: Geology Press, 2014: 1–10.

Petrogenesis and Sc Mineralization Potential of the Early Silurian Halaguole Alaskan-Type Complex in the East Kunlun Orogenic Belt

Lingyun Sun, Ye Qian
College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, 130061, PR, China

The Halaguole mafic-ultramafic intrusions in the Kunlun orogenic belt, as reported in this study, exhibit characteristics of an Alaskan-type complex, characterized by a high Sc content. The complex is composed of peridotite, pyroxenite, and gabbro, with well-defined annular lithological zoning from the core to the margin. The tectonic evolution of the East Kunlun region was primarily controlled by the bidirectional subduction of oceanic crust in the Wanbaogou basaltic plateau arc-trench system during the Paleozoic. However, previous investigations have predominantly focused on the northward subduction of oceanic crust during early Paleozoic magmatism north of the Central Kunlun Fault (CKLF). There has been relatively limited research on the southward subduction of oceanic crust, leading to ongoing debates regarding the timing of the end of oceanic crustal subduction and the onset of collisional orogeny. This tectonic setting thus resulted in the development of numerous ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the study area, which is benefical to the formation of Co-Ni deposits and Sc deposits. This study investigated the Halaguole mafic-ultramafic intrusion to establish the timing of the transition from north-south bidirectional subduction to collisional orogeny in the proto-Tethys Ocean, while simultaneously assessing the Sc mineralization potential. This investigation included petrographic analysis, zircon U-Pb dating and Hf isotopes analysis, whole-rock major and trace element analysis, and electron probe microanalysis.

The results of zircon U-Pb data show that the rock body was formed in the Early Silurian with a diagenetic age of 437-440 Ma. Zircon Hf isotope results for gabbro samples indicate that the intrusion originated in an enriched mantle (ε Hf(t)=0.25-6.68). The major and trace element data indicate that it belongs to the calc-alkaline tholeiite series with high $Mg^{\#}$, formed in the island arc environment, and the various types of rocks in the intrusions were formed from the same magma through fractional crystallization. These characteristics align with the typical features of Alaskan-type complexes. The Sc content in the Halaguole mafic-ultramafic intrusion ranged from 1.96-224.50 ppm, the pyroxene peridotite and gabbro samples exhibit high Sc contents that reach industrial-grade Sc deposits (Sc2O3 = 50 ppm). The clinopyroxene and amphibole that make up the rock bodies are good Sc carriers. The mineral assemblage from Halaguole mafic-ultramafic intrusions is identical to typical Alaskan-type complexes, these minerals exhibit arc-related features. The electronic probe analysis of the olivine, clinopyroxene, hornblende, spinel, and biotite further characterized the chemical composition of the mafic-ultramafic intrusions. To calculate Al_2O_3 (14.59-15.90 wt.%), TiO_2 (0.60-2.02 %), FeO/MgO (1.02-1.13) content of the parental melt, indicates the melt composition is strongly similar to those of both fore-arc basalt and island-arc basalt. Furthermore, the parental magma is suggested to have high water content and oxygen fugacity. Furthermore, Halaguole mafic-ultramafic intrusions display definitive subduction-zone geochemical characteristics: elevated water content and LILE enrichment, Nb depletion relative to La, negative Zr anomalies, positive Pb anomalies, and marked Ba, Sr enrichment. Combined with the above characteristics, we believe that the Halaguole mafic-ultramafic intrusions are formed through partial melting of a metasomatized mantle wedge influenced by subduction zone fluids. This process results in the generation of an aqueous calc-alkaline basaltic magma with island arc properties. And the intrusions have good potential for Sc mineralization, and is a potential Sc resource.

Combining the findings of previous research with the evidence presented in this study, the formation of the Halaguole mafic-ultramafic intrusions is closely related to the southward subduction of the Proto-Tethys oceanic crust into the Wanbaogou Basalt Plateau, adding critical geologic evidence for the bidirectional subduction into the Proto-Tethys Ocean. The closure of the Proto-Tethys Ocean is restricted to the Early Silurian. Overall, the findings from the study of the Halaguole intrusions contribute to our understanding of the geodynamic processes that shaped the Earth's ancient

oceans and tectonic evolution during the Early Paleozoic era, and help us understand the potential for mineralization of the Alaskan-type complex.

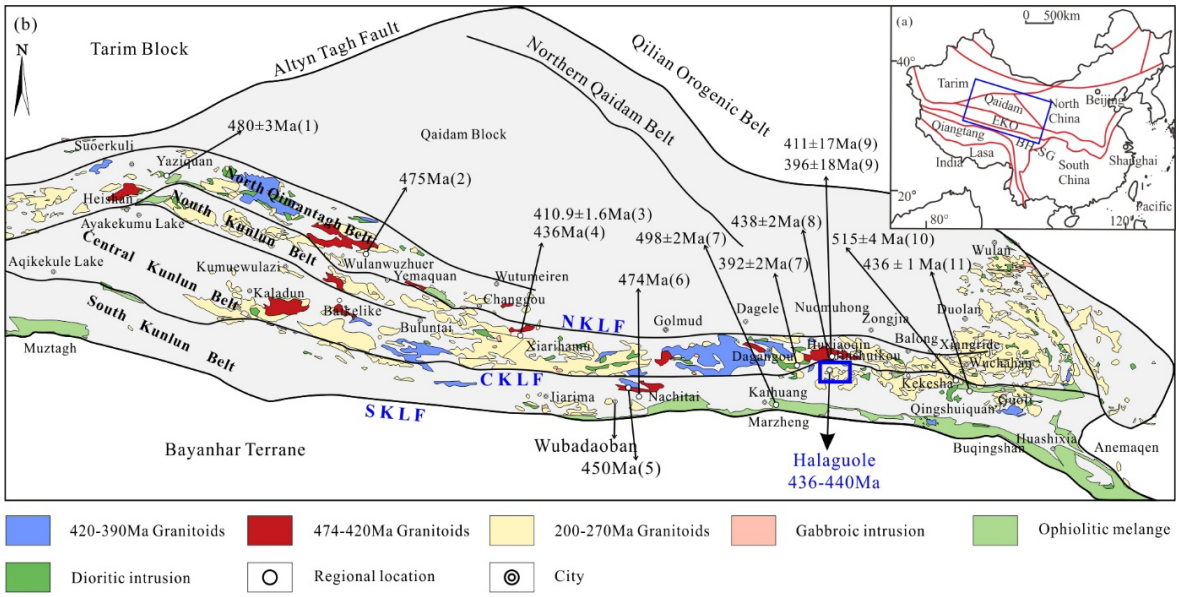


Fig. 1 Geotectonic position map of the East Kunlun region (According to Sun et al., 2003, 2009, modified). NKLF: Northern Kunlun Fault; CKLF: Central Kunlun Fault; SKLF: Southern Kunlun Fault.

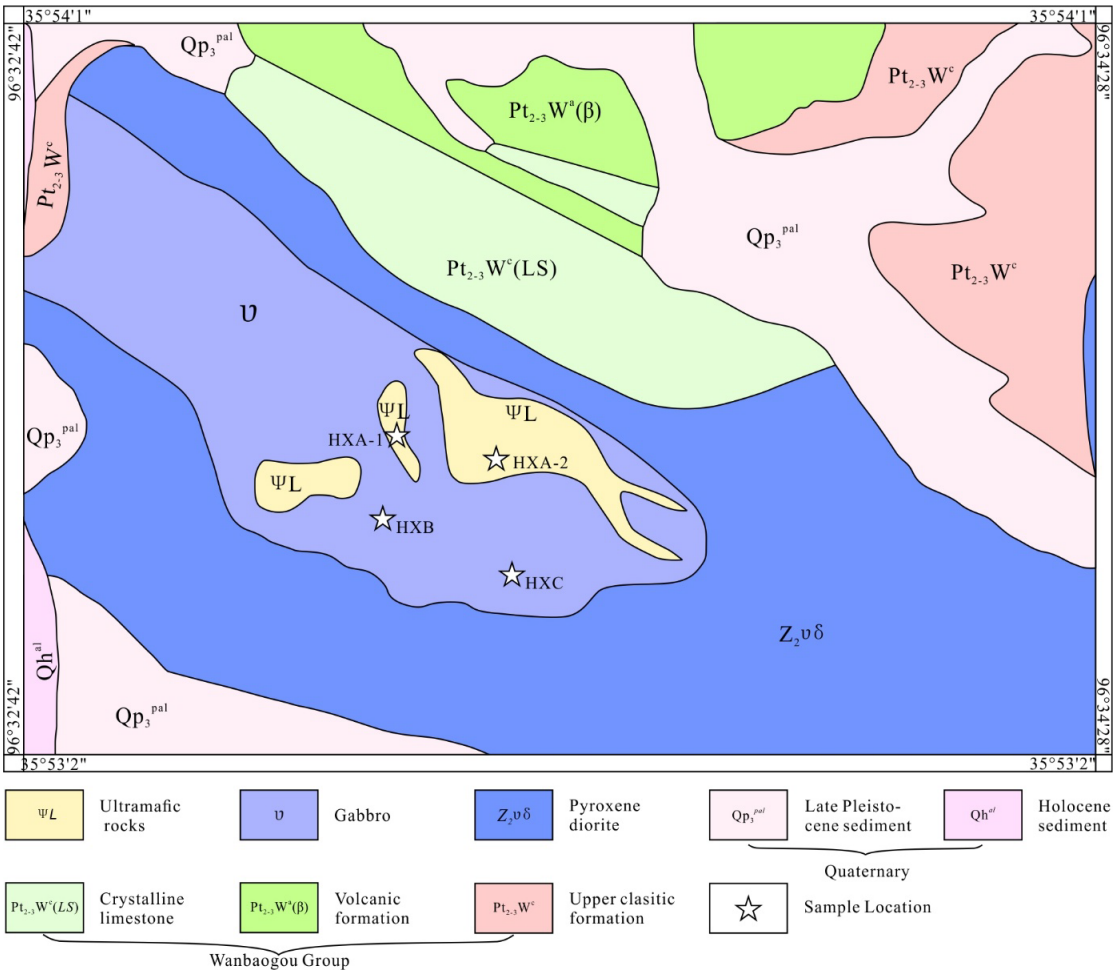


Fig. 2 Regional geological map and sketch map of the distribution of mafic-ultramafic intrusions in the Halaguole area of East Kunlun, Qinghai Province.

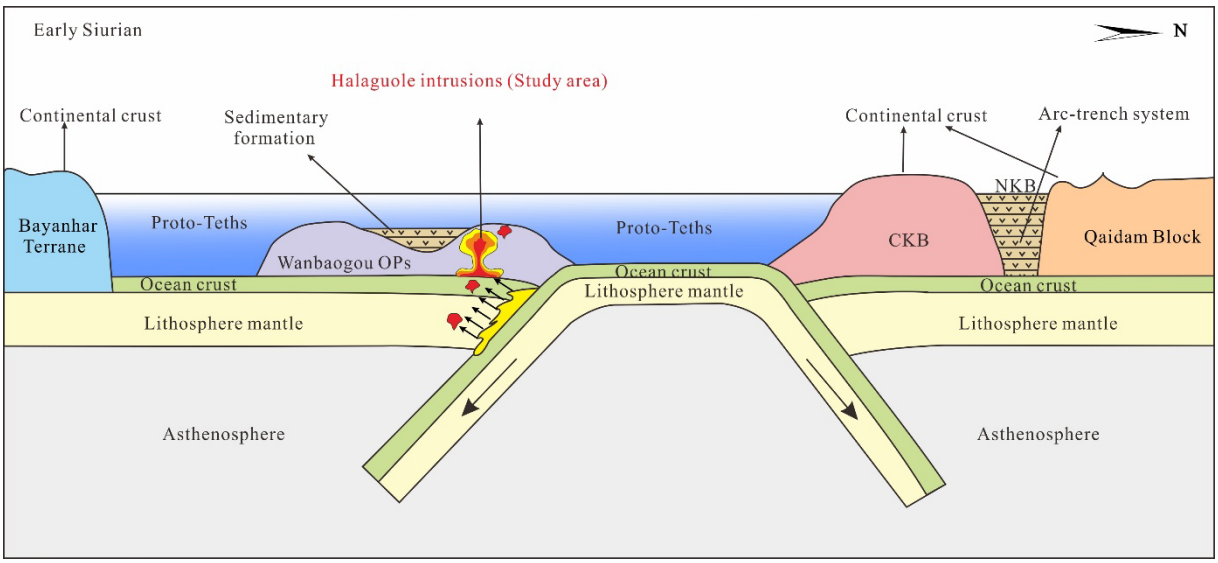


Fig. 3 Simplified geodynamic and petrogenetic models to illustrate the tectonic evolution in the East Kunlun and the generation of the Halaguole mafic-ultramafic intrusions during the Paleoproterozoic.

1. Chasse, M., Griffin, W.L., Alard, O., O'reilly, S.Y., Calas, G., 2018. Insights into the mantle geochemistry of scandium from a meta-analysis of garnet data. Lithos. 310, 409-421.
2. Dong, G.C., Luo, M.F., Mo, X.X., et al., 2018. Petrogenesis and tectonic implications of early Paleozoic granitoids in East Kunlun belt: Evidences from geochronology, geochemistry and isotopes. Geoscience Frontiers. 9,1383-1397.
3. Habtoor, A., Ahmed, A. H., Harbi, H., 2016. Petrogenesis of the alaskan-type mafic-ultramafic complex in the makkah quadrangle, western arabian shield, saudi arabia. Lithos. 263, 33-51.
4. Helmy, H.M., Abd, Yasser, M., El-Rahman, Y.M., Yoshikawa, M., Shibata, T., Arai, S., Tamura, A., Kagami, H., 2014. Petrology and Sm-Nd dating of the Genina Gharbia Alaskan-type complex (Egypt): insights into deep levels of Neoproterozoic island arcs. Lithos 198-199, 263-280.
5. Khedr, M. Z., Arai, S., 2016. Petrology of a neoproterozoic alaskan-type complex from the eastern desert of egypt; implications for mantle heterogeneity. Lithos. 263, 15-32.
6. Li, C. S., Thakurta, J., Ripley, E. M., 2012. Low-Ca contents and kinkbanded textures are not unique to mantle olivine: Evidence from the Duke Island complex, Alaska. Mineralogy and Petrology. 104, 147–153.
7. Li, S.J., Sun, F.Y., Gao, Y.W., Zhao, J.W., Li, L.S., Yang,O., 2012. Theoretical guidance and practice of small rock body into large ore mine-Introduction and significance of breakthrough in searching for copper-nickel ore in Xiazhihamu mine, East Kunlun, Qinghai. Northwest Geology. 45, 185-191.
8. Peng B., Sun, F.Y., Li, B.L., 2016. The geochemistry and geochronology of the Xiarihamu II mafic-ultramafic complex, Eastern Kunlun, Qinghai Province, China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. Ore Geology Reviews. 73, 13-28.
9. Reagan, M. K., Ishizuka, O., Stern, R. J., Kelley, K. A., et al., 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the izu-bonin-mariana system. Geochemistry, Geophysics, Geosystems : G3, 11(3), n/a.
10. Rollinson, H., 2008. The geochemistry of mantle chromitites fromthe northern part of the Oman ophiolite: inferred parental melt compositions. Contributions to Mineralogy and Petrology. 156, 273-288.
11. Song X..Y, Yi J.N., Chen L.M., et al., 2016. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. Economic Geology. 111, 29-55.
12. Sun, F.Y., Chen, G., Chi, X., 2003. A comprehensive study on the metallogenetic pattern and direction of mineralization in the Xinjiang-Qinghai East Kunlun Orogenic Belt. Changchun:

Institute of Geological Survey, Jilin University.
13. Sun, F.Y., Li, B., Ding, Q., 2009. Study on the major problems of mineralization in the East Kunlun Orogenic Belt. Changchun: Institute of Geological Survey, Jilin University.
14. Wang, G., 2014. Research on nickel ore mineralization in the East Kunlun orogenic belt. Jilin University.
15. Wang, Z., Li, M.Y.H., Liu, Z.R.R., Zhou, M.F., 2021. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. Ore Geology Reviews. 128, 103906.
16. Xu, X., Song, S.G., Su L., 2016. Formation age and tectonic significance of the Wanbaogou basalts in the middle East Kunlun orogenic belt. Acta Petrologica Et Mineralogica. 35, 965-980.

***Петрогенезис и потенциал скандиевой минерализации раннесилурийского комплекса аляскинского типа Халаголо в Восточно-Куньлуньском орогене**

Сун Линъюнь, Е Цянь
Геологический факультет, Цзилиньский университет, Чанчунь, 130061, КНР, e-mail: fxia@ecut.edu.cn

Мафит-ультрамафитовые интрузии Халаголо во Восточнокуньлуньском орогене, исследованные в данной работе, демонстрируют признаки комплекса аляскинского типа с повышенным содержанием скандия. Комплекс сложен перидотитами, пироксенитами и габбро, при этом наблюдается выраженное кольцевое зонирование литотипов от ядра к периферии. Тектоническая эволюция Восточного Куньлуня в палеозое контролировалась двусторонней субдукцией океанической коры в системе плато-дуга-желоб Ванбаогоу. Однако прежние исследования в основном были сосредоточены на северной субдукции в области к северу от Центрального разлома Куньлуня (CKLF), тогда как южная субдукция изучена слабо, и по сей день продолжаются дискуссии о времени прекращения субдукции океанической коры и начале коллизионного орогенеза.

Такое тектоническое положение способствовало формированию многочисленных рудоносных мафит-ультрамафитовых интрузий, благоприятных для образования Co-Ni и Sc месторождений. В настоящем исследовании интрузия Халаголо была изучена с целью уточнения времени перехода от двусторонней субдукции к коллизионному орогенезу в прототетисовом океане, а также для оценки потенциала скандиевой минерализации. Работа включала петрографический анализ, датирование цирконов методом U-Pb и анализ изотопов Hf, определение содержания главных и редких элементов в породах, а также электронно-зондовый микроанализ.

Результаты U-Pb датирования цирконов показали, что формирование массива произошло в раннем силуре — 437–440 млн лет назад. Изотопы Hf в цирконах габбро указывают на происхождение магмы из обогащённой мантии ($\varepsilon Hf(t) = 0.25–6.68$). Данные по основным и редким элементам указывают на калькалиновую толеитовую серию с высоким индексом Mg#, сформированную в условиях островной дуги, при этом все литотипы происходят из одного магматического источника и сформированы в результате фракционной кристаллизации. Эти характеристики соответствуют классическим признакам комплексов аляскинского типа.

Содержание Sc в интрузиях Халаголо варьирует от 1.96 до 224.50 ppm; образцы пироксенперидотитов и габбро содержат Sc в концентрациях, достигающих промышленных значений (Sc_2O_3 = 50 ppm). Клинопироксен и амфибол выступают в качестве основных носителей Sc. Минеральный состав интрузий идентичен комплексам аляскинского типа и показывает признаки, характерные для островнодуговой тектонической обстановки.

Электронно-зондовый анализ оливина, клинопироксена, амфибола, шпинели и биотита позволил охарактеризовать химический состав интрузий. Расчёты содержаний Al_2O_3 (14.59–15.90 мас.%), TiO_2 (0.60–2.02 %), FeO/MgO (1.02–1.13) в материнской магме указывают на её сходство с базальтами зоны перед дугой и островной дуги. Кроме того, предполагается, что магма имела высокое содержание воды и высокую фугацию кислорода.

Мафит-ультрамафитовые интрузии Халаголо демонстрируют чётко выраженные геохимические признаки субдукционной зоны: повышенное содержание воды, обогащение LILE, обеднение Nb относительно La, отрицательные аномалии Zr, положительные аномалии Pb и сильное обогащение Ba и Sr. Эти данные свидетельствуют о том, что интрузии сформировались при частичном плавлении метасоматизированного мантийного клина под

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

воздействием субдукционных флюидов. В результате образовалась водообогащённая калькалиновая базальтовая магма с островнодуговыми свойствами. Таким образом, интрузии обладают высоким потенциалом скандиевой минерализации и представляют собой перспективный объект на Sc.

Объединение данных предыдущих исследований с результатами настоящей работы позволяет сделать вывод, что формирование интрузий Халаголо тесно связано с южной субдукцией прототетисовой океанической коры под плато Ванбаогоу, тем самым добавляя ключевое геологическое свидетельство двусторонней субдукции в прототетисовом океане. Закрытие океана произошло не позже раннего силура. В целом, полученные данные о массиве Халаголо способствуют более глубокому пониманию геодинамических процессов формирования древних океанов и тектонической эволюции в раннепалеозойскую эпоху, а также расширяют представление о потенциале минерализации комплексов аляскинского типа.

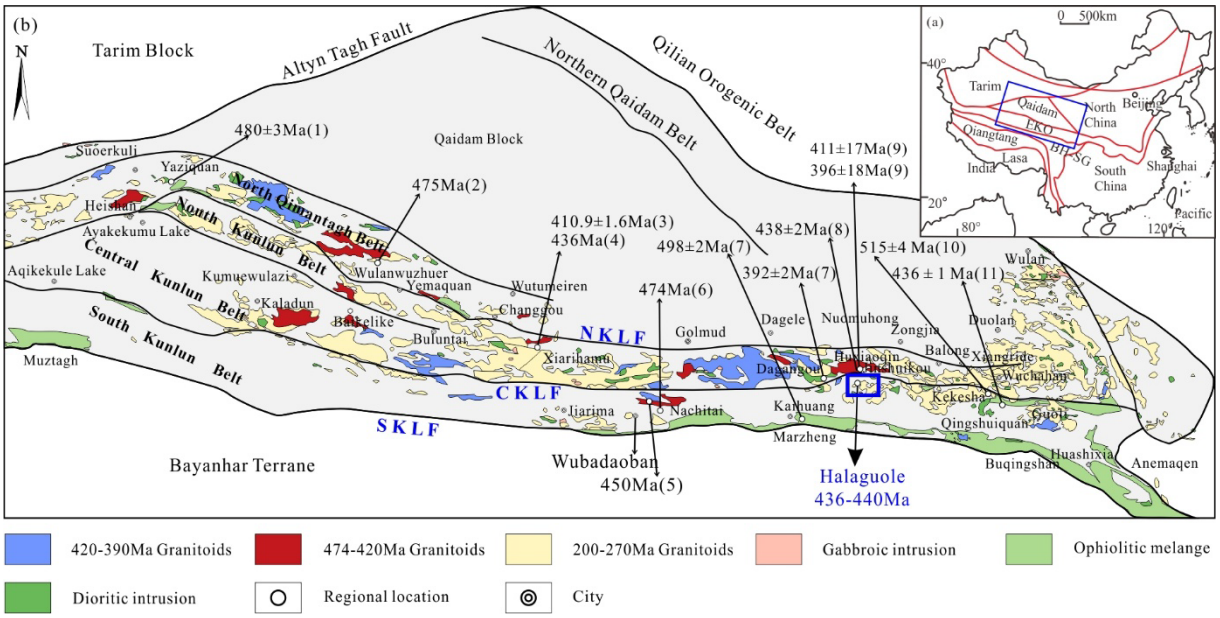


Рис. 1. Геотектоническое положение Восточного Куньлуня (по: Sun et al., 2003, 2009, с изменениями).

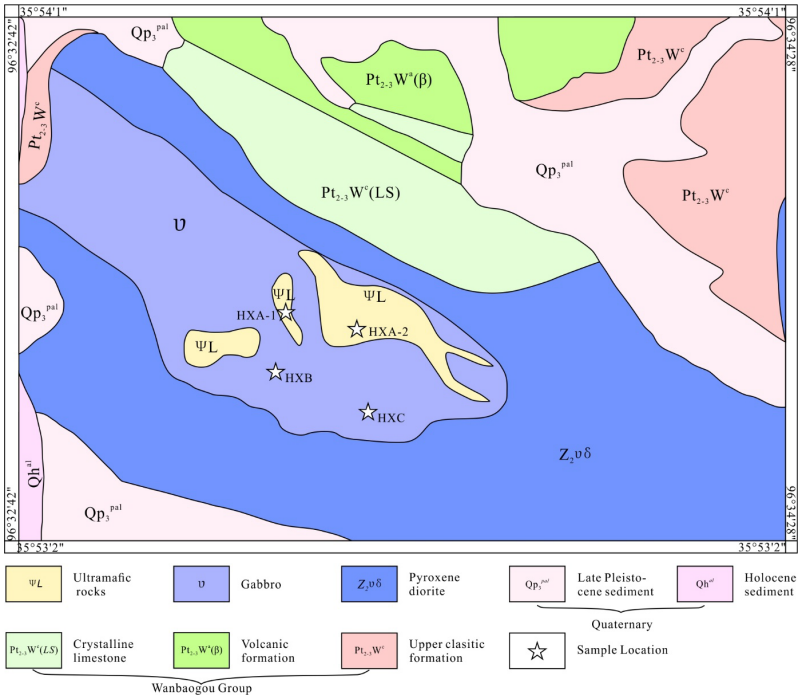


Рис. 2. Региональная геологическая карта и схема распространения мафит-ультрамафитовых интрузий в районе Халаголо, пров. Цинхай.

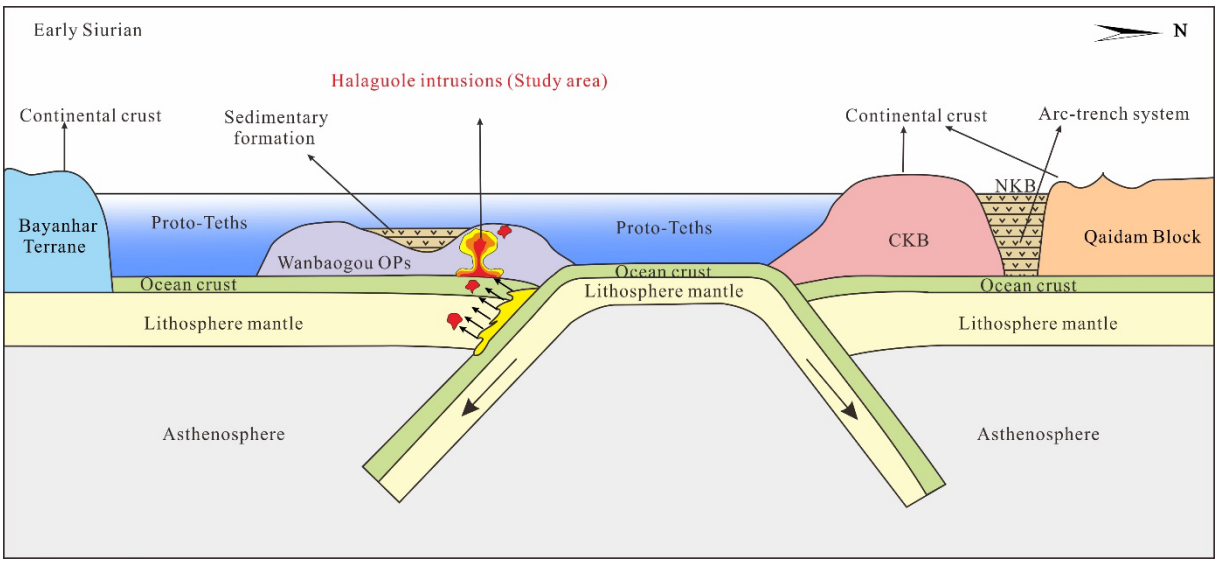


Рис. 3. Схематическая геодинамическая и петрогенетическая модель, иллюстрирующая тектоническую эволюцию Восточного Куньлуня и формирование интрузий Халаголо в палеозое.

1) Chasse, M., Griffin, W.L., Alard, O., O'reilly, S.Y., Calas, G., 2018. Insights into the mantle geochemistry of scandium from a meta-analysis of garnet data. Lithos. 310, 409-421.

2) Dong, G.C., Luo, M.F., Mo, X.X., et al., 2018. Petrogenesis and tectonic implications of early Paleozoic granitoids in East Kunlun belt: Evidences from geochronology, geochemistry and isotopes. Geoscience Frontiers. 9,1383-1397.

3) Habtoor, A., Ahmed, A. H., Harbi, H., 2016. Petrogenesis of the alaskan-type mafic-ultramafic complex in the makkah quadrangle, western arabian shield, saudi arabia. Lithos. 263, 33-51.

4) Helmy, H.M., Abd, Yasser, M., El-Rahman, Y.M., Yoshikawa, M., Shibata, T., Arai, S., Tamura, A., Kagami, H., 2014. Petrology and Sm-Nd dating of the Genina Gharbia Alaskan-type complex (Egypt): insights into deep levels of Neoproterozoic island arcs. Lithos 198-199, 263-280.

5) Khedr, M. Z., Arai, S., 2016. Petrology of a neoproterozoic alaskan-type complex from the eastern desert of egypt; implications for mantle heterogeneity. Lithos. 263, 15-32.

6) Li, C. S., Thakurta, J., Ripley, E. M., 2012. Low-Ca contents and kinkbanded textures are not unique to mantle olivine: Evidence from the Duke Island complex, Alaska. Mineralogy and Petrology. 104, 147–153.

7) Li, S.J., Sun, F.Y., Gao, Y.W., Zhao, J.W., Li, L.S., Yang,O., 2012. Theoretical guidance and practice of small rock body into large ore mine-Introduction and significance of breakthrough in searching for copper-nickel ore in Xiazhihamu mine, East Kunlun, Qinghai. Northwest Geology. 45, 185-191.

8) Peng B., Sun, F.Y., Li, B.L., 2016. The geochemistry and geochronology of the Xiarihamu II mafic-ultramafic complex, Eastern Kunlun, Qinghai Province, China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. Ore Geology Reviews. 73, 13-28.

9) Reagan, M. K., Ishizuka, O., Stern, R. J., Kelley, K. A., et al., 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the izu-bonin-mariana system. Geochemistry, Geophysics, Geosystems : G3, 11(3), n/a.

10) Rollinson, H., 2008. The geochemistry of mantle chromitites fromthe northern part of the Oman ophiolite: inferred parental melt compositions. Contributions to Mineralogy and Petrology. 156, 273-288.

11) Song X..Y, Yi J.N., Chen L.M., et al., 2016. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. Economic Geology. 111, 29-55.

12) Sun, F.Y., Chen, G., Chi, X., 2003. A comprehensive study on the metallogenetic pattern and direction of mineralization in the Xinjiang-Qinghai East Kunlun Orogenic Belt. Changchun:

Institute of Geological Survey, Jilin University.
13) Sun, F.Y., Li, B., Ding, Q., 2009. Study on the major problems of mineralization in the East Kunlun Orogenic Belt. Changchun: Institute of Geological Survey, Jilin University.
14) Wang, G., 2014. Research on nickel ore mineralization in the East Kunlun orogenic belt. Jilin University.
15) Wang, Z., Li, M.Y.H., Liu, Z.R.R., Zhou, M.F., 2021. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. Ore Geology Reviews. 128, 103906.
16) Xu, X., Song, S.G., Su L., 2016. Formation age and tectonic significance of the Wanbaogou basalts in the middle East Kunlun orogenic belt. Acta Petrologica Et Mineralogica. 35, 965-980.

Comprehensive prediction technology and application of sandstone-type uranium deposits in Songliao Basin, Northeastern China

Mingkuan Qin[1], Qiang Guo[1], Shaohua Huang[1], Jing Xiao[1], Jiye Song[1], Licheng Jia[1], Jialin Liu[1], Wenjian Jiang[2]
[1]Beijing Research Institute of Geology, CNNC, Beijing, China, e-mail: qinmingkuan@briug.cn;
[2]East China University of Technology, Nanchang, China, e-mail: jessica_0@163.com

Sandstone-type uranium deposits are the main target type for uranium exploration in China. As one of the large Meso-Cenozoic sedimentary basins in northern China, the Songliao Basin has been a key basin for sandstone-type uranium mineral exploration since the new century, and a major breakthrough has been made in the Qianjiadian Sag in the southern part of the basin, where a modern in-situ leaching uranium mining project has been built. However, due to the lack of systematic and comprehensive scientific and technological research, the prospecting effect in the periphery of the known areas and the northern part of the basin has been poor. A number of key basic geological and theoretical problems restricting regional prospecting breakthroughs in the basin need to be solved urgently (such as the genesis of tabular uranium ore bodies). At the same time, the basin has a large area, complex topography and geomorphology, and a thick Quaternary, which poses a series of technical challenges for efficient and high-precision detection and prediction evaluation. From 2018 to 2021, with the support of CAEA, the author's team organized and implemented the key scientific and technological research project Comprehensive Evaluation Technology Research on Sandstone-type Uranium Deposits in Songliao Basin, aiming to promote new breakthroughs in in-situ leaching sandstone uranium prospecting in the basin through integrated research on theory, technology, prediction and engineering verification.

The overall technical idea adopted in this study is: taking the study of basin structure-formation-transformation as the main line, supported by the study of deposit genesis, and driven by the integration of sky-ground-deep integrated technology. The main achievements and effects are as follows.

(1) The characteristics of inversion structures in the Songliao Basin and their ore-controlling effects were studied, and a new understanding of favorable mineralization of positive inversion structures was proposed. A total of 10 large-scale inversion structure zones, 4 favorable structural inversion zones for uranium mineralization, and 9 favorable structural areas were identified in the basin.

(2) The paleotectonic-paleohydrodynamic system pattern of the main target layers of the Upper Cretaceous in the basin was reconstructed, and the source-sink system of multiple river systems inflow-dam-type water blocking-saddle-type water discharge in the southern part of the basin was constructed. It is proposed that the area where the paleotectonic-paleohydrodynamic pattern is reversed during the mineralization period is favorable for uranium mineralization; the basic characteristics of the paleohydrodynamic system of the Yao Jia Formation (K2y) in the main ore-bearing horizon during the mineralization period are: the northern part is dominated by the seepage hydrodynamic system, and the southern part is dominated by the infiltration hydrodynamic system.

(3) Two major uranium metallogenic stratigraphic units of the Upper Cretaceous were divided, opening up new prospecting horizons. The division marks of the red and variegated strata (Quantou Formation-Yao Jia Formation) in the southern part were defined, and the uranium-bearing horizon of the Qingshankou Formation was divided for the first time and applied to guide prospecting; through the comparison of the differences in uranium metallogenic conditions between the north and south of the basin, it is proposed that the southern part of the basin should adhere to the new prospecting idea of looking for gray in red while the northern part should look for large sand bodies and red in gray.

(4) The "six-in-one multi-cause coupling" tabular uranium mineralization model of red and variegated strata was established. The six elements refer to six metallogenic elements such as structure, formation, fluid, redox, regional thermal field and adsorption, multi-cause coupling refers

to multiple environment coupling, key element coupling, etc., and one refers to the space-time positioning of uranium deposits.

(5) Five key technology breakthroughs have been achieved, and a technical system for positioning, identification and evaluation of sandstone uranium deposits in large rift basins was integrated and constructed, and the uranium metallogenic prospect and the uranium resource potential of the whole basin were systematically predicted. Five key technologies were: positioning of hidden inversion structures and denudation skylights, determination of uranium metallogenic multi-source fluid coupling, fine identification of stratigraphic structure and sand bodies in thick covered areas, identification of weak abnormal information of deep uranium mineralization, and determination of the optimal configuration area of basin structure-formation-transformation; the quantitative prediction of the uranium resource potential of the whole basin is more than 310,000 tons, which provides important supporting data for the follow-up uranium exploration work deployment in the basin.

(6) Some of the predicted prospective areas were verified by drilling, and new industrial uranium mineralization was discovered, achieving prospecting breakthroughs in new areas, new horizons and new types. In the southern part of the basin, a new large-scale uranium ore field was implemented, with thousands of tons of new potential resources; in the predicted metallogenic prospective area in the northern part of the basin, three industrial uranium ore holes were newly discovered in the Sifangtai Formation (K2s), Quantou Formation (K2q) and other horizons, realizing the prospecting breakthrough of sandstone uranium in the northern part of the Songliao Basin.

*Комплексная технология прогноза и её применение к песчаниковым урановым месторождениям в пределах Сунляоского бассейна, Северо-Восточный Китай

Минькуань Цинь[1], Цянь Го[1], Шаохуа Хуан[1], Цзин Сяо[1], Цзие Сун[1], Личэн Цзя[1], Цзялинь Лю[1], Вэньцзянь Цзян[2]

[1]Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, CNNC, Пекин, Китай, e-mail: qinmingkuan@briug.cn; [2]Восточно-Китайский технологический университет, Наньчан, Китай, e-mail: jessica_0@163.com

Песчаниковые урановые месторождения являются основным типом объектов для ураноразведки в Китае. Сунляоский бассейн — один из крупных мезо-кайнозойских осадочных бассейнов Северного Китая — с начала XXI века стал ключевым районом для поисков урана песчаникового типа. Крупный прорыв был достигнут в прогибе Цяньцзядянь в южной части бассейна, где построено современное предприятие по скважинному подземному выщелачиванию урана. Однако в силу отсутствия системных и всесторонних научно-технологических исследований эффективность поисков на периферии известных объектов и в северной части бассейна остаётся низкой. Ряд важнейших геологических и теоретических проблем, сдерживающих региональные поисковые открытия, требует срочного решения (например, генезис пластовых урановых рудных тел). Кроме того, из-за значительных размеров бассейна, сложного рельефа и мощного покрова четвертичных отложений возникают серьёзные технические сложности при высокоэффективной и высокоточной разведке и прогнозной оценке.

С 2018 по 2021 гг. при поддержке CAEA коллектив авторов реализовал ключевой научно-технический проект «Исследование технологий комплексной оценки песчаниковых урановых месторождений Сунляоского бассейна» с целью способствовать новым открытиям в области скважинной ураноразведки в бассейне путём интегрированного анализа теории, технологий, прогнозов и инженерной верификации.

Общая техническая концепция исследования заключалась в рассмотрении структуры, формирования и преобразования бассейна в качестве главной линии, при поддержке изучения генезиса руд, с акцентом на интеграцию данных из воздушных, наземных и глубинных источников. Основные достижения и результаты включают следующее.

(1) Изучены особенности инверсионных структур Сунляоского бассейна и их роль в рудообразовании; предложено новое понимание условий благоприятной минерализации в зонах положительных инверсий. Всего выделено 10 крупных зон инверсионных структур, 4 благоприятных инверсионных зоны для урановой минерализации и 9 благоприятных тектонических зон.

(2) Восстановлена палеотектоническая и палеогидродинамическая система целевых горизонтов верхнего мела, реконструирована система источник-сток для многочисленных речных систем, включающая приток, водоупоры типа плотины и разрядку типа седловины в южной части бассейна. Установлено, что области, в которых в период минерализации происходило инвертирование палеотектонической-палеогидродинамической схемы, являются благоприятными для уранонакопления. Основные особенности палеогидродинамической системы свиты Яоцзя (K_2y) в продуктивном горизонте в период минерализации: на севере преобладает фильтрационная система, на юге — инфильтрационная.

(3) Выделены два основных уранорудных стратиграфических подразделения верхнего мела, что открыло новые горизонты для поисков. В южной части бассейна определены стратиграфические границы между красноцветными и пестроцветными отложениями (свиты Цюаньтоу и Яоцзя), впервые выделен и применён к поискам ураносодержащий горизонт

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

свиты Циншанькоу. Путём сопоставления условий уранонакопления между северной и южной частями бассейна предложена концепция: на юге следует искать «серое в красном», на севере — «красное в сером» и крупные песчаные тела.

(4) Создана модель пластовой урановой минерализации пестроцветных отложений «шесть в одном» с многопричинным сопряжением. Шесть элементов включают структуру, формацию, флюиды, окислительно-восстановительные условия, региональное тепловое поле и адсорбцию; многопричинное сопряжение отражает совместное влияние различных факторов среды и ключевых элементов, а «один» означает пространственно-временную привязку урановых залежей.

(5) Достигнуто пять ключевых технологических прорывов и интегрирована система методик позиционирования, идентификации и оценки песчаниковых урановых месторождений в крупных рифтовых бассейнах. Системно предсказаны перспективы уранонакопления и потенциальные ресурсы урана в пределах всего бассейна. Пять ключевых технологий: выявление скрытых инверсионных структур и денудационных окон, определение многокомпонентного состава рудообразующих флюидов, детальная интерпретация стратиграфии и песчаников в районах с мощным покровом, идентификация слабых аномалий глубинной урановой минерализации, определение оптимальных конфигураций структура-формация-преобразование. Расчётный потенциал урановых ресурсов бассейна превышает 310 тыс. тонн, что даёт важную основу для планирования дальнейших работ.

(6) Часть прогнозных перспективных участков была проверена бурением, открыта новая промышленная урановая минерализация, достигнуты поисковые прорывы в новых районах, новых горизонтах и новых типах. В южной части бассейна реализовано новое крупное урановое месторождение с потенциальными ресурсами в тысячи тонн; в северной части бассейна в прогнозной зоне рудонакопления в пределах свит Сифантай (K_2s), Цюаньтоу (K_2q) и других горизонтов вскрыты три скважины с промышленной урановой минерализацией, что стало прорывом в поисках песчаниковых урановых месторождений на севере Сунляоского бассейна.

Hydrocarbon Accumulations of Magmatic Rock in China

Shan Xuanlong, Yi Jian, Li Ang
College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Magmatic oil and gas accumulations are important exploration targets in the deep part of basins, such as Cretaceous acid volcanic rock in Songliao Basin, Paleozoic intermediate- basic volcanic rock in Junggar and Sichuan Basin, Paleozoic-Mesozoic granite and intermediate- acid volcanic rock in South China Sea, Mesozoic acid volcanic rock in Bohai Sea. The exploration result shows that there are high daily production wells of all lithologies, but granite and rhyolite have the highest daily production. China has grown into the main body of global magmatic exploration in terms of reserves. Favorable lithological facies, intense tectonic and weathering modification and strong dissolution are the keys to the reservoir formation of magmatic rocks. Some magmatic rocks are buried hills and some are volcanic layers within the basins. The main controlling factors of hydrocarbon accumulation are that hydrocarbon supply window controls lateral hydrocarbon supply of source rocks, structural fracture and dissolution improve reservoir performance, structural style and evolution control hydrocarbon preservation and accumulation. There are three models of accumulations, namely, granitic weathered crusts, igneous complex, and intermediate - acidic volcanic rocks.

Key words: Hydrocarbon Accumulations; Magmatic Rock; reservoir formation; China

*Нефтегазовые скопления магматических пород Китая

Шань Сюаньлун, И Цзянь, Ли Анг
Геологический факультет, Цзилиньский университет, Чанчунь, 130061, Китай

Магматические скопления нефти и газа представляют собой важные объекты поисков на глубинных участках впадин, таких как кислые вулканические породы мела в Сунляоской впадине, палеозойские вулканиты среднего и основного состава в Джунгарской и Сычуаньской впадинах, палеозойско-мезозойские гранитоиды и вулканиты среднего и кислого состава в Южно-Китайском море, мезозойские кислые вулканиты в Бохайском море. Результаты разведки показывают, что скважины с высокой суточной продуктивностью выявлены во всех перечисленных литотипах, однако наибольшая продуктивность характерна для гранитов и риолитов. В настоящее время Китай стал ведущей страной в мире по объёму разведки магматических коллекторов.

Формирование коллекторов в магматических породах контролируется благоприятными литофациями, интенсивным тектоническим и выветриванием, а также активными процессами растворения. Часть магматических тел представлена в виде погребённых холмов, другая часть — как вулканические покровы внутри впадин. Основными контролирующими факторами нефтегазонакопления являются: – положение в «окне генерации» углеводородов, которое определяет латеральное питание от пород-источников; – трещиноватость и процессы растворения, повышающие коллекторские свойства; – структура и история тектонического развития, определяющие сохранность и аккумуляцию углеводородов.

Выделяются три основные модели нефтегазонакопления: гранитные коры выветривания, магматические комплексы, вулканиты среднего и кислого состава.

Ключевые слова: нефтегазовые скопления; магматические породы; формирование коллектора; Китай

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Sandstone-type uranium mineralization in southwest area of Qaidam Basin, NW China

Teng Xueming[1,2], Ao Cong[1,2], Wang Shaoyi[1,2], Jin Ruoshi[1,2], Cheng Yinhang[1,2]
[1]Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China, e-mail: cugbtxm@126.com; [2]Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

As the largest (covering an area of ca. 12×10^4 km^2) high-altitude (with an elevation of 2.7~3km) terrestrial multi-energy intermontane basin in the northeastern Tibetan Plateau (Fig. 1a), the Qaidam Basin recorded exceptionally thick Mesozoic and Cenozoic sediments varying from 3-16 km (Hanson et al., 2001; Jian et al., 2013; Yu et al., 2020). It is bounded by Qilian Mountains to the north and east, East Kunlun Mountains to the south and Altun Mountains to the northwest (Jian et al., 2013; Fig. 1b).

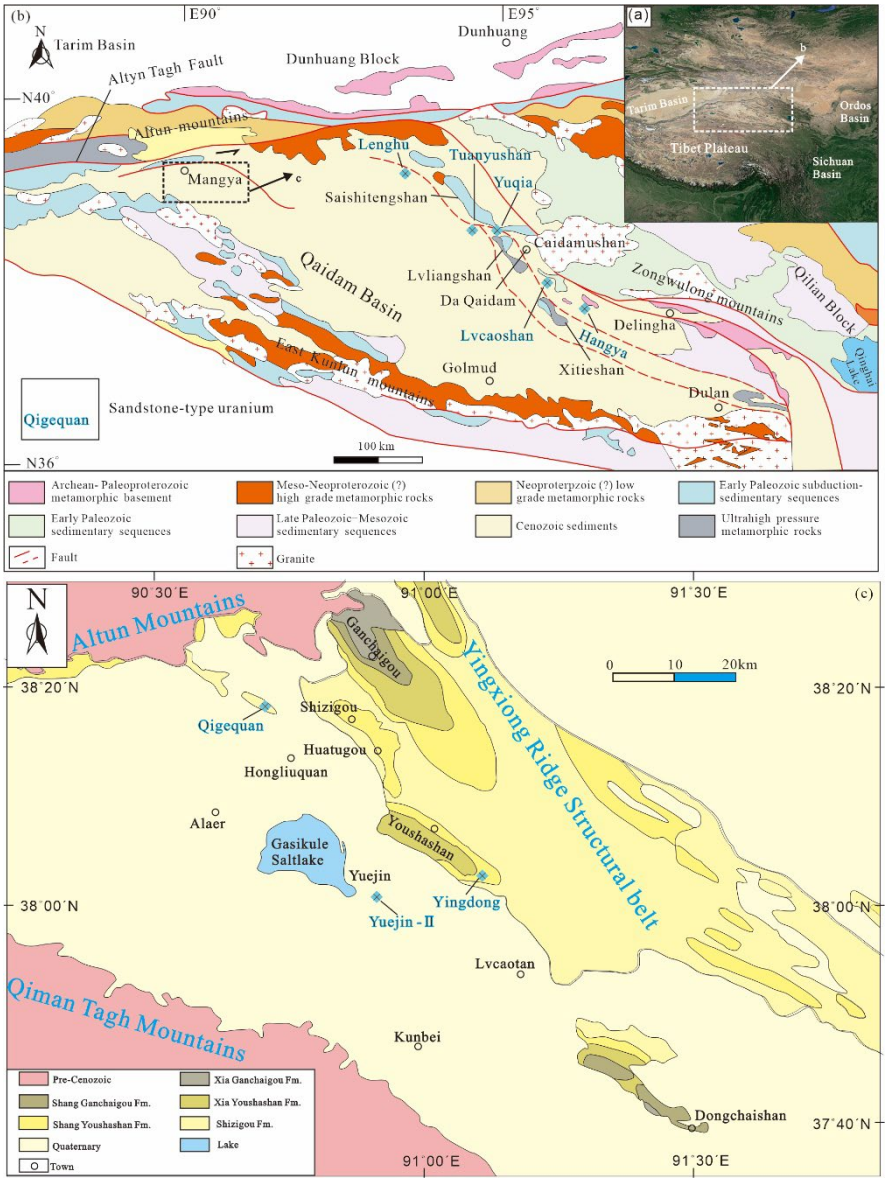


Fig. 1. (a) Satellite map showing the location of the Qaidam Basin; (b) Geological sketch map of the Altun-Qilian-Kunlun (AQK) orogenic system in the northern Tibet, with uranium spots along the northern margin; (c) Regional geological sketch of southwestern area of the Qaidam Basin and its adjacent orogenic areas, with the industrial-level uranium spots (both modified after Ao et al., 2022).

The Qaidam Basin witnessed several stages of sandstone-type uranium prospecting. With several decades before 2015 of exploration investment in the Qaidam Basin, potential Jurassic sandstone-hosted uranium rich prospecting area and spots have been detected, which dominantly concentrated in the northern part of the basin. Especially, in the past ten years, relying on the uranium geological survey project supported by the China Geological Survey, and the cooperation with the Qinghai oil company, following by drilling work implemented by China National Nuclear Corporation, breakthroughs on industrial-level sandstone-type uranium exploration situated in Neogene Youshashan Formation and Shizigou Formation, and Quaternary Qigequan Formation have been achieved in Qigequan area, Yuejin-II area and Yingdong area, southwestern area of the Qaidam, with high grade, thick uranium bodies been detected (Fig. 1c). The discovered clues to sandstone-type uranium mineralization have been verified the tremendous resource potential in the southwestern area of the Qaidam Basin (Ao et al., 2022; Chen et al., 2024).

The ore-forming controlling conditions can be summarized as following three aspects:

1. Field investigations revealed that peripheral igneous and ancient strata usually contains uranium ranging from 4.3-39 ppm. Especially, the uranium leaching rate for Hercynian granite and monzonitic granite is as high as 87%, indicating the peripheral rocks could have been provide plentiful uranium.

2. Since the sedimentary period of the Shangyoushashan Formation, the deltatic-fluvial deposition system have been widely developed. Since the sedimentation of the Shizigou Formation in the Late Miocene, with the eastward migration of the sedimentary center in the Qaidam Basin, the lacustrine sediments in the southwestern Qaidam Basin have completely disappeared, and the sediments are mainly composed of poorly selected sand and gravel with rapid accumulation, showing characteristics of deltatic, fluvial and alluvial fan sedimentary environments. These sandstone formed in frontal facies of the braided river delta often provide favorable space for uranium settlement.

3. The southwest area of Qaidam underwent multiple structural events controlled by Altun and Qimantag oregenic belts. The Qigequan, Yuejin-II and Yingdong uranium spots are all located along one wing of the anticlines or at the slope. The Yingxiongling Ridge Structural Belt underwent intense folding and uplift during the end of Shizigou sedimentary period at ca. 3 Ma. Induced by Altun fault zone activities at ca. 2.9-2.6 Ma, a series of anti S-type sub-fold belts have been formed, including the Qigequan anticlines, the Youshashan anticlines and Yuejin Slope. These fold belts could not only lift the strata and form favorable slope zones. It can also erode some strata, exposing old strata to the surface The structural skylight formed by erosion facilitates the entry of oxygen rich atmospheric precipitation into the target layer, activating and migrating uranium materials in the "red layer" during the diagenetic stage, and further enriching mineralization in the part rich in reducing media. And the fracture also provides a good channel for the injection of reducing media such as deep oil and gas.

In summary, based on these discovered clues, the sandstone-type uranium could occur at any strata, which with proper structural conditions, and proper sand bodies including reduced agent or encountered with deep-originated oil and gas. The following uranium exploration should focus on the turning end of latest folds or at the slope area, overlapping by meandering river sedimentary facies and oxidation-reduction transition zones.

1. Ao, C., Teng, X.M., Wei, Xu.B., et al. Geochemistry of Mudstones/Silty Mudstones from the Qigequan Formation and Shizigou Formation in Yuejin-IIArea, Southwestern Area of the Qaidam Basin: Implications for Sedimentary Environment and Sandstone-Type Uranium Mineralization. Minerals. 2022, 12, 658. https://doi.org/10.3390/min12050658.
2. Chen, Q., Chen, Y.J,, Chen, B., et al. Characteristics and genetic analysis of uranium minerals in the Yingdong area of the northwestern margin of Qaidam Basin. Mineral Exploration. 2024, 15(5), 745-755 (in Chinese with English abstract).
3. Hanson, A.D., Ritts, B.D., Zinniker, D., et al. Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam basin, northwest China. AAPG Bulletin. 2001, 85, 601–619.

4. Jian, X., Guan, P., Zhang, W., Feng, F. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for provenance and weathering. Chemical Geology. 2013, 360–361, 74–88.
5. Yu, P.H., Ma, J.L., Liao, J.B., Li, Z.Y., Di, J. Geochemistry and paleoenvironment significance of Lulehe Formation/Xiaganchaigou Formation located in the north area of Qaidam Basin. Arid Land Geography. 2020,43, 679–686 (in Chinese with English abstract).

*Песчаниковая урановая минерализация в юго-западной части Чайдамского бассейна, Северо-Западный Китай

Тэн Сюэмин[1,2], Ао Цун[1,2], Ван Шаои[1,2], Цзинь Жоуши[1,2], Чэн Иньхан[1,2]
[1]Тяньцзиньский центр Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай, e-mail: cugbtxm@126.com; [2]Лаборатория геологии урана Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай

Чайдамский бассейн, крупнейший внутриконтинентальный межгорный бассейн на северо-востоке Тибетского нагорья (рис. 1a), занимает площадь около 12×10^4 км² и располагается на высоте 2,7–3 км над уровнем моря. Он характеризуется мощной толщей мезозойских и кайнозойских отложений (от 3 до 16 км) (Hanson и др., 2001; Jian и др., 2013; Yu и др., 2020). Бассейн ограничен с севера и востока горами Цилянь, с юга — горами Восточного Куньлуня, с северо-запада — горами Алтын (Jian и др., 2013; рис. 1b).

В Чайдамском бассейне в разные годы проводились этапы поисков песчаниковых урановых месторождений. За несколько десятилетий до 2015 года в северной части бассейна были выявлены перспективные районы и участки урановой минерализации, связанной с юрскими песчаниками. Особенно за последние десять лет, благодаря проекту геологоразведки урана под эгидой Геологической службы Китая, в сотрудничестве с нефтяной компанией провинции Цинхай и буровым работам, проведённым Китайской национальной ядерной корпорацией, были достигнуты прорывы в разведке промышленной урановой минерализации песчаникового типа в свитах неогена Юшашань и Шицзыгоу, а также в четвертичной свите Цигэцюань. Высокосодержание урана и мощные рудные тела были обнаружены в районах Цигэцюань, Юэцзин-II и Иньдун на юго-западе бассейна (рис. 1c). Эти находки свидетельствуют о высоком ресурсном потенциале песчаниковой урановой минерализации в юго-западной части Чайдамского бассейна (Ао и др., 2022; Chen и др., 2024).

Рудоконтролирующие условия минерализации можно разделить на три основных аспекта:

1. Полевые исследования показали, что вмещающие породы — периферийные изверженные и древние осадочные комплексы — содержат от 4,3 до 39 ppm урана. Особенно высока выщелачиваемость урана из герцинских гранитов и монцонитовых гранитов (до 87%), что указывает на их роль как источника урана.
2. Начиная с отложения свиты Шаньюшашань, в бассейне широко развита дельтово-речная седиментация. С момента накопления свиты Шицзыгоу (поздний миоцен) в связи со смещением оси седиментации к востоку, лакустринные отложения в юго-западной части исчезают, и преобладают слабо сортированные песчано-гравийные отложения с быстрым накоплением, характерные для обстановки дельт, русловых потоков и аллювиальных конусов. Песчаники фронтальной фации разветвлённой речной дельты создают благоприятное пространство для аккумуляции урана.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

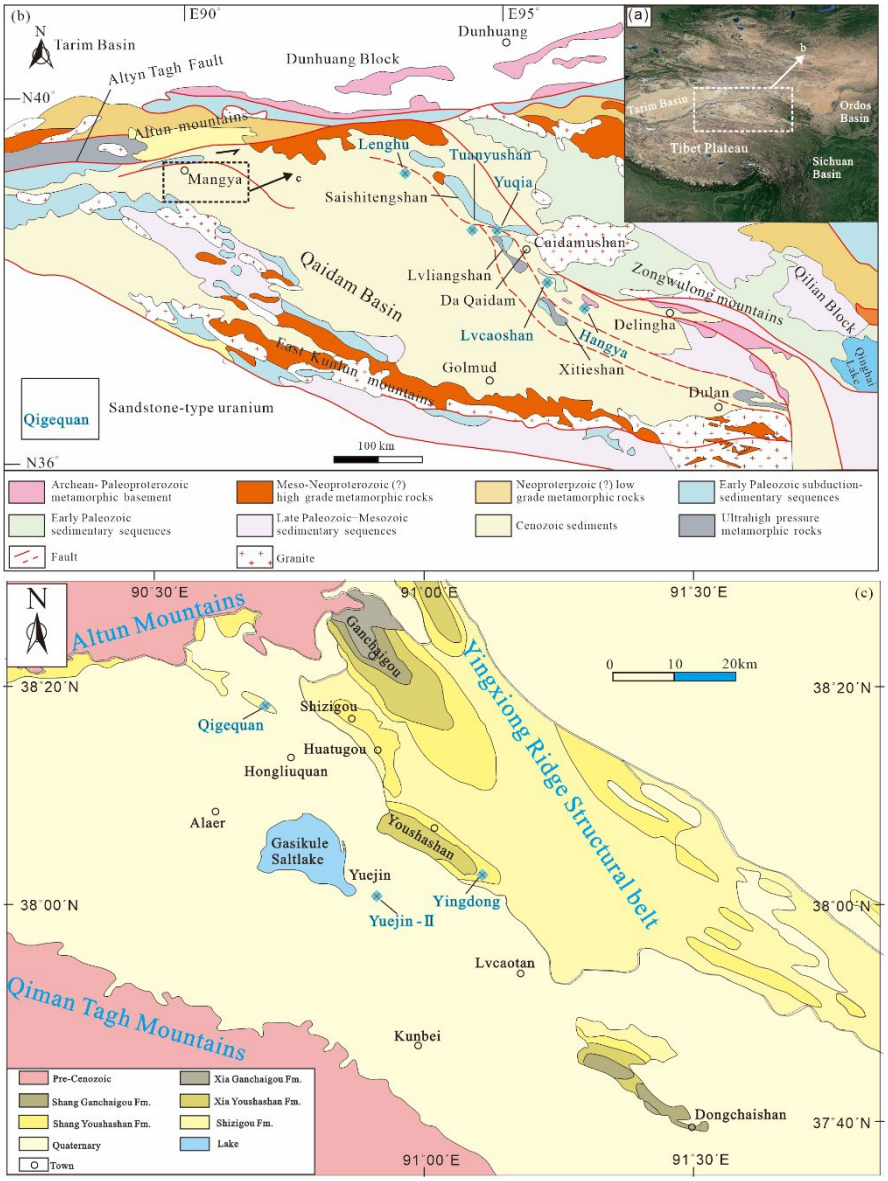


Рис. 1. (a) Спутниковая карта с расположением Чайдамского бассейна; (b) Геологическая схема орогенной системы Алтын–Цилянь–Куньлунь (AQK) на северной окраине Тибета с отмеченными точками урана вдоль северной границы; (c) Региональная геологическая схема юго-западной части Чайдамского бассейна и смежных орогенных поясов, с точками промышленной урановой минерализации (оба фрагмента модифицированы по Ao и др., 2022).

3. Юго-западная часть Чайдамского бассейна испытала ряд тектонических событий под контролем орогенных поясов Алтын и Цимантаг. Участки урановой минерализации Цигэцюань, Юэцзин-II и Иньдун приурочены к флангам антиклиналей или склонам. Структурный пояс Иньсюнлин подвергся интенсивному складкообразованию и поднятию в конце седиментации свиты Шицзыгоу (~3 млн лет назад). Под влиянием активизации разлома Алтын (2,9–2,6 млн лет назад) сформировались субскладчатые пояса анти-S-типа, включая антиклинали Цигэцюань, Юшашань и склон Юэцзин. Эти складчатые структуры не только способствовали формированию благоприятных склонов, но и вызвали эрозию, оголяя древние породы. Образовавшиеся структурные окна способствуют проникновению кислородсодержащих атмосферных вод в целевые горизонты, активируя и мигрируя уран из "красных слоёв" в условиях диагенеза, и способствуя его накоплению в зонах, богатых восстановителями. Разломы также обеспечивают каналы для поступления восстановительных агентов, таких как глубинные нефть и газ.

Таким образом, на основании выявленных закономерностей можно заключить, что песчаниковая урановая минерализация может формироваться в любых стратиграфических уровнях при наличии благоприятных структурных условий, развитых песчаников с восстановителями или контакта с глубинными нефтегазовыми флюидами. Последующие поисковые работы должны быть сосредоточены на участках в зонах изгиба складок или на склонах, перекрытых меандрирующими речными фациями и зонами перехода окислительно-восстановительной обстановки.

1. Ao, C., Teng, X.M., Wei, Xu.B., et al. Geochemistry of Mudstones/Silty Mudstones from the Qigequan Formation and Shizigou Formation in Yuejin-II Area, Southwestern Area of the Qaidam Basin: Implications for Sedimentary Environment and Sandstone-Type Uranium Mineralization. Minerals. 2022, 12, 658. https://doi.org/10.3390/min12050658.
2. Chen, Q., Chen, Y.J., Chen, B., et al. Characteristics and genetic analysis of uranium minerals in the Yingdong area of the northwestern margin of Qaidam Basin. Mineral Exploration. 2024, 15(5), 745–755 (на китайском с английской аннотацией).
3. Hanson, A.D., Ritts, B.D., Zinniker, D., et al. Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam basin, northwest China. AAPG Bulletin. 2001, 85, 601–619.
4. Jian, X., Guan, P., Zhang, W., Feng, F. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for provenance and weathering. Chemical Geology. 2013, 360–361, 74–88.
5. Yu, P.H., Ma, J.L., Liao, J.B., Li, Z.Y., Di, J. Geochemistry and paleoenvironment significance of Lulehe Formation/Xiaganchaigou Formation located in the north area of Qaidam Basin. Arid Land Geography. 2020, 43, 679–686 (на китайском с английской аннотацией).

Characteristics and implications of uranium-beryllium mineralization of the Baiyanghe Deposit in the Xuemistan Volcanic Belt, Xinjiang

Tian Jianji[1,2,3], Liu Chang[1,2,3], Wu Yu[2], Yang Wenlong[4], Yi Longsheng[1,2,3]
[1]National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing, China; [2]Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; [3]CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Techniques, Beijing, China; [4] No. 216 Geologic Survey, CNNC, Urumqi, Xinjiang, China

The Baiyanghe volcanic-hosted uranium-beryllium deposit is one of the largest uranium-rare metal metallogenic belt in Xinjiang province. The Baiyanghe uranium-beryllium (U-Be) deposit is located in the western section of the Xuemistan metallogenic belt, the exploration at Baiyanghe deposit only focused on uranium deposit for a long period, with minor clues of beryllium mineralization identified at certain areas. Based on the new exploration of the uranium and poly-metal deposit since 2007, the Baiyanghe deposit was identified as the largest beryllium deposit in Asia with medium-sized uranium reserves. During investigations into the metallogenesis of the Baiyanghe deposit, previous researchers used to study the uranium and beryllium mineralization in isolation, or treated them as the same products of a single metallogenic event. Consequently, the genetic relationship between uranium and beryllium mineralization remained unclear. Therefore, we provide systematic studies on the spatial distribution of U-Be ore bodies, ore-forming element associations, altered mineral assemblages, characteristics of fluorite associated with U-Be mineralization, geochronology of U-Be mineralization and contact relationships between ore minerals, this study determines that uranium and beryllium mineralization formed during distinct metallogenic processes.

1. The spatial distribution of uranium-beryllium ore bodies

In the Baiyanghe deposit, uranium (U) and beryllium (Be) ore bodies exhibit both spatial overlap and separation, with the Be ore bodies occupying a significantly larger spatial extent than the uranium(U) ore bodies. Uranium mineralization on the planar scale displays two trends: (1)Uranium mineralization belt near the northern margin contact zone of the Yangzhuang pluton trending NWW (northwest-west) and NE (northeast). (2)Uranium mineralization within the central-western section of the Yangzhuang pluton trending NW (northwest) and plunging southeastward. The distribution of ore bodies largely coincides with the exposure area of intermediate-mafic dikes within the Yangzhuang pluton. In cross-section, the U ore bodies are dominantly found close to the bottom of the granite porphyry, with the dominant uranium ore occurrence in both the endo- and exo-contact zones. Beryllium ore bodies exhibit a sheet-like (areal) distribution on the planar scale, characterized by relatively uniform mineralization. They are extensively distributed within the Yangzhuang pluton, covering over 50% of the pluton's surface area with both economic-grade and subeconomic-grade Be mineralization. In cross-section, Be ore bodies are also primarily localized near the basal contact of the granite porphyry, besides, the significant Be mineralization locally occurs within the interior of the Yangzhuang pluton. The distinct spatial distribution characteristics of the U and Be ore bodies are determined by different mineralization-controlling factors.

2. The enrichment of ore-forming elements

The assemblages of the enrichment of ore-forming elements in uranium (U) and beryllium (Be) ores can reflect the characteristics of U and Be mineralization. To investigate the elemental enrichment assemblages associated with U and Be mineralization and to provide insights into their relationship, U-dominant ores and Be-dominant ores from the Baiyanghe U-Be deposit were selected for trace element analysis, and compared with the trace element concentrations of fresh granite porphyry. The analytical results reveal (1) U-dominant ores significantly enriched in Cu, Sr, Mo, Cd, and Ba, while (2) Be-dominant ores significantly enriched in Cu, with weak enrichment of Sr, Cd, and U. These results indicate that U and Be mineralization are characterized by distinct enrichment assemblages of ore-forming elements.

3. Altered mineral assemblages associated with the uranium-beryllium mineralization

Uranium (U) and beryllium (Be) mineralization are associated with distinct alteration assemblages, and the corresponding alteration minerals exhibit overlap with the U and Be mineralization zones. The alteration of country rock associated with U mineralization includes silicification, hematitization, fluoritization (characterized by purple-black fluorite), illitization, and manganization. This alteration exhibits an obvious zonation pattern, with the number of hydrothermal alteration types progressively increasing towards the mineralized core center. The alteration sequence from unaltered granite porphyry to the mineralized center is as follows: Fresh granite porphyry→Granite porphyry with weak silicification and weak hematitizatio→Granite porphyry with silicification and hematitization →Granite porphyry with silicification, hematitization, fluoritization, and chloritization→Granite porphyry with silicification, hematitization, fluoritization, chloritization, and manganization. The alteration of country rock associated with Be mineralization includes albitization, fluoritization (tourmalinization), muscovitization (sericitization), chloritization, fluoritization, and carbonatization(Liu et al., 2020).

4. Characteristics of fluorite (host mineral) associated to uranium-beryllium mineralization

Fluorite is identified as the most significant gangue mineral in the Baiyanghe deposit, is closely associated with both beryllium (Be) and uranium (U) mineralization. Fluorite related to Be mineralization typically exhibits pale purple, purple, and bluish-purple color, whereas fluorite associated with U mineralization is characteristically purple-black. Cathodoluminescence (CL) characteristics and rare earth element (REE) signatures of fluorite from various occurrences were investigated using optical microscopy - cathodoluminescence (OM-CL) observations and Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) analysis.

The results reveal distinct signatures of fluorite in various occurrences, (1) Fluorite as the matrix minerals within the granite porphyry, which representing the magmatic stage crystallization, displays vivid blue CL feature. (2) Fluorite from the magmatic-hydrothermal transition stage, occurring in miarolitic cavities of the granite porphyry, dominantly exhibits vivid green CL feature, with minor show vivid blue CL feature at local areas. (3) Fluorite from the Be mineralization stage dominantly shows pale green CL feature. (4) Fluorite from the U mineralization stage dominantly exhibits deep blue CL feature.

Their REE patterns also various features, the magmatic-stage fluorite displays a near-flat REE distribution pattern. Be-mineralization stage fluorite shows a slightly left-leaning (LREE-enriched) REE distribution pattern. U-mineralization stage fluorite exhibits a strongly left-leaning (LREE-enriched) REE distribution pattern (Liu et al., 2022). These results demonstrate that fluorite associated with U and Be mineralization possesses distinctive CL characteristics and REE signatures.

5. Geochronology of U-Be mineralization and their contact relationships

Muscovite Ar-Ar geochronology associated with beryllium mineralization yields an ore-forming age of 303 Ma (Li et al., 2015), indicating that beryllium mineralization slightly later than the emplacement age of the granite porphyry (Zhang and Zhang, 2014). In contrast, U-Pb geochronology of uraninite constrains the uranium mineralization age at 240 Ma (Bonnetti et al., 2021), much later than the granite porphyry emplacement age. Scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS) analysis reveals that uraninite commonly cross-cuts bertrandite (Liu et al., 2020). In summary, based on the ore-forming chronology and contact relationships between ore minerals, the uranium mineralization later than beryllium mineralization.

This study was financially supported by China National Nuclear Corporation (Grant No. LTD1603).

1. Christophe, B., Liu X D, Julien M., et al. Genesis of the volcanic-related Be-U-Mo Baiyanghe deposit, West Junggar (NW China), constrained by mineralogical, trace element and U-Pb isotope signatures of the primary U mineralisation[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 128.
2. Li X F, Wang G, Mao W, et al. Fluid inclusions, muscovite Ar–Ar age, and fluorite trace elements at the Baiyanghe volcanic Be–U–Mo deposit, Xinjiang, northwest China: Implication for its genesis[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 387-399.

3. Liu C, Tian J J, Wang M, et al. Relationship between the Beryllium and Uranium Mineralization in Baiyanghe Be-U Deposit, Weatern Junggar: Evidence from Wall-Rock Alteration and Contact Ralation of Ores and Minerals[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(3): 465-477 (in Chinese with abstract).
4. Liu C, Tian J J, Xue Y H. Relationship between the Beryllium and Uranium Mineralization in Baiyanghe Be-U Deposit, Xinjiang: Constrain from Fluorite REE by LA-ICP-MS[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3): 399-408 (in Chinese with abstract).
5. Zhang X. and Zhang H. Geochronological, geochemical, and Sr–Nd–Hf isotopic studies of the Baiyanghe A-type granite porphyry in the Western Junggar: Implications for its petrogenesis and tectonic setting[J]. Gondwana Research, 2014, 25(4): 1554-1569.

***Характеристика и значение ураново-бериллиевой минерализации месторождения Байянхэ в вулканическом поясе Сюэмистан (Синьцзян)**

Тянь Цзяньцзи[1,2,3], Лю Чан[1,2,3], У Юй[2], Ян Вэньлун[4], И Луншэн[1,2,3]
[1]Государственная ключевая лаборатория поисков-добычи урановых ресурсов и ядерного дистанционного зондирования, Пекин, Китай; [2]Пекинский научно-исследовательский институт геологии урана, Пекин 100029, Китай; [3]Лаборатория КНР по технологии поисков и оценки урановых ресурсов, Пекин, Китай; [4]216-я геологоразведочная экспедиция CNNC, Урумчи, Синьцзян, Китай

Вулканогенное ураново-бериллиевое месторождение Байянхэ является одним из крупнейших объектов урано-редкометалльной минерализации в Синьцзян-Уйгурском автономном районе. Оно расположено в западной части металлогенного пояса Сюэмистан. На протяжении длительного времени геологоразведочные работы в пределах месторождения были сосредоточены исключительно на уране, и только в некоторых участках были обнаружены слабые признаки бериллиевой минерализации. С 2007 года, в ходе новой волны поисков урановых и полиметаллических месторождений, месторождение Байянхэ было охарактеризовано как крупнейшее в Азии по запасам бериллиевой минерализации при средних запасах урана. Ранее минералогенез урана и бериллия исследовался изолированно или рассматривался как результат единого рудообразующего события, что оставляло неясным их генетическое соотношение. В настоящем исследовании на основе анализа пространственного распределения урано-бериллиевых рудных тел, ассоциаций рудообразующих элементов, зон изменения вмещающих пород, характеристик флюорита, хронологии рудогенеза и контактов между рудами установлено, что урановая и бериллиевая минерализация формировались в результате различных рудообразующих процессов.

1. Пространственное распределение ураново-бериллиевых рудных тел

В пределах месторождения Байянхэ урановые и бериллиевые рудные тела как пересекаются, так и изолированы, при этом рудные тела бериллия занимают гораздо большую площадь. Урановая минерализация в плане проявляется в двух направлениях: (1) по северной контактовой зоне гранитоидного массива Янчжуан с простиранием северо-запад – запад (NWW) и северо-восток (NE); (2) в центрально-западной части массива Янчжуан с простиранием северо-запад (NW) и падением на юго-восток. Рудные тела в основном приурочены к зонам развития интрузивных даек основной и средней составов. В разрезе урановая минерализация приурочена к нижним частям гранитного порфира — как к эндо-, так и экзоконтактным зонам. Рудные тела бериллия имеют пластообразную форму и равномерное распределение, охватывая более 50% площади массива Янчжуан, включая рудную и субрудную минерализацию. В разрезе тела бериллия также приурочены к нижнему контакту гранитного порфира, а также встречаются в его центральной части. Различия в пространственном распределении урана и бериллия обусловлены различиями в рудоконтролирующих факторах.

2. Обогащённость рудообразующими элементами

Анализ обогащения рудообразующими элементами в урановых и бериллиевых рудах позволил выделить различия в их элементных ассоциациях. Руды, обогащённые ураном, содержат высокие концентрации Cu, Sr, Mo, Cd и Ba, в то время как бериллиевые руды обогащены в основном Cu, при слабом обогащении Sr, Cd и U. Это указывает на различный состав минерализующих растворов и независимость процессов урано- и бериллиеобразования.

3. Ассоциации изменений пород при урано-бериллиевой минерализации

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Урановая и бериллиевая минерализация сопровождаются разными ассоциациями гидротермального изменения. Урановая зона характеризуется силикфикацией, гематитизацией, флюоритизацией (фиолетово-чёрный флюорит), иллитизацией и манганитизацией, причём наблюдается чёткая зональность — чем ближе к рудному ядру, тем больше типов изменения. Последовательность изменений: свежий гранитный порфир → слабая силикфикация и гематитизация → усиленная силикфикация и гематитизация → добавление флюоритизации и хлоритизации → добавление манганитизации. Бериллиевая минерализация сопровождается альбитизацией, флюоритизацией (турмалинизацией), мусковитизацией (серицитизацией), хлоритизацией и карбонатизацией (Liu et al., 2020).

4. Характеристика флюорита как главного жильного минерала

Флюорит — главный жильный минерал месторождения Байянхэ, тесно связанный как с урановой, так и с бериллиевой минерализацией. Флюорит в бериллиевой минерализации имеет бледно-фиолетовую, фиолетовую или синевато-фиолетовую окраску, а в урановой зоне — тёмно-фиолетовую. Методами катодолюминесценции (OM-CL) и LA-ICP-MS

Изучены следующие типы флюорита: (1) магматический — с ярко-синей CL, (2) переходный магмато-гидротермальный — с ярко-зелёной CL, (3) флюорит бериллиевой стадии — с бледно-зелёной CL, (4) флюорит урановой стадии — с насыщенно-синей CL.

Паттерны распределения редкоземельных элементов также различаются: – магматический флюорит — плоское распределение REE; – флюорит бериллиевой стадии — слабое обогащение лёгкими REE (LREE); – флюорит урановой стадии — выраженное обогащение LREE (Liu et al., 2022).

5. Геохронология и отношения между урано- и бериллиевой минерализацией

Аргон-аргоновый возраст мусковита, связанного с бериллиевой минерализацией, составляет 303 млн лет (Li et al., 2015), что немного позже внедрения гранитного порфира (Zhang and Zhang, 2014). В то время как возраст урановой минерализации, определённый по уранониту методом U–Pb, составляет 240 млн лет (Bonnetti et al., 2021), что существенно позже внедрения интрузива. SEM-EDS анализ показывает, что уранинит перекрывает бертрандит (Liu et al., 2020). Таким образом, урановая минерализация моложе бериллиевой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Китайской национальной ядерной корпорации (Grant No. LTD1603).

1. Christophe, B., Liu X. D., Julien M., et al. Genesis of the volcanic-related Be-U-Mo Baiyanghe deposit, West Junggar (NW China), constrained by mineralogical, trace element and U-Pb isotope signatures of the primary U mineralisation. Ore Geology Reviews, 2021, 128.
2. Li X. F., Wang G., Mao W., et al. Fluid inclusions, muscovite Ar–Ar age, and fluorite trace elements at the Baiyanghe volcanic Be–U–Mo deposit, Xinjiang, northwest China: Implication for its genesis. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 387–399.
3. Liu C., Tian J. J., Wang M., et al. Relationship between the Beryllium and Uranium Mineralization in Baiyanghe Be-U Deposit, Western Junggar: Evidence from Wall-Rock Alteration and Contact Relation of Ores and Minerals. Geology and Exploration, 2020, 56(3): 465–477 (на китайском с аннотацией на английском).
4. Liu C., Tian J. J., Xue Y. H. Relationship between the Beryllium and Uranium Mineralization in Baiyanghe Be-U Deposit, Xinjiang: Constrain from Fluorite REE by LA-ICP-MS. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3): 399–408 (на китайском с аннотацией на английском).
5. Zhang X., Zhang H. Geochronological, geochemical, and Sr–Nd–Hf isotopic studies of the Baiyanghe A-type granite porphyry in the Western Junggar: Implications for its petrogenesis and tectonic setting. Gondwana Research, 2014, 25(4): 1554–1569.

Genesis of the Haidewula volcanic rock-hosted uranium deposit in the East Kunlun Orogen, northwestern China

Kai-Xing Wang[1,2]; Xiao-Dong, Liu[1,2]; Fei Xia[1,2]
[1]State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China, xy2gmo02@ecit.edu.cn; [2]School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China, fxia@ecut.edu.cn

The Haidewula deposit is a recently discovered volcanic-related uranium deposit in east Kunlun Orogen of Northwest China (Fig.1). To determine the origin of this deposit, of the pitchblende were obtained, and microthermometric analyses of the fluid inclusions were performed. The Haidewula deposit is located within the Phanerozoic volcanic basin and contains Silurian trachyte, rhyolite, rhyolitic tuff, and Triassic basalt. These Silurian volcanic rocks are characterized by high-K calc-alkaline properties and were intruded by Triassic dolerite, which served as a source for mineralization.

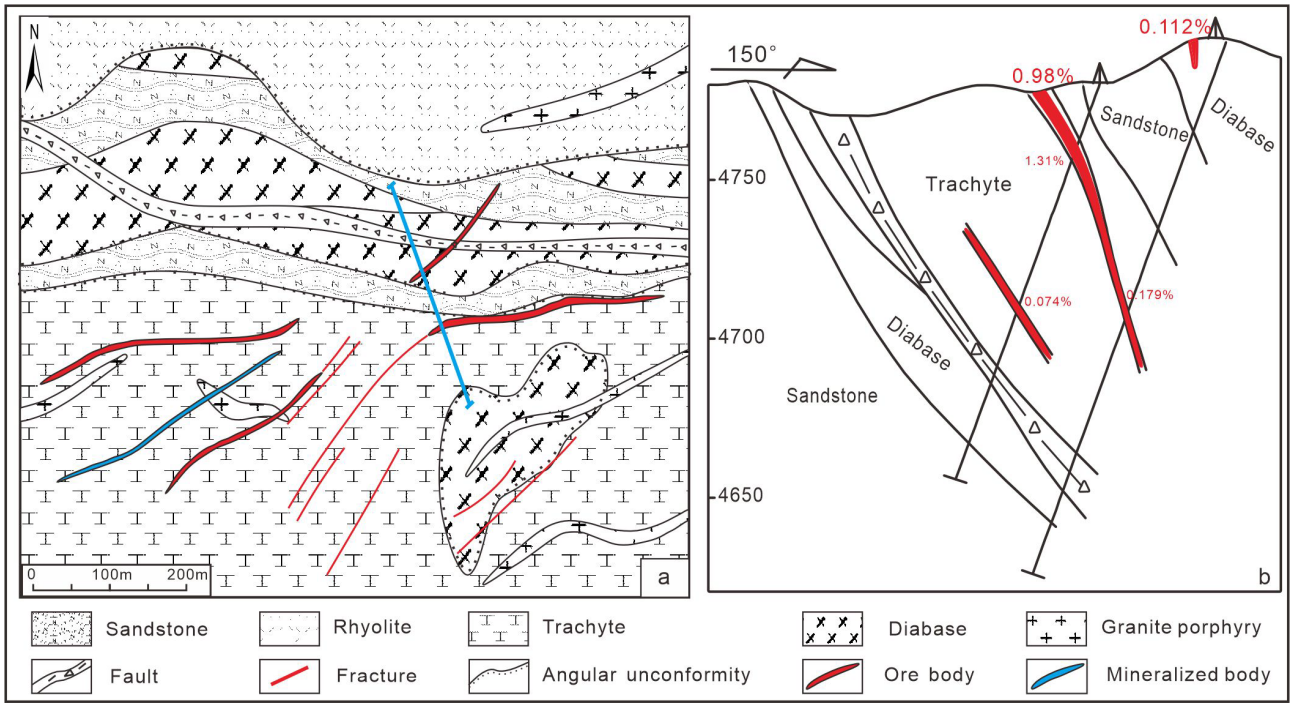


Fig.1 (a) Geological map of the Haidewula deposit, (b) Exploration profile of the deposit

The whole-rock geochemical, stable isotope, U–Pb isotope and trace element compositions mineralized zones were primarily influenced by NE-NNE-trending and SE-dipping faults. Vein-like pitchblende is commonly associated with calcite, illite, quartz, pyrite, and fluorite. Geochronology indicated that uranium mineralization occurred during 235-230 Ma (Fig.2). The ore-forming fluids contained meteoric water with limited magmatic water and exhibited moderate to low temperatures (246 to 133 °C), moderate to low salinities (17.3 to 1.06 wt.% NaCleqv) and Cl-bearing rocks. U precipitation was attributed to changes in physicochemical conditions resulting from fluid–rock interactions and fluid boiling. The uranium mineralization at Haidewula coincided with the evolution of the Tethys Ocean. During late Wenlock, an extensional environment, triggered by the closure of the Proto-Tethys Ocean, led to the extrusion of Haidewula rhyolite and trachyte. During the crustal extensional environment resulting from the subduction of the A'nyemaqen Ocean in the Middle Triassic, ore-forming fluids circulated and remobilized uranium from the Haidewula volcanic rocks. As a result of fluid–rock interactions and fluid boiling within brittle structures, the U-complexes destabilized and formed pitchblende at Haidewula.

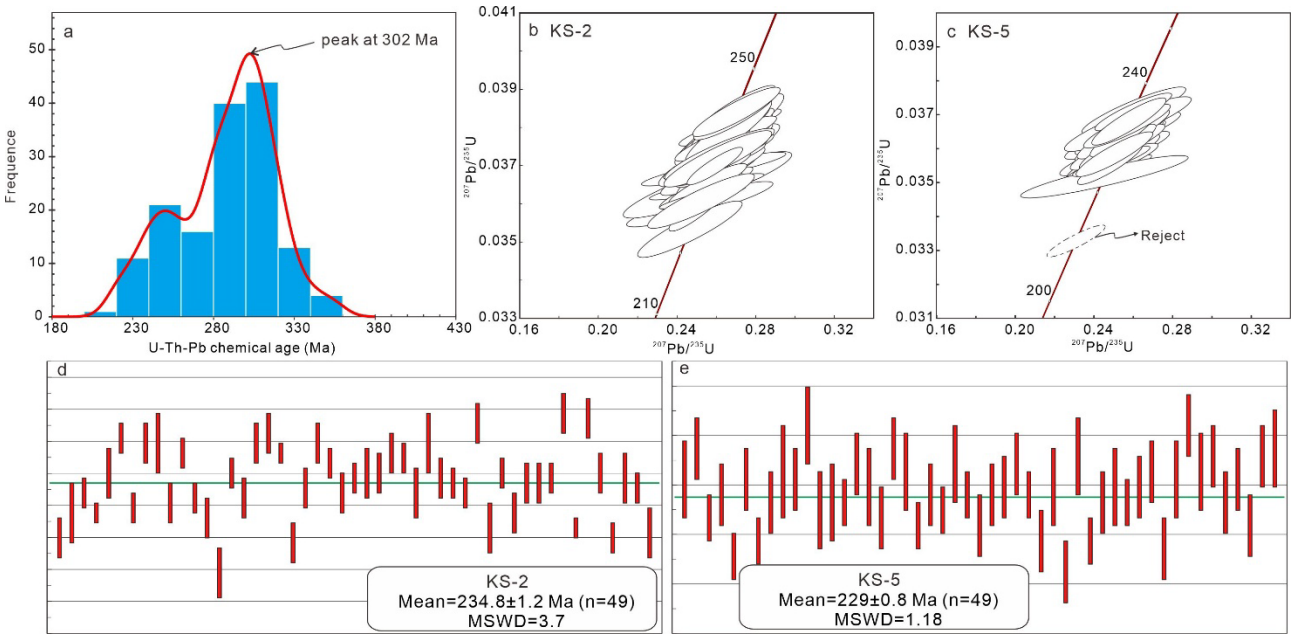


Fig.2 The frequency histogram of U-Th-Pb chemical ages (a), the 207Pb/235U versus 206Pb/238U (b and c), and weight mean average ages (d and e) of pitchblende from the Haidewula deposit.

This work was supported by research grants from the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42072095), the Science and Technology Planning Project of Jiangxi (20212BDH81006), the Key R&D and Transformation Plan of Qinghai Science and Technology Department (No. 2021-SF-157), and the Uranium Exploration Project of the Bureau of Geology of the Chinese National Nuclear Corporation (No. 201619).

***Генезис ураносодержащего месторождения Хайдевула, приуроченного к вулканическим породам, в Восточном Куньлуньском орогене, северо-западный Китай**

Ван Кайсин[1,2], Лю Сяодун[1,2], Сяо Фэй[1,2]
[1]Государственная ключевая лаборатория ядерных ресурсов и окружающей среды, Восточно-Китайский технологический университет, Наньчан 330013, Китай, xy2gmo02@ecit.edu.cn
[2]Школа наук о Земле, Восточно-Китайский технологический университет, Наньчан 330013, Китай, fxia@ecut.edu.cn

Месторождение Хайдевула — это недавно обнаруженное месторождение урана вулканогенного типа, расположенное в пределах Восточного Куньлуньского орогена на северо-западе Китая (рис. 1). С целью выяснения его генезиса были получены данные по уранониту, а также проведены микротермометрические исследования флюидных включений. Месторождение приурочено к фанерозойскому вулканическому бассейну, в составе которого выделяются силурийские трахиты, риолиты, риолитовые туфы и триасовые базальты. Указанные вулканиты характеризуются высококалиевыми кальк-щелочными свойствами и прорваны триасовыми долеритами, которые, предположительно, послужили источником рудного вещества.

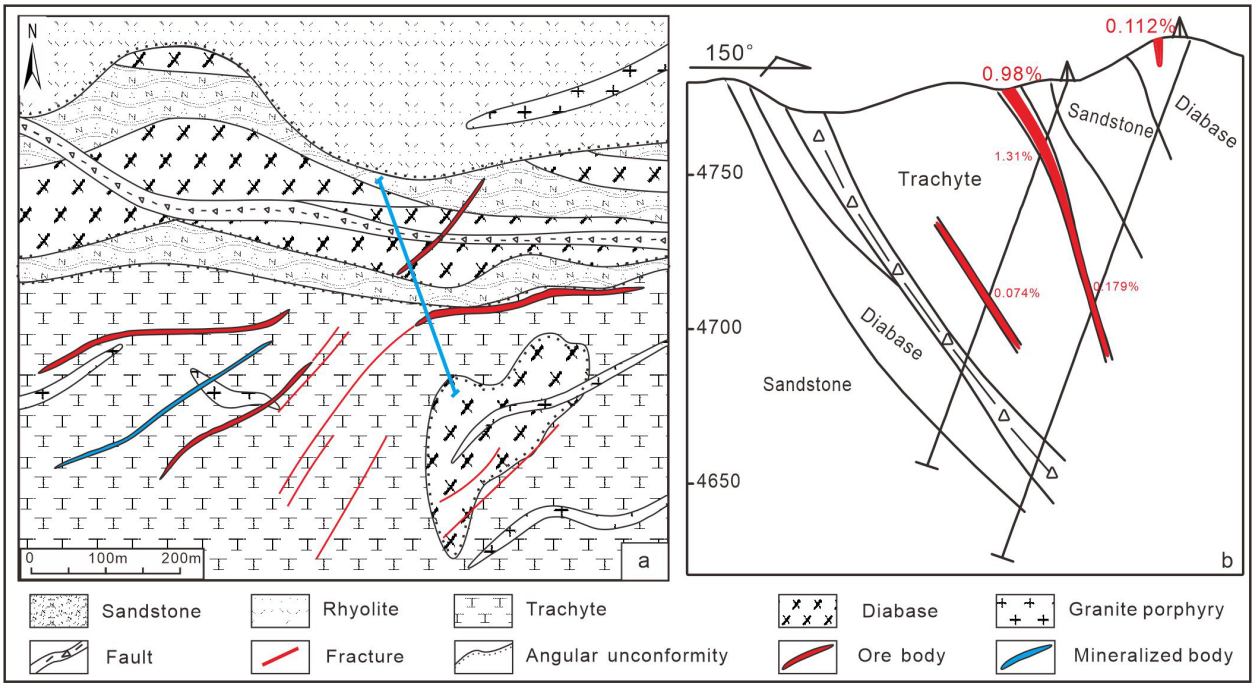


Рис. 1. (a) Геологическая схема района месторождения Хайдевула, (b) Поисковый геологический разрез по месторождению

По данным литогеохимии, стабильных изотопов, изотопов U–Pb и элементного состава рудных участков, минерализация контролируется разломами субширотного и северо-северо-восточного простирания с падением на юго-восток. Уранинит встречается в жилах совместно с кальцитом, иллитом, кварцем, пиритом и флюоритом. Геохронологические данные указывают на время уранообразования 235–230 млн лет (рис. 2). Рудоносные флюиды содержали преимущественно инфильтрационные (метеогенные) воды с незначительной примесью магматических, имели умеренно-низкие температуры (от 246 до 133 °C), умеренно-низкую солёность (17,3–1,06% по эквиваленту NaCl) и взаимодействовали с

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

хлорсодержащими породами. Осаждение урана связано с изменениями физико-химических условий в результате взаимодействия флюидов с породами и кипения растворов. Урановая минерализация в Хайдевула приурочена к тектономагматическим процессам, связанным с эволюцией океана Тетис. В позднем венлоке (силур), в условиях растяжения коры, вызванного закрытием палео-Тетиса, произошёл излив риолитов и трахитов. В условиях дальнейшего растяжения, обусловленного субдукцией океана Аньемацин в среднем триасе, циркуляция рудоносных флюидов привела к ремобилизации урана из вулканических пород комплекса Хайдевула. В результате взаимодействия флюидов с породами и кипения в условиях хрупких структур урановые комплексы дестабилизировались и произошло формирование уранинита.

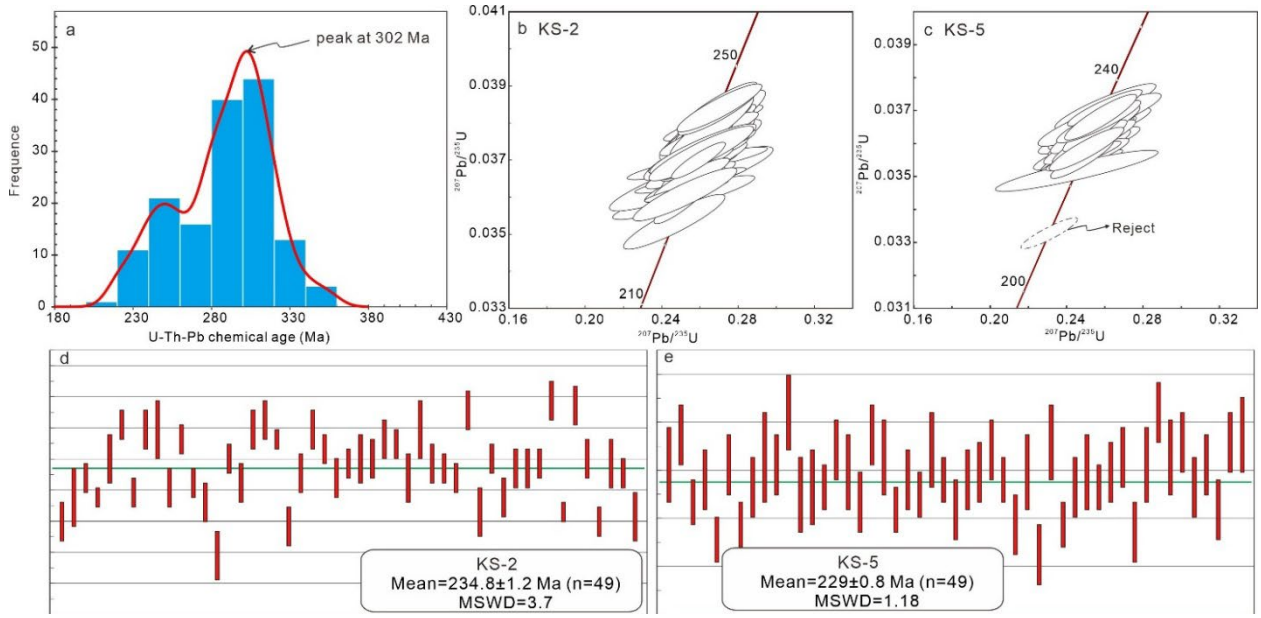


Рис. 2. (a) Гистограмма распределения химических возрастов по U–Th–Pb, (b и c) диаграммы $^{207}Pb/^{235}U$ против $^{206}Pb/^{238}U$, (d и e) средневзвешенные возрастные оценки уранинита из месторождения Хайдевула.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 42072095), проекта научно-технического планирования провинции Цзянси (20212BDH81006), ключевого плана НИОКР и трансформации провинции Цинхай (№ 2021-SF-157), а также проекта по разведке урана, осуществляемого Бюро геологии Китайской национальной ядерной корпорации (№ 201619).

Uranium Isotope Study of Sandstone-type Uranium Deposits in the Junggar Basin

Wang Shaoyi[1,2], Teng Xueming[1,2], Ao Cong[1,2], Cheng Yinhang[1,2], Jin Ruoshi[1,2]
[1]Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China, e-mail: wangshaoyiligong@126.com; [2]Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

To preliminarily investigate the vertical distribution characteristics of uranium (U) isotopes in sandstone-type uranium deposits, a systematic U isotopic analysis was conducted on the Jiangjunmiao uranium deposit in the Junggar Basin. The main findings are as follows:(1) Significant U isotope fractionation: Samples exhibit significant $\delta^{238}U$ fractionation ($\delta^{238}U$ = -1.47‰ to -0.03‰). The $\delta^{238}U$ values show strong correlations with Fe^{2+}, V, and U contents, indicating that changes in redox conditions are the dominant process controlling isotope fractionation. (2) Pronounced ^{234}U disequilibrium: Ore samples commonly display significant $\delta^{234}U$ disequilibrium ($\delta^{234}U$ = -63.06‰ to +208.30‰), whereas wall rock samples approach radioactive equilibrium ($\delta^{234}U \approx 0$‰). This feature indicates recent modification of the mineralization system by modern fluids, suggesting that the mineralization process has continued to the present. (3) Vertical "crescent-shaped" distribution and mineralization mechanism: $\delta^{238}U$ values display a distinct vertical "crescent-shaped" distribution pattern: relatively heavier in the central zone (-0.22‰ to -0.03‰) and gradually lighter towards both sides (-1.47‰ to -1.43‰). This pattern exhibits significant linear relationships with both U and Fe^{2+} contents, indicating the continuous alteration of sandstone by oxidizing fluids driven by laminar flow. Sustained water-rock interactions release reducing agents (Fe^{2+}), driving U precipitation and enrichment. Consequently, laminar flow serves as the key mechanism driving mineralization, promoting the uniform diffusion of early-stage mineralization towards greater depths and leading to the sustained growth of the orebody. Tectonic events since the Oligocene reshaped the early dispersed and enriched orebody, ultimately facilitating further U accumulation, precipitation, and final localization.

*Изотопное исследование урана в песчаниковых месторождениях урана бассейна Джунгар

Ван Шаои[1,2], Тэн Сюэмин[1,2], Ао Цун[1,2], Чэн Иньхан[1,2], Цзинь Жоуши[1,2]
[1]Тяньцзиньский центр Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай, e-mail: wangshaoyiligong@126.com [2]Ключевая лаборатория урановой геологии Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай

Для предварительного изучения вертикального распределения изотопов урана (U) в песчаниковых месторождениях урана был проведён систематический изотопный анализ на месторождении Цзянцзюньмяо, расположенном в бассейне Джунгар. Основные результаты следующие: (1) Существенное фракционирование изотопов урана: образцы демонстрируют значительное фракционирование $\delta^{238}U$ ($\delta^{238}U$ = от –1,47‰ до –0,03‰). Значения $\delta^{238}U$ хорошо коррелируют с содержанием Fe^{2+}, V и U, что свидетельствует о доминирующей роли изменений окислительно-восстановительных условий в контроле изотопного состава. (2) Выраженное нарушение равновесия по ^{234}U: в рудных образцах часто наблюдается значительное изотопное смещение $\delta^{234}U$ (от –63,06‰ до +208,30‰), тогда как вмещающие породы близки к радиоактивному равновесию ($\delta^{234}U \approx 0$‰). Это указывает на недавнюю переработку рудной системы современными флюидами и на продолжающийся до настоящего времени процесс минерализации. (3) Вертикальное «полулунное» распределение и механизм минерализации: значения $\delta^{238}U$ по вертикали формируют отчётливую «серповидную» закономерность: относительно более тяжёлые значения в центральной зоне (от –0,22‰ до –0,03‰) и более лёгкие к флангам (от –1,47‰ до –1,43‰). Эта картина линейно коррелирует с содержанием U и Fe^{2+}, что свидетельствует о длительном воздействии окисляющих флюидов, циркулирующих в ламинарном режиме, на песчаник. Постоянное взаимодействие флюидов с породой приводит к высвобождению восстановителей (Fe^{2+}), способствующих осаждению и накоплению урана. Таким образом, ламинарный поток рассматривается как ключевой механизм, способствующий минерализации, равномерному распространению ранней минерализации в глубину и длительному росту рудного тела. Тектонические события, происходившие со времени олигоцена, способствовали перераспределению ранее рассеянных и обогащённых рудных тел, усиливая накопление, осаждение и локализацию урана.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Investigation of Uranium Mineralogy and Enrichment Mechanisms in Sandstone-Type Uranium Deposits

Xia Fei[1], Zhang Chengyong[1], Nie Fengjun[1], Li Ziying[2], Liu Xiaodong[1], Wang Kaixing[1], Yan Zhaobin[1], Guo Jiang[2], Zhang Hujun[3], Zhang Haohao[3], Zhang Xin[1], Deng Wei[1], Zhang Qunxi[1], Liu Xu[1]

[1] National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote sensing, Nanchang, 330013, e-mail: fxia@ecut.edu.cn; [2] National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote sensing, Beijing, 100029, e-mail: guojian9818@163.com; [3] Geologic Party No. 216, CNNC, Urumqi, 830011, e-mail: 513022006@qq.com

Sandstone-type uranium deposits have become the primary source of uranium resource growth and the dominant exploration target in China. The interlayer oxidation zone sandstone uranium exploration model, established under the guidance of the hydrogenic uranium theory, has served as the foremost guiding framework for exploration efforts both historically and currently (Rackley et al., 1971).

In recent years, China has discovered multiple uranium deposits hosted in red multicolor strata, which exhibit characteristics distinct from typical interlayer oxidation zone uranium deposits. The mineralization mechanisms and processes remain controversial, necessitating urgent refinement of uranium metallogenic theories. Uranium minerals, as the core products of mineralization, serve as direct witnesses and records of the ore-forming processes. They hold significant importance for studying mineralizing fluids and unraveling the genesis of deposits (Li et al., 2022).

This study adopts a uranium mineral perspective to investigate the characteristics of deep-seated fluids involved in uranium mineralization and their precipitation environments through research on alteration mineral assemblages and precipitation conditions. It explores the influence of diverse fluid sources on the mineralization process of sandstone-type uranium deposits, thereby diversifying our understanding of sandstone uranium mineralization mechanisms (Nie et al., 2021).

This approach provides microscopic evidence to advance knowledge in uranium deposit exploration. Sandstone-type uranium deposits in Meso-Cenozoic basins of northern China typically contain finely dispersed uranium minerals, primarily including pitchblende, brannerite, coffinite, and secondary uranium minerals such as tyuyamunite and carnotite (Zhang et al., 2022), Fig.1 provides types of discrete uranium minerals.

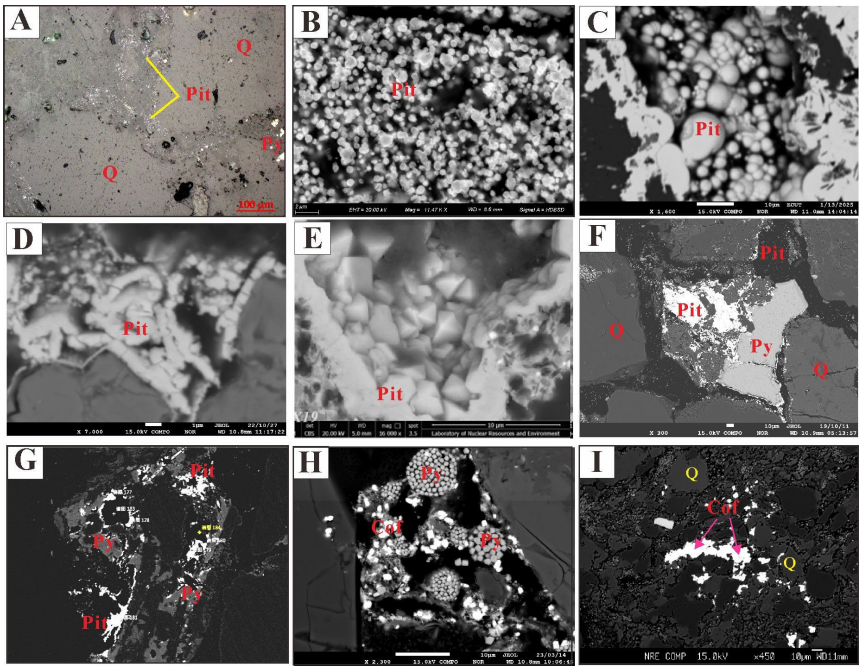


Fig. 1. Types of discrete uranium minerals

Uranium minerals commonly coat the surfaces of reducing materials (e.g., pyrite and carbonaceous debris), dissolved pore spaces in detrital grains, and clay minerals. Associated minerals consist mainly of clay minerals, carbonates, metallic sulfides, and sulfates. During supergene oxidizing fluid processes, the most frequent uranium-associated minerals are fine-grained euhedral pyrite and sparry calcite. In contrast, under the influence of deep-seated fluids, uranium may be associated with fluorapatite, quartz, and other minerals. The mechanisms of uranium precipitation and enrichment include reduction, adsorption, microbial activity, and exudation fluid processes. Fig.2 provides Associated/gangue minerals in sandstone-type deposits.

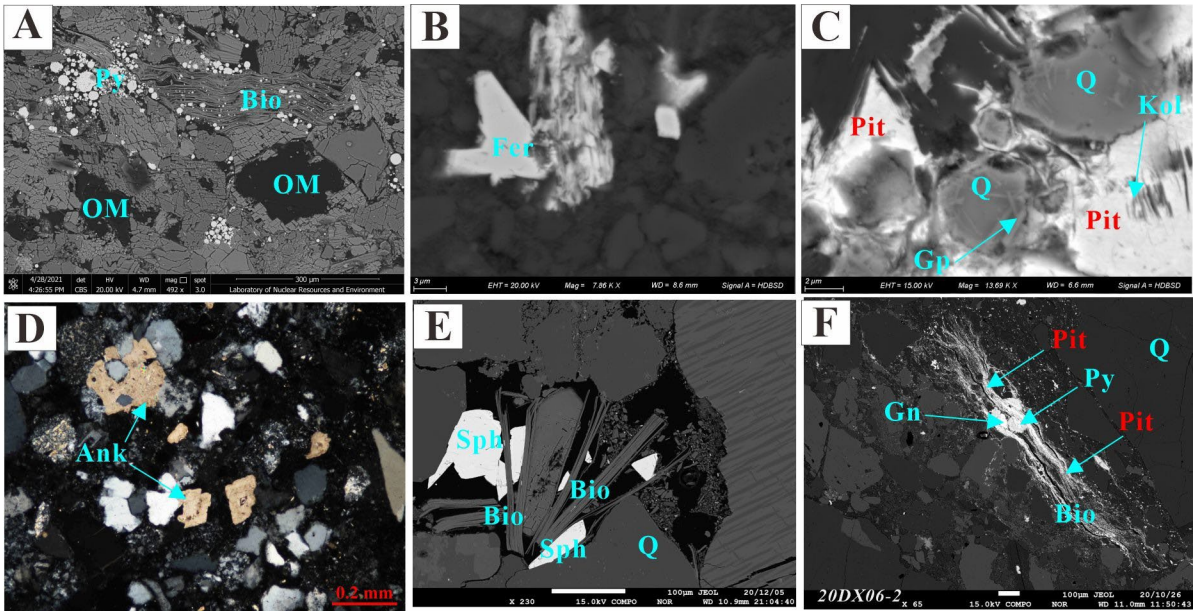


Fig. 2. Associated/gangue minerals in sandstone-type deposits

Under supergene oxidizing fluids, redox reactions represent the primary mechanism for large-scale uranium enrichment in sandstone-type deposits. Common reductants include pyrite, carbonaceous debris, and biotite, with reduction occurring through both solid-phase materials (e.g., pyrite, carbon debris) and gaseous agents. Deep-seated exudation fluids also play a crucial role in uranium mineralization within red multicolor strata. The resulting uranium-enriched organic fluids can supply deep-sourced uranium to shallow sandstone-type deposits while providing external reductants to facilitate mineralization. During supergene oxidation, uranium primarily undergoes multi-stage roll-front migration and enrichment, progressively expanding mineralization scales. The involvement of deep-seated fluids introduces reductants, metallogenic materials, and alters mineralization temperature, pressure, pH, and Eh (redox potential) conditions, thereby directly or indirectly influencing the sandstone-type uranium mineralization process. Fig.4 provides Associated/gangue minerals in sandstone-type deposits.

We summarized with the increasing depth of exploration for sandstone-type uranium deposits and breakthroughs in discovering new stratigraphic horizons, research on micro-scale uranium occurrence states and precipitation mechanisms, uranium migration pathways and processes under organic fluid interactions, and nanoscale uranium mineralogy requires strengthening. By evaluating the roles and contributions of different fluid types in uranium mineralization, these investigations will thus provide critical support for strategic decision-making in uranium exploration targeting.

The study was financed by the Open Fund Project of the National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing (No. NKLUR-2024-YB-004).

1. Rackley R I, Johnson R L. The geochemistry of uranium roll-front deposits with a case history from the Powder River Basin. Economic Geology. 1971. 66(11): 202-203.

2. Li Ziying, Liu Wusheng, Li Weitao, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia. Geology in China. 2022. 49(04):1009-1047.
3. Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, et al. Two-stage and Two-mode Uranium Mineralization for Sandstone-type Uranium Deposits. Acta Geoscientica Sinica. 2021. 42(06):823-848.
4. Zhang Zilong, He Feng, Yu Apeng, et al. Microanalysis of the occurrence spaces of uranium minerals in sandstone-type uranium deposits in the Ordos Basin. Acta Mineralogia Sinica. 2022. 42(06):815-824.

*Исследование минералогии урана и механизмов его обогащения в песчаниковых урановых месторождениях

Ся Фэй[1], Чжан Чэнюн[1], Не Фэнцзюнь[1], Ли Цзыин[2], Лю Сяодун[1], Ван Кайсин[1], Янь Чжаобин[1], Го Цзян[2], Чжан Хуцзюнь[3], Чжан Хаохао[3], Чжан Синь[1], Дэн Вэй[1], Чжан Цюньси[1], Лю Сюй[1]
[1]Государственная лаборатория по изучению урановых ресурсов, их разведке и дистанционному ядерному зондированию, Наньчан, 330013, e-mail: fxia@ecut.edu.cn;
[2]Государственная лаборатория по изучению урановых ресурсов, их разведке и дистанционному ядерному зондированию, Пекин, 100029, e-mail: guojian9818@163.com;
[3]Геологическая партия № 216, CNNC, Урумчи, 830011, e-mail: 513022006@qq.com

Песчаниковые урановые месторождения стали основным источником прироста урановых ресурсов и доминирующим объектом поисков в Китае. Модель поисков урана в зоне межпластового окисления, разработанная на основе теории водородного урана, долгое время являлась и продолжает быть основой для поисковых работ (Rackley et al., 1971).

В последние годы в Китае были открыты многочисленные урановые месторождения, локализованные в красноцветных толщах, обладающие отличительными признаками по сравнению с типичными месторождениями зоны межпластового окисления. Механизмы и процессы рудообразования в таких объектах остаются предметом дискуссий, что требует срочного уточнения урановых металлогенических концепций. Урановые минералы, как непосредственный продукт минерализации, являются прямыми свидетелями рудообразующих процессов и играют ключевую роль в изучении рудных флюидов и реконструкции генезиса месторождений (Li et al., 2022).

В данной работе анализируется минералогия урана с целью выяснения характера глубинных флюидов, участвовавших в минерализации, а также условий их осаждения на основе изучения ассоциаций вторичных минералов и параметров осаждения. Рассматривается влияние различных источников флюидов на процессы уранообразования в песчаниковых месторождениях, что позволяет расширить представления о механизмах образования урановых руд (Nie et al., 2021).

Такой подход обеспечивает микроскопическое подтверждение рудообразования и способствует уточнению направлений ураноразведки. Песчаниковые урановые месторождения мезо-кайнозойских бассейнов северного Китая, как правило, характеризуются тонкодисперсными урановыми минералами — пичблендом, браннеритом, кофинитом и вторичными урановыми минералами, такими как тюямунит и карнотит (Zhang et al., 2022). См. рис. 1.

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

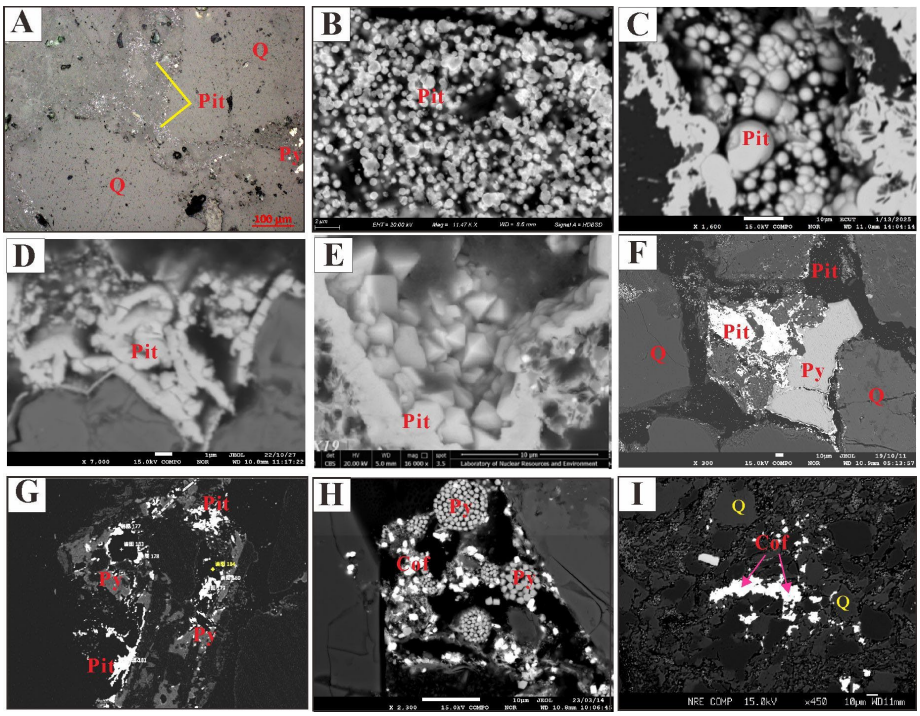


Рис. 1. Типы урановых минералов в дисперсной форме

Урановые минералы обычно формируются на поверхности редуцированных компонентов (например, пирита и углистых остатков), внутри поровых пространств между обломками, а также на поверхности глинистых минералов. Сопутствующие минералы включают глины, карбонаты, сульфиды и сульфаты металлов. При воздействии гипергенных окислительных флюидов наиболее типичными сопутствующими минералами являются мелкозернистый эуэдральный пирит и крупнокристаллический кальцит. В условиях влияния глубинных флюидов уран ассоциирует с фторапатитом, кварцем и другими минералами.

Механизмы осаждения и обогащения урана включают восстановление, адсорбцию, микробиологическую активность и экссудационные процессы. См. рис. 2.

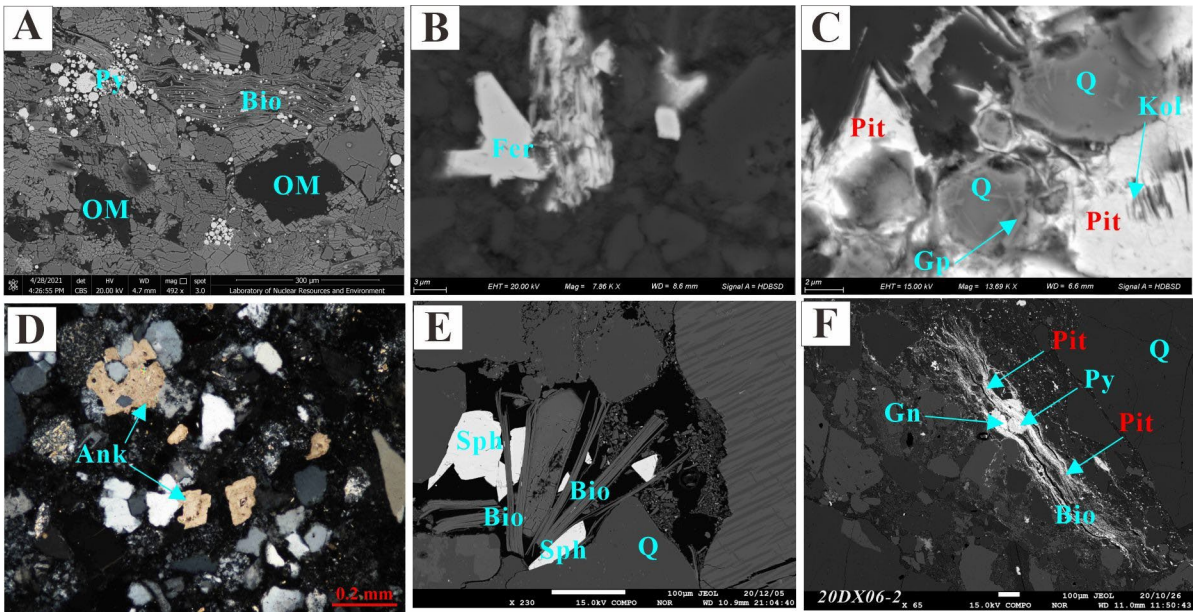


Рис. 2. Ассоциированные / породообразующие минералы песчаниковых урановых месторождений

В условиях гипергенных окислительных флюидов основным механизмом крупномасштабного обогащения ураном служат окислительно-восстановительные реакции. Типичными восстановителями являются пирит, углистые включения и биотит; восстановление происходит как за счёт твёрдых фаз, так и газовых компонентов. Глубинные экссудационные флюиды также играют важную роль в уранообразовании в красноцветных отложениях. Органические флюиды, обогащённые ураном, могут поставлять уран из глубин в поверхностные песчаники, а также обеспечивать внешние восстановители.

В ходе гипергенного окисления уран подвергается многостадийной миграции и обогащению по типу фронтов перекатывания, приводя к расширению зон минерализации. Глубинные флюиды вносят восстановители, рудообразующие компоненты и изменяют термодинамические параметры (температуру, давление, pH, окислительно-восстановительный потенциал), оказывая прямое или косвенное влияние на процесс образования урановых руд в песчаниках.

Подводя итог, с увеличением глубины поисков песчаниковых урановых месторождений и открытием новых стратиграфических горизонтов требуется активизация исследований в следующих направлениях: – микроформы нахождения урана и механизмы его осаждения, – пути и процессы миграции урана при участии органических флюидов, – наноминералогия урана.

Оценка роли различных типов флюидов в рудообразовании обеспечит теоретическую и методическую базу для принятия стратегических решений при прогнозировании и поисках урановых месторождений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Открытого проекта Государственной ключевой лаборатории по изучению урановых ресурсов, их разведке и дистанционному ядерному зондированию (№ NKLUR-2024-YB-004).

1. Rackley R I, Johnson R L. The geochemistry of uranium roll-front deposits with a case history from the Powder River Basin. Economic Geology. 1971. 66(11): 202-203.
2. Li Ziying, Liu Wusheng, Li Weitao, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia. Geology in China. 2022. 49(04):1009-1047.
3. Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, et al. Two-stage and Two-mode Uranium Mineralization for Sandstone-type Uranium Deposits. Acta Geoscientica Sinica. 2021. 42(06):823-848.
4. Zhang Zilong, He Feng, Yu Apeng, et al. Microanalysis of the occurrence spaces of uranium minerals in sandstone-type uranium deposits in the Ordos Basin. Acta Mineralogia Sinica. 2022. 42(06):815-824.

Geochemistry and Uranium Mineralization in Cretaceous Eolian Red Sandstone in the Southwestern Ordos Basin, China

Yi Longsheng[1], Lin Jinrong[1], Li Ziying[1], He Feng[2], Wu Zhengqian[2], Liu Kunpeng[2], Qiu Linfei[1], Wang Junxian[1], Li Xide[1]
[1] Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, China; [2] No. 203 Research Institute of CNNC, Xianyang, Shaanxi, China

This paper studied on geochemical characteristics of sandstone hosted uranium deposits in the lower Cretaceous in southwest of the Ordos Basin, Northern China. Vertically, uranium mineralization can be divided into 5 zones, which are, from lower to upper, gray sandstone mineralization zone, yellow sandstone mineralization zone, red sandstone mineralization zone, zone of dark gray sandstone with organic dissemination, and zone of dark gray sandstone with organic veins. Alteration mineral combination, uranium mineral assemblages, and geochemical composition have been studied for different mineralization zones. It is concluded that from deep to surface, reductive activity decreases, and uranium is mainly concentrated in the gray zone in deep, while organic matters are mainly concentrated in the upper dark gray zone as dissemination or veins. It is thought that in southwestern Ordos Basin, different types of uranium ores in Cretaceous strata have similar uranium mineralization features, and all were the results of deep organic-bearing fluids exudating, reducing and enriching uranium, therefore, all types of uranium mineralization are likely generated from exudative metallogenesis.

Vertical Zonation of Uranium Mineralization

Vertical zonation is discovered in the Cretaceous sandstone uranium deposits in the southwestern Ordos Basin, which is divided into five uranium mineralization zones from bottom to top: gray sandstone uranium mineralization zone, yellow sandstone uranium mineralization zone, red sandstone uranium mineralization zone, gray-black organic matter spot and mass uranium mineralization zone, and gray-black organic matter vein uranium mineralization zone. The alteration mineral assemblages, uranium mineral assemblages, and related element content characteristics of different uranium mineralization zones indicate that uranium mineralization is the product of deep organic ore-forming fluid exudation, reduction, and enrichment. Gray-black organic matter spots and masses, as well as veins, are important identification markers for the exudation genesis of Cretaceous sandstone uranium deposits in the southwestern Ordos Basin.

Mineralization Stages

Guided by the theoretical framework of exudation mineralization, a model of Cretaceous exudative sandstone-type uranium mineralization in the southwestern Ordos Basin is constructed. It is believed that the uranium mineralization of Cretaceous sandstone in southwestern Ordos can be divided into three stages: sedimentary diagenesis stage (Early Cretaceous Luohe Formation-Jingchuan Formation, 139.8~113.1Ma), exudation-infiltration mineralization stage (late Early Cretaceous-Oligocene, 113.1~23.0Ma), and exudation mineralization superimposition stage (Miocene-Pleistocene, 23.0~0.01Ma). The early uranium mineralization ages measured are 68.8Ma, 73Ma, 86.7Ma, and 104Ma, while the late uranium mineralization ages are generally less than 8Ma, specifically 5.1Ma, 3.2Ma, 1.32Ma, and 0.49Ma.

Geochemical Characteristics of Mineralization Zones

The geochemical study of relevant elements shows that the contents of relevant elements in the altered sandstones related to uranium mineralization, such as the grey sandstone uranium mineralization zone, the yellow sandstone uranium mineralization zone, the red sandstone uranium mineralization zone, the gray-black organic matter spot and mass uranium mineralization zone, and the gray-black organic matter vein uranium mineralization zone, follow certain variation patterns (Table 1, Table 2).

Table 1. Average Content of Elements in Uranium Mineralization Zones

Zonation types	U	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ba	Nd	Pb	Nb	Zr	Cr
Grey - black organic matter vein - type uranium mineralization zone	1.34	11.46	12.86	10.65	19.65	4.87	680.0	12.18	45.35	3.73	32.10	12.62
Grey - black organic matter mass - type uranium mineralization zone	185.5	1.75	5.82	6.57	23.21	0.38	376.8	11.19	24.12	2.75	50.78	9.21
Light brown - red fine - grained sandstone - type uranium mineralization zone	195.9	3.44	18.45	6.52	33.55	0.75	357.7	11.59	17.50	12.99	57.76	24.53
Light yellow fine - grained sandstone - type uranium mineralization zone	74.90	2.39	17.62	11.61	23.40	1.60	357.0	13.67	14.10	2.63	56.55	23.05
Grey fine - grained sandstone - type uranium mineralization zone	212.3	2.56	7.23	6.47	19.25	1.05	496.5	10.83	12.43	212.3	0.27	15.64
Light brown - red fine - grained sandstone (non - mineralized)	2.29	2.80	6.16	5.77	21.10	0.33	471.7	9.25	10.67	2.29	0.28	11.98

(Unit: 10^{-6})

Table 2: Average Content of Trace Elements in Uranium Mineralization Zones

	Sample ID	U	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ba	Nd	Pb	Nb	Zr	Cr
Grey - black organic - bearing sandstone	ZKH3-15	170.0	1.99	4.82	6.92	31	0.56	361	20.60	37.40	2.71	51.30	6.23
	ZKH3-14	213.0	1.49	4.38	7.69	17.10	0.24	348	9.25	21.60	3.01	55	10.60
	ZKH3-11	166.0	1.53	3.77	5.81	15.40	0.31	312	8.90	16.10	2.51	45.10	7.35
	ZKH3-12	91.10	1.50	5.32	7.79	17.40	0.23	348	10.50	10.40	2.20	35.40	8.21
	ZKH3-18	199.0	1.43	4.68	5.03	13.60	0.24	388	8.15	19.90	2.54	51	7.25
	ZKH3-25	300.0	1.95	7.31	7.58	40.90	0.40	363	12.40	33.50	3.35	69.20	11.60
	ZKH3-22	237.0	2.46	9.42	6.01	16.70	0.62	404	9.83	26.80	2.41	49.50	10.50
	ZKH3-34	177.0	1.52	7.54	6.10	35.10	0.42	495	11.60	29	2.98	53.90	12.10
	ZKH3-30	117.0	1.92	5.15	6.16	21.70	0.45	373	9.48	22.40	3.02	46.60	9.07
Light brown - red fine - grained sandstone (ore)	ZKH3-28	73.80	4.45	10.50	9.90	36.30	0.40	619	12.10	12	73.80	0.31	14
	ZKZ8-1-10R	174	2.04	6.62	3.91	21.6	0.798	443	11.6	11.2	3.73	79.5	10.9
	ZKZ8-1-10Y	197	1.89	7.7	3.95	13.7	0.414	455	11.9	11.1	3.37	52.5	12.7
	ZKZ8-1-15	150	3.42	11.7	5.76	42	0.915	285	9.71	11.4	2.73	58	10.9
	ZKZ8-1-33	209	7.18	24.2	11	81.1	1.37	309	17.8	36.5	13	135	54.6
	ZKZ4-4-1	338	2.54	36.2	5.55	24.5	0.83	162	9.15	17.7	1.98	42.4	41.3
	ZKZ4-4-4	115	3.66	34.3	5.73	17.3	0.512	253	9.47	11.3	2.6	41.4	30.3
	ZKZ4-4-2	311	2.34	16.4	6.32	31.9	0.797	336	11	28.8	2.71	53	21.5
Light brown - red fine - grained sandstone (non - ore)	ZKH3-16	1.80	4.03	9.11	6.77	18.80	0.36	418	10.80	9.91	1.80	0.35	15.80
	ZKH3-20	5.14	2.42	5.12	4.11	20.50	0.29	455	7.49	12.60	5.14	0.25	8.74
	ZKH3-4	2.18	2.62	6.07	6.84	18.80	0.25	513	9.42	10.60	2.18	0.29	14.60
	ZKH3-6	1.12	2.58	5.62	8	26.10	0.21	504	10.60	8.86	1.12	0.30	12.20
	ZKH3-10	2.71	3.12	5.96	4.36	29.80	0.24	545	8.07	11.70	2.71	0.26	12.30
	ZKH3-13	1.80	2.65	5.34	4.03	19	0.31	463	8.48	12.40	1.80	0.24	9.04
	ZKH3-7	1.27	2.15	5.93	6.29	14.70	0.65	404	9.90	8.60	1.27	0.28	11.20
Light grey fine - grained sandstone	ZKH3-39	41.50	2.96	7.13	6.12	11.10	0.29	500	7.48	11.70	41.50	0.29	15.10
	ZKH3-40	495	2.53	7.27	5.37	12.30	0.28	466	7.91	10.70	495	0.27	18.40
	ZKH3-41	791	3.16	6.06	8.32	14.70	0.36	552	12.50	13.90	791	0.30	23.20
	ZKH3-42	943	2.97	6.29	7.34	11.90	0.41	494	10.80	14.70	943	0.28	14.60
	ZKH3-44	603	2.64	6.46	8.32	14.50	0.32	456	6.76	11	603	0.34	19.60
	ZKH3-31	76.60	1.38	4.38	5.23	38.50	0.28	377	9.09	15.10	76.60	0.25	10.70

	ZKH3-45	68.60	2.95	6.90	7.02	12.50	0.38	495	16.90	16.30	68.60	0.25	11.80
	ZKH3-46	16.60	2.99	7.56	6.14	11.90	0.45	669	7.62	11.30	16.60	0.29	14.60
	ZKH3-47	39	2.11	4.19	4.67	14.80	0.32	412	6.49	8.75	39	0.18	6.53
	ZKH3-48	35.30	2.88	5.34	5.97	28.90	0.34	498	6.68	12.20	35.30	0.24	9.15
	ZKH3-49	162	2.04	7.36	6.08	12.80	0.31	527	22.60	14.50	162	0.27	15.20
	ZKH3-51	90.90	2.94	7.47	6.99	18.80	0.29	461	13.50	14.80	90.90	0.33	18.80
	ZKH3-52	82.30	2.20	6.82	7.71	20.80	0.25	486	12.40	11.90	82.30	0.35	17.50
	ZKH3-53	30.30	2.31	5.32	5.37	29	0.51	457	13.80	11.60	30.30	0.25	8.06
	ZKH3-54	28.50	2.37	7.31	5.09	19.90	2.94	632	8.35	9.62	28.50	0.20	13.60
	ZKH3-55	42	2.44	16.40	5.27	25.30	5.62	483	8.74	10.70	42	0.30	31.80
	ZKH3-56	63.70	2.69	10.60	8.90	29.50	4.45	477	12.50	12.60	63.70	0.22	17.20
Light yellow fine - grained sandstone	ZKZ8-1-16	59.30	3.21	27	14.70	16.50	1.62	310	20.40	10.40	3.33	70.40	33.60
	ZKZ9-1-52	90.5	1.56	8.24	8.52	30.3	1.57	404	6.93	17.8	1.92	42.7	12.5
	ESY4-3	1.72	3.81	8.65	6.8	21.6	2.88	549	17.7	18.7	5.75	96.3	18.1

(Unit: 10^{-6})

Compared with red sandstone (non - mineralized), the contents of Co, Ni, Cu, Pb, Zr, Zn and Cr in each uranium mineralization zone generally show a significant increasing trend.

Vertically, uranium is mainly enriched in the lowermost grey sandstone-type uranium mineralization zone, that is, uranium is largely enriched in the early stage of organic-rich ore-forming fluid evolution, forming the main ore body. As uranium precipitates, the content of uranium in organic-rich ore-forming fluids becomes lower and lower during upward evolution, and there is no uranium mineralization in near-surface gray-black organic veins in the latest stage of evolution. During the evolution process of organic-rich ore-forming fluid, uranium is mainly concentrated and enriched in the early stage, and the uranium content in the ore-forming fluid gradually decreases during the evolution process of organic-rich ore-forming fluid.

Ore Elemental Assemblages

The correlation analysis and cluster analysis of uranium-related elements show that the uranium-related element assemblages of different types of uranium-mineralized sandstone in the Cretaceous sandstone-type uranium deposit in the southwestern part of the Ordos Basin are U, Nb, Co, Cr, Cu, Ni, Rb, Ga, Tl, Ta, Hf, Li, Ba and S, TOC, P, etc. This indicates that uranium mineralization is closely related to Co, Cr, Ni, Cu, S, TOC, P, etc., and uranium mineralization is closely related to S and mobile organic matter in organic-rich ore-forming fluids. These elements are derived from the deep hydrocarbon source rock layers of the basin and are the products of exudation mineralization. However, the interlayer oxidation zone sandstone-type uranium mineralization is closely related to V, Mo, Re, Se and other elements, which are derived from the sedimentary pre-enriched strata themselves.

Associated Elements in Uranium Minerals

The laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) component analysis of pitchblende and coffinite in the Cretaceous sandstone-type uranium deposit in the southwestern Ordos Basin shows that pitchblende, coffinite and other uranium minerals have relatively high Co and Ni contents. The average content of Co is 783.11×10^{-6} and the average content of Ni is 1487.86×10^{-6}. The analysis results of uranium-related elements and cluster analysis show that the uranium-related element assemblage is U, CaO, Co, Ni, Mo, Cd, Sb, REE, Th. Uranium minerals are rich in elements such as Co and Ni, indicating that during the uranium mineralization process, elements like Co and Ni are also enriched, which has the characteristics of the exudation-origin sandstone-type uranium mineralization element assemblage.

The Jurassic sandstone-type uranium deposit metallogenic element assemblage in the northern Ordos Basin is S, Se, Mo, V and Re (Li et al., 2019).

Geochemical Features of U-associated Pyrite

The pyrite during the mineralization period of the Cretaceous sandstone-type uranium deposit in the southwestern Ordos Basin is rich in elements such as Co and Ni. In pyrite's Zone 1 during the mineralization period, the Co content of pyrite is 0.17% - 0.57%, and the Ni content is 0.21% - 1.08%; in pyrite's Zone 2, the Co content of pyrite is 0.06% - 0.17%, and the Ni content is 0.03% - 0.13%; in pyrite's Zone 3, the Co content of pyrite is 0.05% - 0.17%, and the Ni content is 0.03% - 0.59%. The electron probe micro analysis (EPMA) results of pyrite during the mineralization period show that in the core part of pyrite, the Co content is 0.32%, and the Ni content is 0.43%; in the middle part, the Co content is 0.37%, the Ni content is 0.91%, and the U content is 0.07%; in the edge part, the Co content is 0.47%, the Ni content is 1.17%, and the U content is 0.15%. From the core to the edge of pyrite, the contents of Co and Ni show an increasing trend, and Co, Ni are positively correlated with U content, indicating that during the uranium mineralization process, elements such as Co and Ni are also enriched.

Compared with the Hadatu uranium deposit in the Erlian Basin, the Co and Ni contents of pyrite during the mineralization period of the Cretaceous sandstone-type uranium deposit in the southwestern Ordos Basin are much higher than those of the Hadatu uranium deposit (Co content is 0 - 0.007%, Ni content is 0 - 0.014%), showing that the Cretaceous sandstone-type uranium deposit in the southwestern Ordos Basin has the characteristics of exudation-origin metallogenic element assemblage.

Conclusions

The Cretaceous sandstone-type uranium deposits in the southwestern Ordos Basin have similar uranium and associated elemental assemblages. The sandstone uranium deposits contain metal minerals such as pyrite, galena, sphalerite, chalcopyrite, covellite, and stibnite. Uranium mineralization is closely related to Co, Cr, Ni, Cu, S, TOC, P, etc., and is also closely related to organic matter.

The Cretaceous sandstone uranium deposit in the southwestern Ordos Basin has vertical zoning. From bottom to top, it can be divided into five uranium mineralization zones: grey sandstone uranium mineralization zone, yellow sandstone uranium mineralization zone, red sandstone uranium mineralization zone, grey - black organic mass uranium mineralization zone, and grey - black organic vein uranium mineralization zone.

The uranium mineralization characteristics of Cretaceous sandstone uranium deposits in the southwestern Ordos Basin are similar. They are all the products of deep organic ore-forming fluid exudation reduction and enrichment mineralization, and have the characteristics of exudation-origin uranium mineralization. The gray-black organic mass and veins are important identification markers for the exudation origin of Cretaceous sandstone uranium deposits in the southwestern Ordos Basin.

1. Li Z., Liu W., Li W., Li X., Qin M., Cai Y., et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin,Inner Mongolia. China Geology, 2022, 49 (4): 1009-1047.
2. Li Z., Qin M., Cai Y., et al. Metalllogenic Models and Prospective Analysis of Sandstone-type Uranium Deposits in Ordos Basin. Uranium Geology, 2020, 36(01): 1-13.

*Геохимия и урановая минерализация в красных эоловых песчаниках мелового возраста на юго-западе бассейна Ордос, Китай

И. Луншэн[1], Линь Цзинжун[1], Ли Цзыин[1], Хэ Фэн[2], У Чжэнцянь[2], Лю Кунпэн[2], Цю Линьфэй[1], Ван Цзюньсянь[1], Ли Сидэ[1]
[1]Пекинский научно-исследовательский институт урановой геологии, Пекин, Китай; [2]Научно-исследовательский институт № 203 КННК, г. Сяньян, пров. Шэньси, Китай

В работе исследованы геохимические характеристики песчаниковых урановых месторождений нижнего мела на юго-западе бассейна Ордос, Северный Китай. По разрезу урановая минерализация подразделяется на пять зон (снизу вверх): зона минерализации в сером песчанике, в жёлтом песчанике, в красном песчанике, зона в тёмно-сером песчанике с вкрапленным органическим веществом и зона с органическими жилами. Изучены ассоциации минералов изменения, урановых минералов и геохимический состав по зонам. Установлено, что с глубины к поверхности восстановительная активность убывает, а уран преимущественно концентрируется в нижней серой зоне, тогда как органическое вещество преобладает в верхних тёмно-серых зонах в виде вкрапленников или жил. Показано, что различные типы урановых руд в меловых толщах на юго-западе бассейна Ордос обладают сходными чертами минерализации и сформированы в результате экссудативного процесса с участием органоносных глубинных флюидов, приводящего к восстановлению и обогащению ураном.

Вертикальная зональность урановой минерализации

В меловых песчаниках юго-западной части бассейна Ордос выделяются пять вертикальных зон урановой минерализации: зона в сером песчанике, в жёлтом, в красном, зона в тёмно-сером песчанике с пятнами и массами органического вещества и зона с органическими жилами. Ассоциации минералов изменения, урановых минералов и характеристика содержания элементов в этих зонах свидетельствуют о формировании минерализации путём экссудации, восстановления и обогащения ураном органоносными флюидами. Серо-чёрные пятна, массы и жилы органики — важный признак экссудативного генезиса урановых месторождений мелового возраста на юго-западе бассейна Ордос.

Стадии минерализации

Согласно концепции экссудативной минерализации, построена модель урановой минерализации меловых песчаников бассейна Ордос, выделяющая три стадии: – стадия осадконакопления и диагенеза (нижний мел, свиты Лохэ и Цзиньчуань, 139.8–113.1 млн лет); – стадия экссудации и инфильтрации (поздний нижний мел – олигоцен, 113.1–23.0 млн лет); – стадия наложенной экссудативной минерализации (миоцен – плейстоцен, 23.0–0.01 млн лет). Возраст ранней минерализации: 104, 86.7, 73 и 68.8 млн лет; поздней — менее 8 млн лет: 5.1, 3.2, 1.32 и 0.49 млн лет.

Геохимические особенности зон минерализации

Анализ элементов в изменённых песчаниках показывает закономерности распределения по вертикали (см. табл. 1, 2). По сравнению с неминерализованным красным песчаником, содержание Co, Ni, Cu, Pb, Zr, Zn и Cr в зонах урановой минерализации значительно выше. Уран преимущественно обогащается в нижней серой зоне — основной рудной части. По мере подъёма и эволюции органоносного рудного флюида уран постепенно осаждается, и в поздней стадии вблизи поверхности (в серо-чёрных органических жилах) минерализация отсутствует. Уран концентрируется в начальной стадии, содержание его в рудном флюиде со временем убывает (таб. 1, таб. 2).

---

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

Таблица 1. Среднее содержание элементов в зонах урановой минерализации

Zonation types	U	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ba	Nd	Pb	Nb	Zr	Cr
Grey - black organic matter vein - type uranium mineralization zone	1.34	11.46	12.86	10.65	19.65	4.87	680.0	12.18	45.35	3.73	32.10	12.62
Grey - black organic matter mass - type uranium mineralization zone	185.5	1.75	5.82	6.57	23.21	0.38	376.8	11.19	24.12	2.75	50.78	9.21
Light brown - red fine - grained sandstone - type uranium mineralization zone	195.9	3.44	18.45	6.52	33.55	0.75	357.7	11.59	17.50	12.99	57.76	24.53
Light yellow fine - grained sandstone - type uranium mineralization zone	74.90	2.39	17.62	11.61	23.40	1.60	357.0	13.67	14.10	2.63	56.55	23.05
Grey fine - grained sandstone - type uranium mineralization zone	212.3	2.56	7.23	6.47	19.25	1.05	496.5	10.83	12.43	212.3	0.27	15.64
Light brown - red fine - grained sandstone (non - mineralized)	2.29	2.80	6.16	5.77	21.10	0.33	471.7	9.25	10.67	2.29	0.28	11.98

(Unit: 10^{-6})

Таблица 2. Среднее содержание редких элементов в зонах урановой минерализации

	Sample ID	U	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ba	Nd	Pb	Nb	Zr	Cr
Grey - black organic - bearing sandstone	ZKH3-15	170.0	1.99	4.82	6.92	31	0.56	361	20.60	37.40	2.71	51.30	6.23
	ZKH3-14	213.0	1.49	4.38	7.69	17.10	0.24	348	9.25	21.60	3.01	55	10.60
	ZKH3-11	166.0	1.53	3.77	5.81	15.40	0.31	312	8.90	16.10	2.51	45.10	7.35
	ZKH3-12	91.10	1.50	5.32	7.79	17.40	0.23	348	10.50	10.40	2.20	35.40	8.21
	ZKH3-18	199.0	1.43	4.68	5.03	13.60	0.24	388	8.15	19.90	2.54	51	7.25
	ZKH3-25	300.0	1.95	7.31	7.58	40.90	0.40	363	12.40	33.50	3.35	69.20	11.60
	ZKH3-22	237.0	2.46	9.42	6.01	16.70	0.62	404	9.83	26.80	2.41	49.50	10.50
	ZKH3-34	177.0	1.52	7.54	6.10	35.10	0.42	495	11.60	29	2.98	53.90	12.10
	ZKH3-30	117.0	1.92	5.15	6.16	21.70	0.45	373	9.48	22.40	3.02	46.60	9.07
Light brown - red fine - grained sandstone (ore)	ZKH3-28	73.80	4.45	10.50	9.90	36.30	0.40	619	12.10	12	73.80	0.31	14
	ZKZ8-1-10R	174	2.04	6.62	3.91	21.6	0.798	443	11.6	11.2	3.73	79.5	10.9
	ZKZ8-1-10Y	197	1.89	7.7	3.95	13.7	0.414	455	11.9	11.1	3.37	52.5	12.7
	ZKZ8-1-15	150	3.42	11.7	5.76	42	0.915	285	9.71	11.4	2.73	58	10.9
	ZKZ8-1-33	209	7.18	24.2	11	81.1	1.37	309	17.8	36.5	13	135	54.6
	ZKZ4-4-1	338	2.54	36.2	5.55	24.5	0.83	162	9.15	17.7	1.98	42.4	41.3
	ZKZ4-4-4	115	3.66	34.3	5.73	17.3	0.512	253	9.47	11.3	2.6	41.4	30.3
	ZKZ4-4-2	311	2.34	16.4	6.32	31.9	0.797	336	11	28.8	2.71	53	21.5
Light brown - red fine - grained sandstone (non - ore)	ZKH3-16	1.80	4.03	9.11	6.77	18.80	0.36	418	10.80	9.91	1.80	0.35	15.80
	ZKH3-20	5.14	2.42	5.12	4.11	20.50	0.29	455	7.49	12.60	5.14	0.25	8.74
	ZKH3-4	2.18	2.62	6.07	6.84	18.80	0.25	513	9.42	10.60	2.18	0.29	14.60
	ZKH3-6	1.12	2.58	5.62	8	26.10	0.21	504	10.60	8.86	1.12	0.30	12.20
	ZKH3-10	2.71	3.12	5.96	4.36	29.80	0.24	545	8.07	11.70	2.71	0.26	12.30
	ZKH3-13	1.80	2.65	5.34	4.03	19	0.31	463	8.48	12.40	1.80	0.24	9.04
	ZKH3-7	1.27	2.15	5.93	6.29	14.70	0.65	404	9.90	8.60	1.27	0.28	11.20
Light grey fine - grained sandstone	ZKH3-39	41.50	2.96	7.13	6.12	11.10	0.29	500	7.48	11.70	41.50	0.29	15.10
	ZKH3-40	495	2.53	7.27	5.37	12.30	0.28	466	7.91	10.70	495	0.27	18.40
	ZKH3-41	791	3.16	6.06	8.32	14.70	0.36	552	12.50	13.90	791	0.30	23.20
	ZKH3-42	943	2.97	6.29	7.34	11.90	0.41	494	10.80	14.70	943	0.28	14.60
	ZKH3-44	603	2.64	6.46	8.32	14.50	0.32	456	6.76	11	603	0.34	19.60
	ZKH3-31	76.60	1.38	4.38	5.23	38.50	0.28	377	9.09	15.10	76.60	0.25	10.70
	ZKH3-45	68.60	2.95	6.90	7.02	12.50	0.38	495	16.90	16.30	68.60	0.25	11.80

	ZKH3-46	16.60	2.99	7.56	6.14	11.90	0.45	669	7.62	11.30	16.60	0.29	14.60
	ZKH3-47	39	2.11	4.19	4.67	14.80	0.32	412	6.49	8.75	39	0.18	6.53
	ZKH3-48	35.30	2.88	5.34	5.97	28.90	0.34	498	6.68	12.20	35.30	0.24	9.15
	ZKH3-49	162	2.04	7.36	6.08	12.80	0.31	527	22.60	14.50	162	0.27	15.20
	ZKH3-51	90.90	2.94	7.47	6.99	18.80	0.29	461	13.50	14.80	90.90	0.33	18.80
	ZKH3-52	82.30	2.20	6.82	7.71	20.80	0.25	486	12.40	11.90	82.30	0.35	17.50
	ZKH3-53	30.30	2.31	5.32	5.37	29	0.51	457	13.80	11.60	30.30	0.25	8.06
	ZKH3-54	28.50	2.37	7.31	5.09	19.90	2.94	632	8.35	9.62	28.50	0.20	13.60
	ZKH3-55	42	2.44	16.40	5.27	25.30	5.62	483	8.74	10.70	42	0.30	31.80
	ZKH3-56	63.70	2.69	10.60	8.90	29.50	4.45	477	12.50	12.60	63.70	0.22	17.20
Light yellow fine - grained sandstone	ZKZ8-1-16	59.30	3.21	27	14.70	16.50	1.62	310	20.40	10.40	3.33	70.40	33.60
	ZKZ9-1-52	90.5	1.56	8.24	8.52	30.3	1.57	404	6.93	17.8	1.92	42.7	12.5
	ESY4-3	1.72	3.81	8.65	6.8	21.6	2.88	549	17.7	18.7	5.75	96.3	18.1

(Unit: 10^{-6})

По сравнению с красным песчаником (неминерализованным) содержание Co, Ni, Cu, Pb, Zr, Zn и Cr в каждой зоне урановой минерализации, как правило, имеет тенденцию к значительному увеличению. По вертикали уран в основном обогащается в самой нижней зоне урановой минерализации типа серого песчаника, то есть уран в значительной степени обогащается на ранней стадии эволюции обогащенного органикой рудообразующего флюида, формирующего основное рудное тело. По мере осаждения урана содержание урана в богатых органикой рудообразующих флюидах становится все ниже и ниже в ходе восходящей эволюции, и на последней стадии эволюции урановая минерализация в приповерхностных серо-черных органических жилах отсутствует. В процессе эволюции богатого органическими веществами рудообразующего флюида уран в основном концентрируется и обогащается на ранней стадии, и содержание урана в рудообразующем флюиде постепенно снижается в процессе эволюции богатого органическими веществами рудообразующего флюида.

Скопления рудных элементов

Корреляционный анализ и кластерный анализ связанных с ураном элементов показывают, что ассоциации связанных с ураном элементов в различных типах уранминерализованного песчаника в урановом месторождении песчаникового типа мелового периода в юго-западной части бассейна Ордос представляют собой U, Nb, Co, Cr, Cu, Ni, Rb, Ga, Tl, Ta, Hf, Li, Ba и S, TOC, P и т.д. Это указывает на то, что урановая минерализация тесно связана с Co, Cr, Ni, Cu, S, TOC, P и т.д., а урановая минерализация тесно связана с S и подвижным органическим веществом в богатых органикой рудообразующих флюидах. Эти элементы добываются из глубоких слоев углеводородных пород-источников бассейна и являются продуктами экссудационной минерализации. Однако урановая минерализация типа песчаника в зоне окисления между слоями тесно связана с содержанием V, Mo, Re, Se и других элементов, которые добываются непосредственно из предварительно обогащенных осадочных пород.

Сопутствующие элементы в урановых минералах

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS), проведенная методом лазерной абляции, показывает, что компонентный анализ урановой обманки и коффинита в урановом месторождении песчаникового типа мелового периода в юго-западной части бассейна Ордос показывает, что урановая обманка, коффинит и другие урановые минералы имеют относительно высокое содержание Co и Ni. Среднее содержание Co составляет $783{,}11\times10^{-6}$, а среднее содержание Ni - $1487{,}86\times10^{-6}$. Результаты анализа связанных с ураном элементов и кластерного анализа показывают, что совокупность связанных с ураном элементов включает U, CaO, Co, Ni, Mo, Cd, Sb, REE, Th. Урановые минералы богаты такими элементами, как Co и Ni, что указывает на то, что в процессе урановой минерализации такие элементы, как Co и Ni, также обогащаются, что имеет характеристики урановой

минерализации уранового происхождения, характерной для песчаников. Металлогеническая совокупность элементов уранового месторождения юрского типа в северной части бассейна Ордос представлена S, Se, Mo, V и Re (Li et al., 2019).

Геохимические особенности пирита, ассоциированного с U

Пирит в период минерализации уранового месторождения песчаникового типа мелового периода в юго-западной части бассейна Ордос богат такими элементами, как Co и Ni. В пиритной зоне 1 в период минерализации содержание Co в пирите составляет 0,17 - 0,57%, а содержание Ni - 0,21 - 1,08%; в пиритной зоне 2 содержание Co в пирите составляет 0,06 - 0,17%, а содержание Ni - 0,03 - 0,13%.%; в зоне 3 пирита содержание Co в пирите составляет 0,05 - 0,17%, а содержание Ni - 0,03 - 0,59%. Результаты электронно-зондового микроанализа (EPMA) пирита в период минерализации показывают, что в сердцевинной части пирита содержание Co составляет 0,32%, а Ni - 0,43%; в средней части содержание Co составляет 0,37%, Ni - 0,91%, а содержание Содержание U составляет 0,07%; в краевой части содержание Co составляет 0,47%, Ni - 1,17%, а U - 0,15%. От сердцевины к краю пирита содержание Co и Ni имеет тенденцию к увеличению, причем Co, Ni положительно коррелируют с содержанием U, что указывает на то, что в процессе минерализации урана такие элементы, как Co и Ni, также обогащаются. По сравнению с урановым месторождением Хадату в бассейне Эрлиан, содержание Co и Ni в пирите в период минерализации уранового месторождения мелового песчаника в юго-западной части бассейна Ордос значительно выше, чем в урановом месторождении Хадату (содержание Co составляет 0-0,007%, содержание Ni - 0-0,014%), показывающие, что урановое месторождение мелового песчаникового типа в юго-западной части бассейна Ордос обладает характеристиками металлогенического комплекса экссудационного происхождения.

Выводы

Урановые залежи мелового типа, сложенные песчаниками, в юго-западной части бассейна Ордос содержат сходные сочетания урана и связанных с ним элементов. Залежи урана в песчанике содержат металлические минералы, такие как пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, ковеллит и стибнит. Урановая минерализация тесно связана с Co, Cr, Ni, Cu, S, TOC, P и т.д., а также с органическим веществом. Месторождение урана из песчаника мелового периода в юго-западной части бассейна Ордос имеет вертикальную зональность. Снизу доверху его можно разделить на пять зон урановой минерализации: зона урановой минерализации из серого песчаника, зона урановой минерализации из желтого песчаника, зона урановой минерализации из красного песчаника, зона урановой минерализации из серо-черной органической массы и зона урановой минерализации из серо-черных органических жил. Характеристики уранового оруденения урановых отложений из песчаников мелового периода в юго-западной части бассейна Ордос схожи. Все они являются продуктами глубокой экстракции органических рудообразующих флюидов, восстановления и обогащения минерализации, и имеют характеристики уранового оруденения экссудационного происхождения. Серо-черная органическая масса и прожилки являются важными идентификационными признаками экссудативного происхождения урановых отложений из песчаника мелового периода в юго-западной части бассейна Ордос.

1. Li Z., Liu W., Li W., Li X., Qin M., Cai Y., et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin,Inner Mongolia. China Geology, 2022, 49 (4): 1009–1047.
2. Li Z., Qin M., Cai Y., et al. Metalllogenic Models and Prospective Analysis of Sandstone-type Uranium Deposits in Ordos Basin. Uranium Geology, 2020, 36(01): 1–13.

Advances in Mineralization Information Extraction and Application of Sandstone-Type Uranium Deposits

Yu Rengan[1,2], Zhu Qiang[1,2], Si Qinghong[1,2], Wang Shanbo[1,2], Zhao Hualei[1,2], Chen Lulu[1,2]
[1]Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China, e-mail: 121181748@qq.com;
[2]Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

The formation of sandstone-type uranium deposits in basins is a complex process controlled by the interaction of multiple geological factors, such as uranium sources, tectonic activity, sedimentary characteristics, and redox conditions. These factors collectively determine the formation and distribution of deposits, posing significant challenges for exploration. Uranium deposits are often deeply buried, with subtle differences in the physical properties of surrounding rocks, and geophysical methods exhibit inherent interpretational ambiguities, making uranium localization and evaluation particularly difficult. However, through comprehensive analysis of geological, geophysical, and geochemical multi-source information, potential uranium ore bodies can be more accurately identified and assessed. Effective extraction and integration of such information not only reveal the spatial distribution characteristics of uranium deposits but also help narrow exploration targets, providing a scientific basis for further geological surveys and exploration.

Natural gamma logging, as a key geophysical technique, plays a vital role in oil and coal exploration. With the deepening of domestic uranium exploration practices—particularly in the Daying and Qianjiadian uranium deposits—natural gamma logging has demonstrated its potential in "coal-uranium co-exploration" and "oil-uranium co-exploration" models. The "secondary development" approach promoted by the China Geological Survey has further expanded its application (Jin et al., 2018). By studying natural and quantitative gamma logging principles and comparing data from coal, oil, and uranium boreholes, researchers have established empirical relationships between natural gamma and radioactive gamma values, revealing lithological influences on logging responses. This lays the foundation for developing more precise modules for ore grade and uranium concentration per square meter.

Aeromagnetic and gravity surveys are powerful tools for exploring concealed and semi-concealed geological structures, aiding in delineating rock masses, basement morphology, and volcanic structures. Gravity gradient zones and contour disparities often indicate deep-seated faults, while secondary gravity anomalies in residual fields reflect minor fractures. In oil-gas regions, sandstone-type uranium deposits are frequently distributed near intersections of secondary faults.

High-density electrical resistivity surveys detect subsurface resistivity variations, mapping stratigraphic interfaces and ore-bearing sand bodies. Though limited in depth, they show promise for shallow (<200 m) paleo-valley sandstone-type uranium deposits.

Digital elevation models (DEM) indirectly reveal paleo-channels through modern drainage patterns. Combining DEM with remote sensing and geological data enhances uranium exploration targeting. Aerial radiometric surveys rapidly cover large areas, identifying weak radioactive anomalies linked to uranium mineralization. However, anomalies caused by bedrock outcrops or mixed sources require careful interpretation. Seismic exploration, through vertical seismic profiling and attribute analysis, enables precise sandstone distribution prediction and reservoir characterization.

By systematically integrating geological, geophysical, and drilling data, exploration targets can be optimized, providing a basis for future uranium prospecting.

The study was funded by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 92162212) and China Geological Survey Project (Grant No. [2023]02-28).

1. Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, et al., 2018. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration holes on sandstone-type uranium deposit in North China. China Geology, 1: 167–168.

2. Yu Rengan, Sun Dapeng, Zhou Xiaoxi, et al., 2022. Preliminary study on uranium resource evaluation method based on natural gamma logging data: A case study of the Pengyang uranium deposit in the Ordos Basin. Coal Geology & Exploration, 50(5): 144–153.
3. Jiang Minzhong, Zhang Jiyun, Shi Yan, et al., 2006. Study on weak aerial radiometric uranium anomalies in leachable sandstone-type uranium deposits and their prospecting significance. Uranium Geology, 22(1): 38–43.

*Достижения в извлечении и применении информации о минерализации в песчаниковых урановых месторождениях

Ю Жэнган[1,2], Чжу Цян[1,2], Сы Цинхун[1,2], Ван Шаньбо[1,2], Чжао Хуалэй[1,2], Чэнь Лулу[1,2]
[1]Тяньцзиньский центр Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай, e-mail: 121181748@qq.com; [2]Лаборатория геологии урана Геологической службы Китая, Тяньцзинь 300170, Китай

Формирование песчаниковых урановых месторождений в пределах бассейнов — это сложный процесс, контролируемый взаимодействием множества геологических факторов, таких как источники урана, тектоническая активность, седиментационные особенности и окислительно-восстановительные условия. Совокупное влияние этих факторов определяет формирование и распределение месторождений, что создаёт серьёзные трудности в поисково-оценочных работах. Урановые залежи часто залегают на значительной глубине, при этом физические свойства окружающих пород слабо контрастны, а интерпретация геофизических данных характеризуется высокой неопределённостью, что существенно затрудняет локализацию и оценку урановых объектов. Однако благодаря комплексному анализу многокомпонентной геолого-геофизической и геохимической информации возможно более точное выявление и оценка перспективных урановых рудных тел. Эффективное извлечение и интеграция подобной информации позволяют не только раскрыть пространственные закономерности размещения урановых залежей, но и сузить поисковый ареал, предоставляя научную основу для дальнейших геологоразведочных работ.

Методика природного гамма-каротажа как ключевой геофизический инструмент широко используется в разведке нефти и угля. В ходе углубления отечественных урановых поисков — особенно на месторождениях Дайин и Цяньцзядянь — природный гамма-каротаж продемонстрировал перспективность в рамках моделей «совместной разведки угля и урана» и «совместной разведки нефти и урана». Подход «вторичного освоения», продвигаемый Геологической службой Китая, ещё более расширил сферу его применения (Jin et al., 2018). Изучение принципов природного и количественного гамма-каротажа, а также сопоставление данных из угольных, нефтяных и урановых скважин позволило установить эмпирические зависимости между природным и радиоактивным гамма-излучением, выявив влияние литологических факторов на ответ каротажа. Это создаёт основу для разработки более точных моделей оценки содержания урана и запасов урана на квадратный метр.

Аэромагнитная и гравиметрическая съёмки являются мощными инструментами для изучения скрытых и полускрытых геологических структур, позволяя выделять массивы, морфологию фундамента и вулканические структуры. Зоны градиента силы тяжести и расхождения изогипс нередко указывают на глубокозалегающие разломы, а вторичные гравитационные аномалии в остаточном поле отражают мелкие трещиноватые зоны. В нефтегазоносных районах песчаниковые урановые месторождения часто приурочены к пересечениям вторичных разломов.

Высокоразрешающая электроразведка позволяет выявлять изменения удельного электрического сопротивления в разрезе и картировать стратиграфические границы и рудоносные песчаники. Несмотря на ограниченную глубину проникновения, она проявила высокую эффективность при поисках неглубоких (<200 м) урановых месторождений палеодолинного типа.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) позволяют косвенно реконструировать древние русловые системы по современным дренажным структурам. Совмещение ЦМР с данными дистанционного зондирования и геологической информации повышает эффективность

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

выделения перспективных участков урановой минерализации. Аэрогамма-съёмка охватывает обширные территории и эффективно выявляет слабо выраженные радиоактивные аномалии, связанные с урановой минерализацией. Однако аномалии, обусловленные выходами коренных пород или смешанными источниками, требуют тщательной интерпретации. Сейсморазведка — за счёт вертикального сейсмического профилирования и анализа атрибутов — обеспечивает точное картирование песчаников и характер резервуаров.

Системная интеграция геологических, геофизических и буровых данных позволяет оптимизировать выделение объектов для разведки, формируя прочную основу для дальнейших урановых поисков.

Исследование финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 92162212) и проектом геологической службы Китая (грант № [2023]02-28).

1. Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, et al., 2018. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration holes on sandstone-type uranium deposit in North China. China Geology, 1: 167–168.
2. Yu Rengan, Sun Dapeng, Zhou Xiaoxi, et al., 2022. Preliminary study on uranium resource evaluation method based on natural gamma logging data: A case study of the Pengyang uranium deposit in the Ordos Basin. Coal Geology & Exploration, 50(5): 144–153.
3. Jiang Minzhong, Zhang Jiyun, Shi Yan, et al., 2006. Study on weak aerial radiometric uranium anomalies in leachable sandstone-type uranium deposits and their prospecting significance. Uranium Geology, 22(1): 38–43.

The Geology, Geochemistry and the Metallogenic Rules of the Alkaline Metasomatism Uranium Deposits: A Review

Zhong J.[1,2], Li Z.Y.[1,2], Cai Y.Q.[1,2], Yu H.[1,2]
[1]National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing, China, e-mail: zhongjun@briug.cn; [2]Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing, China, e-mail: zhongjun@briug.cn

The alkaline metasomatism uranium deposit is an important uranium deposit type with large tonnage and low grade, which can be further divided into the Na-metasomatism and K-metasomatism subtypes. It is the fourth largest of all the fifteen uranium deposit types proposed by NEA and IAEA (2020), with great economic significance and research value (Cuney, 2009). One of the major characteristics of the alkaline metasomatism uranium deposits is that they are commonly formed in clusters to form a giant or super-large uranium ore district, as exemplified by the Central Ukraine Uranium Province (>300 000 t U_3O_8 @ 0.05～0.20% U_3O_8, Cuney et al., 2012), Mountain Isa in Australia (>50 000 t U_3O_8 @ 0.06%～0.07% U_3O_8, Wilde, 2020), Lagoa Real in Brazil (>100 000 t U_3O_8, Lobato et al., 1990), Central Mineral Belt in Canada (>50 000 t U_3O_8, Wilde, 2020), etc.

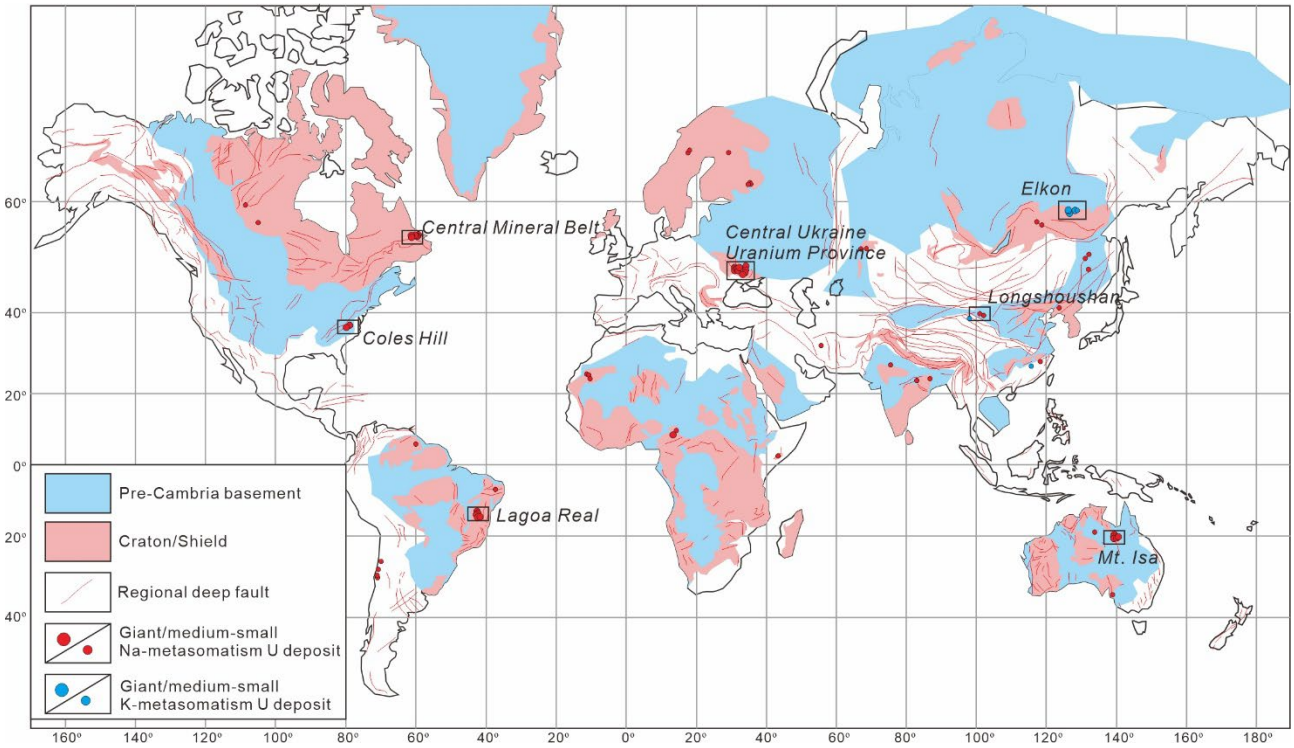


Fig. 1 Simplified distribution map of the major alkaline metasomatism type uranium deposits

The representative alkaline metasomatism type uranium deposits in the world are listed in Table 1, and the major geological, geochemical features and metallogenic rules are summarized as follows.

1) The alkaline metasomatism type uranium deposits are commonly of low grade but large tonnage, with total uranium resources more than 940,000 t U (Table 1). Of all the first five major uranium types, It has similar average grade as the sandstone uranium deposits (0.04%～0.3% U), which is much lower than that of the unconformity type, but slightly higher than the IOCG and intrusive type uranium deposits.

2) This type of uranium deposits are identified in both the stable craton or shield and the orogenic belts, with those occurring in the orogenic belts in larger proportions. Except the Mt. Isa and Coles Hill uranium districts, all the other large to super-large uranium deposits are developed within the stable craton or shield.

Table 1 Representative alkaline metasomatism type uranium district/deposit in the world

No.	Ore field/district	Deposit	Subtype	Resources (t U)	Average grade (% U)	Data source
1	Central Ukraine Uranium Province	Novokonstantinovske	Na-metasomatism	93 630	0.14	Cuney et al., 2012
2		Centralnye		61 271	0.10	
3		Michurinske		29 760	0.10	
4		Severinske		68 400	0.10	
5		Vatutinske		25 500	0.14	
6		Pervomayske		10 200	0.12	
7		Zheltorechenske		14 000	0.12	
8	Lagoa Real	Engehno	Na-metasomatism	23 235		Wilde, 2020
9		Cachoeira		17 208	0.30	
10		Modesto		12 186		
11	Mountain Isa	Valhalla	Na-metasomatism	29 353	0.07	Wilde et al., 2013
12		Skal		8 398	0.06	
13		Odin		6 780	0.05	
14		Bikini		5 239	0.05	
15	Elkon	Druzhnoye	K-metasomatism	95 840	0.13	Dahlkamp, 2009
16		Elkon		40 263	0.18	
17		Elkonskoye Plateau		62 400	0.16	
18		Neprokhodimoye		42 760	0.12	
19		Kurung		54 850	0.15	
20		Severnoye		61 526	0.15	
21	Central Mineral belt	Michelin	Na-metasomatism	35 478	0.10	Wilde, 2020
22		Jacques Lake		8 629	0.06	
23		Inda		2 542	0.07	
24	Coles Hill	Coles Hill North	Na-metasomatism	31 728	0.04	Hall et al., 2022
25		Coles Hill South		31 154	0.05	
26	Espinharas	Espinharas	Na-metasomatism	4 240	0.1	Dahlkamp, 2010
27	Kitongo	Kitongo	Na-metasomatism	11 130	0.09	Kouske et al., 2022
28	Bohemia	Rozna	Na-metasomatism	22 983	0.24	Wilde, 2020
29		Zadni-Chodov		4 151	0.20	
30	Cerro Carmen	Prospecto Cerro Carmen	Na-metasomatism	29 000		Wilde, 2020

3) These deposits, with no exceptions, are all enclosed within the alkaline metasomatic alteration envelopes and spatially closely related to the regional deep faults (Fig. 1). The regional faults are both the magmatic rocks-controlling faults and also the ore-controlling structures, and they were commonly re-activated by multiple tectonic events. The exact examples include the N–S-trending faults in Central Ukraine (Cuney et al., 2012) and the Malugou Fault in Longshoushan, NW China (Zhong et al., 2020).

4) The mineralization age ranges from Paleoproterozoic to Cenozoic, but dominated by those formed in the Paleoproterozoic age (1.90–1.50 Ga), corresponding to the amalgamation and breakup of the Rodinia Supercontinent. The Central Ukraine Uranium Province, Central Mineral Belt in Canada and the Mountain Isa district are all formed within this period of time. Neoproterozoic-Paleozoic age (600–500 Ma) is another important mineralization formation stage, with the formation of the Coles Hill, Lagoa Real uranium deposits or districts. The Mesozoic example is the Elkon uranium district in Russia that were formed between 135 Ma and 130 Ma (Dahlkamp, 2009). An obvious age gap between the host rocks and uranium mineralization could be recognized in the alkaline metasomatism uranium deposits, similar to other hydrothermal U mineralization systems.

5) The major mineral assemblages of the alkaline metasomatism uranium deposit could be summarized into three stages: the alkaline metasomatism stage, with the formation of abundant albite, the alkaline mafic minerals (e.g. riebeckite, aegirine etc.) in some cases, and the hematite alteration; the major uranium mineralization stage, characterized by the uraninite, brannerite, intergrown with

hydrothermal apatite, zircon and/or other phosphate minerals; and the carbonate stage, with minor sulfides, uranium minerals and limited development of quartz grains. The diagnostic feature in terms of mineralogy of the alkaline metasomatism uranium deposits is the widely development of the hydrothermal zircons, apatite and the formation of Ti-bearing phases (brannerite, anatase, titanite, et al.), which is in consistence with the commonly enrichment of the Ti, Zr, P, rare earth elements.

6) The ore-forming fluids source remains controversial, including the magmatic source, meteoric water or basin formation water, and mixture of all above. The input of mantle-derived fluids has also been proposed on the basis of the comprehensive analysis of geological and geochemical data (Li et al., 2020). Uranium is believed to be transported mainly in the forms of uranyl carbonates, but uranyl-phosphate complex might also play an important role in the transportation of uranium in these deposits (Hall et al., 2022). Temperature decreases, CO_2 escape and redox action are all the possible causes for the precipitation of uranium.

To sum up, the alkaline metasomatism uranium deposit is fundamentally a classification on the basis of the diagnostic alteration, rather than a genetic type. On the basis of the abovementioned features, it is suggested that the alkaline metasomatism type uranium deposit is basically a hydrothermal uranium deposit that is closely related to the orogenic process. In other words, it is the product of regional collisional and extensional tectonic events, with relatively unique geological features.

1. Cuney M. The extreme diversity of uranium deposits. Mineralium Deposita, 2009(44): 3-9.
2. Cuney M., Emetz A., Mercadier J., et al. Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints. Ore Geology Reviews, 2012(44): 82-106.
3. Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world：Asia. Chapter 10 Russian Federation，Asian Territory. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2009: 372-386.
4. Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world：Europe：Chapter 19 Ukraine[M]. Berlin and Heidelberg：Springer-Verlag，2016：619-671.
5. Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world: USA and Latin America. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 1-536.
6. Hall S., Beard J.S., Potter C.J., et al. The Coles Hill uranium deposit, Virginia, USA: Geology, geochemistry, geochronology, and genetic model. Economic Geology, 2022, 117(2): 273-304.
7. Kouske A.P., Gerard M., Etame J., et al. Paragenesis, mineral chemical and microtextural studies of uranium bearing minerals in the brecciated albitites U-ores from the Kitongo shear zone, Poli region, northern Cameroon. International Journal of Earth Sciences, 2022, https://doi.org/10.1007/s00531-022-02186-1.
8. Lobato L.M., Fyfe W. Metamorphism, metasomatism, and mineralization at Lagoa Real, Bahia, Brazil. Economic Geology, 1990, 85: 968-989.
9. Nuclear Energy Agency (NEA), International Atomic Energy Agency (IAEA). Uranium 2020: Resources, production and demand: NEA No. 7551. Vienna: NEA, OECD, 2020.
10. Wilde A. Shear-hosted uranium deposits: A Review. Minerals, 2020, 10, 954. doi:10.3390/min10110954.
11. Wilde A，Otto A，Jory J，et al. Geology and mineralogy of uranium deposits from Mount Isa, Australia: Implications for albitite uranium deposit models. Minerals, 2013(3): 258-283.
12. Zhong J., Wang S.Y., Gu D.Z., et al. Geology and fluid geochemistry of the Na-metasomatism U deposits in the Longshoushan uranium metallogenic belt, NW China: Constraints on the ore-forming process. Ore Geology Reviews, 2020, 116, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103214.

***Геология, геохимия и закономерности рудообразования урановых месторождений, связанных с щелочным метасоматозом: обзор**

Чжун Цзюнь[1,2], Ли Цзыин[1,2], Цай Юйцюань[1,2], Юй Хао[1,2]
[1]Национальная лаборатория по поиску и добыче урановых ресурсов и ядерному дистанционному зондированию, Пекин, Китай, e-mail: zhongjun@briug.cn; [2]Пекинский научно-исследовательский институт урановой геологии (CNNC), Пекин, Китай, e-mail: zhongjun@briug.cn

Месторождения урана, связанные с щелочным метасоматозом, представляют собой важный тип урановых рудопроявлений с крупными запасами и низким содержанием урана. Они подразделяются на подтипы с натриевым и калиевым метасоматозом. Согласно классификации МЭА и МАГАТЭ (2020), это четвёртый по значимости тип из пятнадцати основных типов урановых месторождений, обладающий высоким экономическим и научным потенциалом (Cuney, 2009). Характерной особенностью данных месторождений является их склонность к образованию рудных скоплений (кластеров), формирующих крупные и гигантские урановые рудные районы — например, Центрально-Украинская урановая провинция (>300 тыс. т U_3O_8 при 0,05–0,20% U_3O_8, Cuney et al., 2012), район Маунт-Иса в Австралии (>50 тыс. т U_3O_8 при 0,06–0,07% U_3O_8, Wilde, 2020), Лагоа-Реал в Бразилии (>100 тыс. т U_3O_8, Lobato et al., 1990), Центральный минеральный пояс Канады (>50 тыс. т U_3O_8, Wilde, 2020) и др.

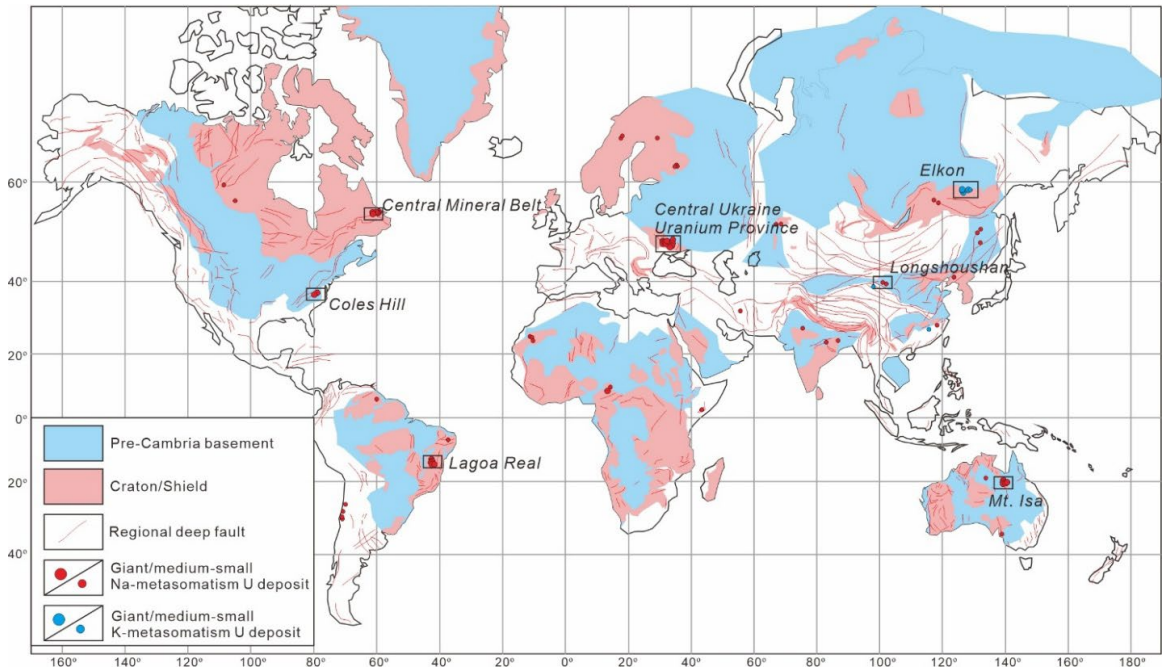


Рис. 1. Упрощённая карта распространения основных урановых месторождений, связанных с щелочным метасоматозом

В таблице 1 приведён перечень репрезентативных месторождений данного типа, а основные геологические и геохимические особенности и закономерности рудообразования можно сформулировать следующим образом:

Урановые месторождения щелочного метасоматозного типа характеризуются низким содержанием урана, но значительными запасами (более 940 тыс. т U). Среднее содержание

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

урана сопоставимо с месторождениями песчаникового типа (0,04–0,3% U), уступая месторождениям несогласного типа, но превосходя IOCG и интрузивные типы.

Данный тип месторождений выявлен как в пределах устойчивых кратонов и щитов, так и в орогенных поясах. При этом в последних сосредоточено большинство известных объектов. За исключением районов Маунт-Иса и Колс-Хилл, все крупные и сверхкрупные месторождения развиты в стабильных кратонных структурах.

Таблица 1. Репрезентативные месторождения урана, связанные с щелочным метасоматозом, в мире

No.	Ore field/district	Deposit	Subtype	Resources (t U)	Average grade (% U)	Data source
1	Central Ukraine Uranium Province	Novokonstantinovske	Na-metasomatism	93 630	0.14	Cuney et al., 2012
2		Centralnye		61 271	0.10	
3		Michurinske		29 760	0.10	
4		Severinske		68 400	0.10	
5		Vatutinske		25 500	0.14	
6		Pervomayske		10 200	0.12	
7		Zheltorechenske		14 000	0.12	
8	Lagoa Real	Engehno	Na-metasomatism	23 235		Wilde, 2020
9		Cachoeira		17 208	0.30	
10		Modesto		12 186		
11	Mountain Isa	Valhalla	Na-metasomatism	29 353	0.07	Wilde et al., 2013
12		Skal		8 398	0.06	
13		Odin		6 780	0.05	
14		Bikini		5 239	0.05	
15	Elkon	Druzhnoye	K-metasomatism	95 840	0.13	Dahlkamp, 2009
16		Elkon		40 263	0.18	
17		Elkonskoye Plateau		62 400	0.16	
18		Neprokhodimoye		42 760	0.12	
19		Kurung		54 850	0.15	
20		Severnoye		61 526	0.15	
21	Central Mineral belt	Michelin	Na-metasomatism	35 478	0.10	Wilde, 2020
22		Jacques Lake		8 629	0.06	
23		Inda		2 542	0.07	
24	Coles Hill	Coles Hill North	Na-metasomatism	31 728	0.04	Hall et al., 2022
25		Coles Hill South		31 154	0.05	
26	Espinharas	Espinharas	Na-metasomatism	4 240	0.1	Dahlkamp, 2010
27	Kitongo	Kitongo	Na-metasomatism	11 130	0.09	Kouske et al., 2022
28	Bohemia	Rozna	Na-metasomatism	22 983	0.24	Wilde, 2020
29		Zadni-Chodov		4 151	0.20	
30	Cerro Carmen	Prospecto Cerro Carmen	Na-metasomatism	29 000		Wilde, 2020

Без исключения, все такие месторождения располагаются в пределах ореолов щелочного метасоматического изменения и пространственно приурочены к глубинным региональным разломам (рис. 1). Эти разломы одновременно контролируют как размещение магматических тел, так и урановую минерализацию, претерпевая неоднократные тектонические активизации. Примеры: субмеридиональные разломы в Центральной Украине (Cuney et al., 2012), разлом Малугоу в Луншоушане, Северо-Западный Китай (Zhong et al., 2020).

Возраст минерализации варьирует от палеопротерозоя до кайнозоя, но доминируют палеопротерозойские (1,90–1,50 млрд лет) месторождения, приуроченные к этапам аккреции и распада суперконтинента Родиния. К ним относятся Центрально-Украинская урановая провинция, Центральный минеральный пояс Канады, район Маунт-Иса. Другой значимый этап — неопротерозой–палеозой (600–500 млн лет), на который приходится образование Колс-

Хилл и Лагоа-Реал. Мезозой представлен районом Элкон в России (135–130 млн лет, Dahlkamp, 2009). Для этих месторождений характерен временной разрыв между возрастом вмещающих пород и минерализацией — типичная особенность гидротермальных урановых систем.

Минеральные ассоциации развиваются в три этапа: – стадия щелочного метасоматоза: формирование альбита, реже — щелочных мафитовых минералов (рибекит, эгирин), гематитовая альтерация; – основная стадия урановой минерализации: образование уранинита, браннерита, сопутствующих гидротермальных фосфатов (апатит, циркон); – стадия карбонатной минерализации: незначительные количества сульфидов, урановых минералов, слабое развитие кварца. Диагностическим признаком служит широкое развитие гидротермального циркона, апатита, а также формирование титансодержащих минералов (браннерит, анатаз, титанит), что согласуется с обогащением руд Ti, Zr, P и РЗЭ.

Вопрос о генезисе рудообразующих флюидов остаётся дискуссионным. Предлагаются магматический, метеогенный, осадочный бассейновый и смешанный источники. Некоторые исследователи указывают на возможный вклад мантийных флюидов (Li et al., 2020). Транспорт урана, предположительно, осуществляется преимущественно в форме уранилкарбонатных комплексов, но также возможна важная роль уранилфосфатных форм (Hall et al., 2022). Осаждение урана обусловлено понижением температуры, выделением CO_2 и окислительно-восстановительными реакциями.

Подводя итог, можно сказать, что урановое месторождение щелочного метасоматоза - это, по сути, классификация, основанная на диагностическом изменении, а не на генетическом типе. На основании вышеизложенных особенностей предполагается, что урановое месторождение щелочного типа метасоматоза в основном является гидротермальным урановым месторождением, тесно связанным с орогенным процессом. Другими словами, это продукт региональных коллизионных и экстенсиональных тектонических событий с относительно уникальными геологическими особенностями.

1. Cuney M. The extreme diversity of uranium deposits. Mineralium Deposita, 2009(44): 3-9.
2. Cuney M., Emetz A., Mercadier J., et al. Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints. Ore Geology Reviews, 2012(44): 82-106.
3. Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world: Asia. Chapter 10 Russian Federation, Asian Territory. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2009: 372-386.
4. Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world: Europe: Chapter 19 Ukraine. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2016: 619-671.
5. Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world: USA and Latin America. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 1-536.
6. Hall S., Beard J.S., Potter C.J., et al. The Coles Hill uranium deposit, Virginia, USA: Geology, geochemistry, geochronology, and genetic model. Economic Geology, 2022, 117(2): 273-304.
7. Kouske A.P., Gerard M., Etame J., et al. Paragenesis, mineral chemical and microtextural studies of uranium bearing minerals in the brecciated albitites U-ores from the Kitongo shear zone, Poli region, northern Cameroon. International Journal of Earth Sciences, 2022, https://doi.org/10.1007/s00531-022-02186-1.
8. Lobato L.M., Fyfe W. Metamorphism, metasomatism, and mineralization at Lagoa Real, Bahia, Brazil. Economic Geology, 1990, 85: 968-989.
9. Nuclear Energy Agency (NEA), International Atomic Energy Agency (IAEA). Uranium 2020: Resources, production and demand: NEA No. 7551. Vienna: NEA, OECD, 2020.
10. Wilde A. Shear-hosted uranium deposits: A Review. Minerals, 2020, 10, 954. doi:10.3390/min10110954.
11. Wilde A., Otto A., Jory J., et al. Geology and mineralogy of uranium deposits from Mount Isa, Australia: Implications for albitite uranium deposit models. Minerals, 2013(3): 258-283.

12. Zhong J., Wang S.Y., Gu D.Z., et al. Geology and fluid geochemistry of the Na-metasomatism U deposits in the Longshoushan uranium metallogenic belt, NW China: Constraints on the ore-forming process. Ore Geology Reviews, 2020, 116, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103214.

The Latest Regional Mineralization for Sandstone Type Uranium Deposits in Central Asia: Constrained by the U-Ra Equilibrium Coefficients

Zhu Bin[1,2], He Feng[1,2], Liu Chiheng[1,2]
[1] CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Techniques, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029, e-mail: zhubin@briug.cn; [2] National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote sensing, Beijing, 100029, e-mail: zhubin@briug.cn

Uranium mineralization of sandstone type uranium deposits often exhibits multi-stages. In addition, different from the silicate minerals such as zircon and apatite, uranium minerals have low closure temperatures which means U and Pb are easier to migration. Therefore, uranium mineralization dating has always been a difficult issue in the study of sandstone type uranium deposits. (Luo et al., 2019).

Recently, in China, uranium exploration has discovered industrial uranium ore bodies in young strata, such as the Neogene and even the Quaternary (e.g., Zhang et al., 2025), indicating the existence of very young uranium mineralization. How to accurately determine the ages of such young uranium mineralization is urgent to be solved.

Radioactive disequilibrium in naturally occurring decay series is a powerful isotopic tool with applications in both terrestrial and marine environments over timescales of up to one million years (Ivanovich, 1994), and has been used in dating the young ages of surficial uranium deposits (Levinson et al., 1984).

Actually, the nature of uranium-radium equilibrium coefficient (Kp) can be seen as the radioactive disequilibrium between ^{238}U and ^{234}U. Therefore, Kp is a function of time from the formation of uranium ore until uranium radium reaches secular equilibrium. Then, under certain conditions, the uranium-radium equilibrium coefficient can be used to accurately calculate the age of uranium mineralization. Here we established a functional relationship between Kp and the age of uranium mineralization. For convenience, Table 1 provides partial Kps and their corresponding uranium mineralization ages.

Table 1. Relationship between Kps and the ages of uranium mineralization

Kp	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.99
t/10^4 a	3.75	7.9	12.65	18.1	24.55	32.45	42.65	57.0	81.6	164.5

The uranium-radium equilibrium coefficients (Kp=0.69, n=62) (Fig. 1) of uranium ores from the Cretaceous sandstones in the Zhenyuan area, southern of the Ordos basin was used to calculate the uranium mineralization age of 0.362 Ma, which is completely consistent with the U-Pb isochron age of whole rocks (0.38 ± 0.02 Ma) (Fig. 2 and Table 2), verifying the validity of this method.

Table 2. U-Pb isotopic composition of samples from the sandstone uranium deposit in Zhenyuan area, south of the Ordos Basin

Sample No.	**Lithology**	**U(μg/g)**	**Pb(μg/g)**	**$^{238}U/^{204}Pb$**	**$^{206}Pb/^{204}Pb$**	**$^{207}Pb/^{204}Pb$**	**$^{208}Pb/^{204}Pb$**
ZKH10-88	Greyish green sandstone	145	5.61	1692.683	19.241	15.846	39.517
ZKH10-90	Greyish green sandstone	53.3	6.03	578.743	19.156	15.830	39.793
ZKH10-107	Greyish green sandstone	32.4	6.56	322.098	19.154	15.817	39.515
ZKH10-110	Greyish green sandstone	333	6.81	3202.953	19.330	15.845	39.491
ZKH10-112	Greyish green sandstone	89.3	4.90	1190.378	19.145	15.825	39.563
ZKH10-113	Greyish green sandstone	348	5.85	3888.09	19.254	15.832	39.479
ZKH10-114	Greyish green sandstone	587	4.05	9526.019	19.677	15.868	39.558
ZKH10-115	Greyish green sandstone	884	4.11	14177.733	19.919	15.886	39.522
ZKH10-116	Greyish green sandstone	1248	4.10	20176.133	20.315	15.929	39.503
ZKH10-117	Greyish green sandstone	1539	4.86	21175.748	20.370	15.950	40.140

The young age of uranium mineralization of the Xinzhuang deposit in the southern Ordos basin indicates that the duration of uranium mineralization is much shorter than what we thought before. Uranium mineralization can be completed less than 1 Ma.

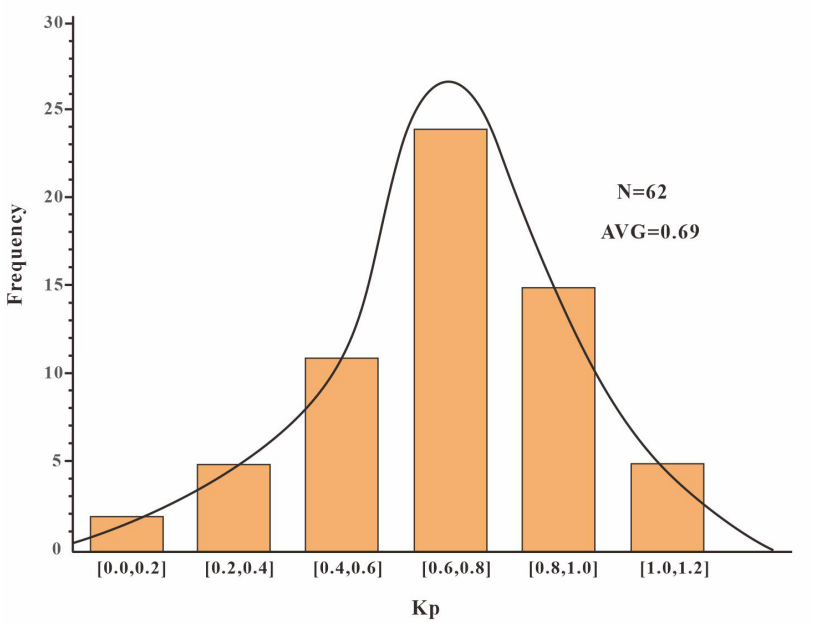


Fig. 1. Histogram of uranium radium equilibrium coefficient of uranium ores from the Xinzhuang uranium deposit, Ordos basin, China

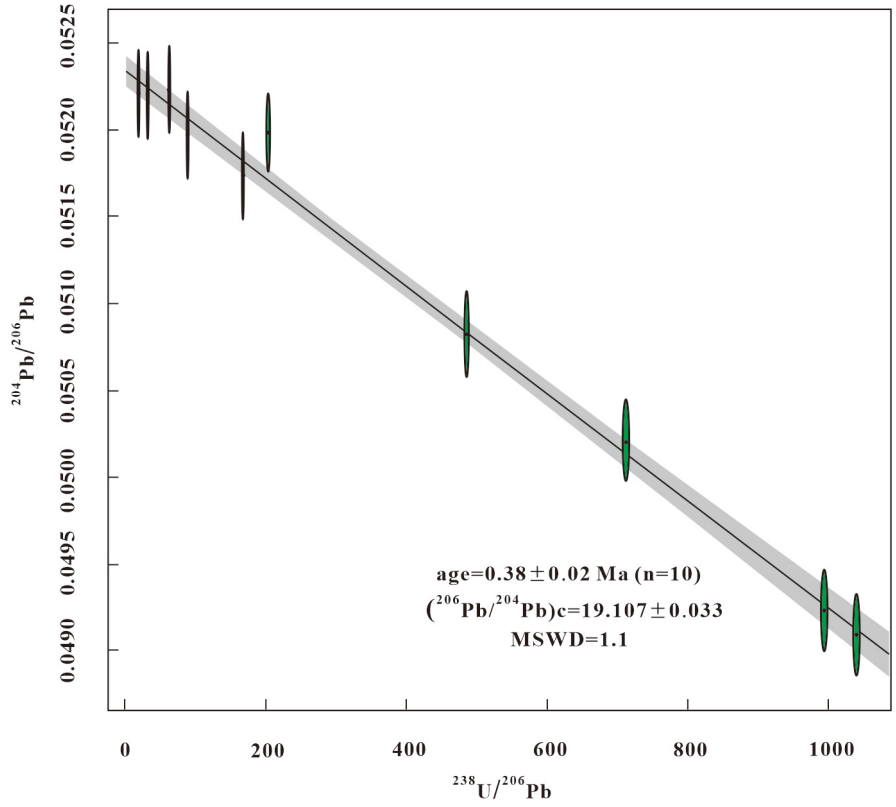


Fig. 2 U-Pb isochron diagram of mineralized samples from the Xinzhaung uranium deposit in Zhenyuan area, Ordos basin, China

Many sandstone type uranium deposits in the world have reported uranium mineralization ages younger than 2.5 Ma (since the Quaternary period). For the reasons of the poor closure of sandstone

type uranium deposits, multi-stage uranium mineralization, and the difficulty of constraining young uranium mineralization events using whole rock U-Pb dating, these young ages are often considered to be caused by lead loss and are therefore not taken seriously compared to early uranium mineralization ages. The new method we proposed here by using the Kp to constrain uranium mineralization provides a new approach for reexamining these young ages.

As a radioactive mineral, uranium ore is usually indirectly determined for its uranium content using gamma geophysical logging methods during exploration. Therefore, a large number of samples need to be analyzed for Kp to calibrate uranium resources. This provides a big data base for using Kp to constrain the uranium mineralization ages.

We summarized the Kps of a mount of sandstone type uranium deposits in the Central Asia uranium metallogenic belt, which shows that their Kps are almost less than 1, such as the Suglare super large scale sandstone type uranium deposit (Kp: 0.50~0.80) in the central Kizilekum metallogenic area of Uzbekistan, the Kendik Qiubi large scale sandstone type uranium deposit (Kp:0.40~0.83), the Kizil Keli uranium deposit and the Moon uranium deposit (Kp: 0.60~0.80) in the Chusaresu basin of Kazakhstan, the No. 511 sandstone type uranium deposit (Kp: 0.84) in the Yili basin, the Dingshan uranium deposit in the Junggar Basin (Kp: 0.60), Shihongtan deposit in Tuha Basin (Kp: 0.81), Dongsheng uranium deposit in the Ordos basin (Kp: 0.70), and Qianjiadian deposit in Songliao basin of China (Kp: 0.66~0.77). The peak of the Kps of these sandstone uranium deposits is between 0.50 and 0.80, corresponding to uranium mineralization ages between 0.25 and 0.57 Ma. Therefore, a regional sandstone type uranium mineralization in central Asia has been recognized.

Interestingly, this period is well consistent with the mid Pleistocene climate warming period in China and Central Asia (0.6~0.3 Ma). During this period, the paleoclimate of central Asia was warm and humid, making it the longest and warmest period of high temperatures in Quaternary history (also known as the Great Ice Age). The average annual temperature at that time was 4~7 ℃ higher than that of today. The famous S5 ancient soil layer formed in the northwest region, and the famous warm temperate Zhoukoudian fauna lived in the north and northeast China. Under humid and hot climate conditions, chemical weathering is enhanced, which contributes to the leaching of uranium from rocks in the erosion area. At the same time, with an increase in rainfall, a large amount of surface water is injected into the strata, which facilitates the migration of uranium and oxygen containing water and promotes the formation of sandstone type uranium deposits.

The study was financed by the Open Fund Project of the National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing (No. NKLUR-2024-YB-005).

1. Levinson, A.A.; Bland, C.J.; Dean, J.R. Uranium series disequilibrium in young surficial uranium deposits in southern British Columbia. Can. J. Earth Sci. 1984, 21, 559-566.
2. Luo Jincheng, Shi Shaohua, Chen Youwei, Tian Jianji. 2019. Review on dating of uranium mineralization. Acta Petrologica Sinica, 35(2): 589-605 (in Chinese with English abstract).
3. Zhang Xiliang, Cai Yuqi, Zhao Xingqi, He Feng. 2025. Metallogenic conditions and prospecting indications of sandstone-type Uranium deposits in the western margin of Qaidam basin. Uranium Geology, 41(1): 29-43 (in Chinese with English abstract).

*Новейший этап региональной минерализации урановых месторождений песчаникового типа в Центральной Азии: по данным коэффициента равновесия U–Ra

Чжу Бинь[1,2], Хэ Фэн[1,2], Лю Чжихэн[1,2]
[1]Лаборатория по методикам поисков и оценки урановых ресурсов CNNC, Пекинский институт урановой геологии, Пекин, 100029, Китай, e-mail: zhubin@briug.cn; [2]Национальная лаборатория по поиску и добыче урановых ресурсов и ядерному дистанционному зондированию, Пекин, 100029, Китай, e-mail: zhubin@briug.cn

Урановая минерализация в месторождениях песчаникового типа нередко носит многостадийный характер. В отличие от силикатных минералов, таких как циркон и апатит, урановые минералы обладают низкой температурой закрытия, что обуславливает подвижность U и Pb. В связи с этим датировка урановой минерализации остаётся одной из наиболее сложных задач при изучении месторождений песчаникового типа (Luo et al., 2019).

В последние годы в Китае были обнаружены промышленные урановые залежи в молодых отложениях, включая неоген и даже четвертичный период (например, Zhang et al., 2025), что свидетельствует о существовании очень молодой урановой минерализации. Однако точное определение возраста такой минерализации остаётся нерешённой задачей.

Явление радиогенного нарушения равновесия в естественных распадных рядах представляет собой мощный изотопный инструмент, применимый для датировок в интервале до миллиона лет (Ivanovich, 1994), и уже использовался для определения возраста приповерхностных урановых руд (Levinson et al., 1984).

Коэффициент равновесия уран–радий (Kp) отражает отклонение от радиогенного равновесия между ^{238}U и ^{234}U, и является функцией времени, прошедшего с момента образования руды до достижения секулярного равновесия. При определённых условиях Kp можно использовать для расчёта возраста урановой минерализации. В рамках настоящей работы была установлена функциональная зависимость между Kp и возрастом рудообразования. В таблице 1 приведены выборочные значения Kp и соответствующие им возрастные оценки:

Таблица 1. Зависимость между коэффициентом равновесия U–Ra (Kp) и возрастом урановой минерализации

Kp	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.99
t/10^4 a	3.75	7.9	12.65	18.1	24.55	32.45	42.65	57.0	81.6	164.5

Для песчаниковых урановых руд меловых отложений в районе Чжэньюань (юг бассейна Ордос) было определено значение Kp=0.69 (n=62) (рис. 1), что соответствует возрасту урановой минерализации 0.362 млн лет. Эта оценка полностью согласуется с возрастом по изохроне U–Pb для целых пород (0.38 ± 0.02 млн лет) (рис. 2, табл. 2), подтверждая достоверность предлагаемого метода.

Таблица 2. Изотопный состав по системе U–Pb в урановых песчаниках района Чжэньюань, юг бассейна Ордос

Sample No.	**Lithology**	**U(μg/g)**	**Pb(μg/g)**	**$^{238}U/^{204}Pb$**	**$^{206}Pb/^{204}Pb$**	**$^{207}Pb/^{204}Pb$**	**$^{208}Pb/^{204}Pb$**
ZKH10-88	Greyish green sandstone	145	5.61	1692.683	19.241	15.846	39.517
ZKH10-90	Greyish green sandstone	53.3	6.03	578.743	19.156	15.830	39.793
ZKH10-107	Greyish green sandstone	32.4	6.56	322.098	19.154	15.817	39.515
ZKH10-110	Greyish green sandstone	333	6.81	3202.953	19.330	15.845	39.491

*Перевод выполнен с использованием нейронной сети / Translation was done using a neural network

ZKH10-112	Greyish green sandstone	89.3	4.90	1190.378	19.145	15.825	39.563
ZKH10-113	Greyish green sandstone	348	5.85	3888.09	19.254	15.832	39.479
ZKH10-114	Greyish green sandstone	587	4.05	9526.019	19.677	15.868	39.558
ZKH10-115	Greyish green sandstone	884	4.11	14177.733	19.919	15.886	39.522
ZKH10-116	Greyish green sandstone	1248	4.10	20176.133	20.315	15.929	39.503
ZKH10-117	Greyish green sandstone	1539	4.86	21175.748	20.370	15.950	40.140

Возраст урановой минерализации месторождения Синчжуан (южный Ордос) указывает на гораздо более короткую продолжительность рудообразования, чем предполагалось ранее — менее 1 млн лет.

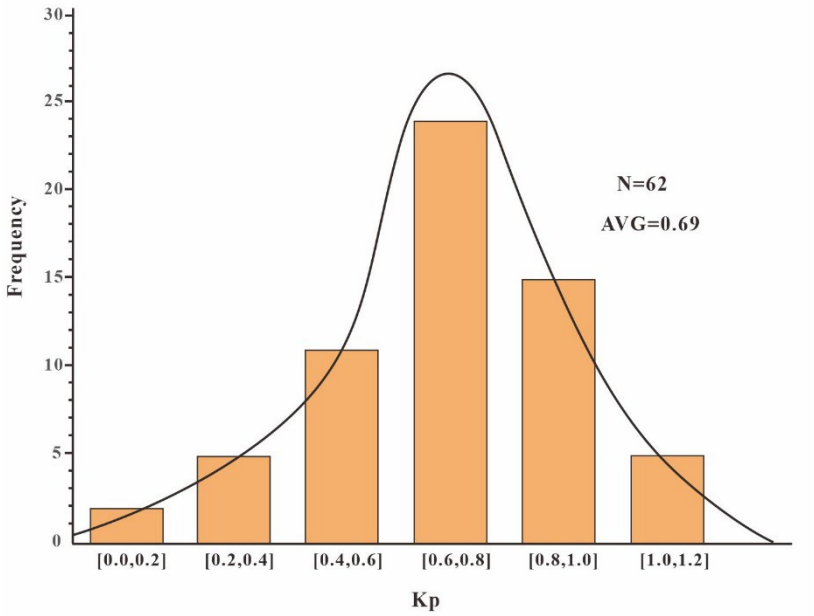


Рис. 1. Гистограмма распределения коэффициента равновесия U–Ra для руд месторождения Синчжуан, бассейн Ордос, Китай

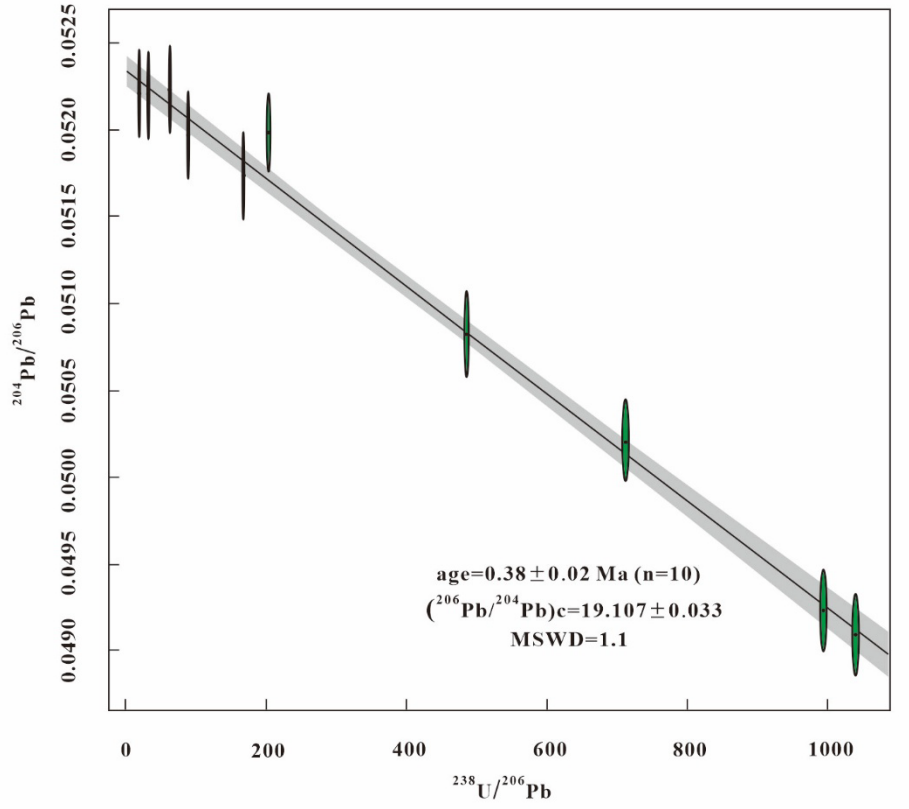


Рис. 2. Изохронная диаграмма U–Pb для образцов урановой минерализации из района Чжэньюань, бассейн Ордос

Многие месторождения песчаникового типа в мире демонстрируют возраст урановой минерализации менее 2,5 млн лет (с четвертичного периода). Однако вследствие низкой температуры закрытия, многостадийности рудообразования и сложностей при датировке целых пород методом U–Pb, эти молодые возраста часто интерпретируются как результат потери свинца и игнорируются по сравнению с более древними стадиями минерализации. Метод, основанный на использовании Kp, позволяет по-новому взглянуть на эти молодые события уранового рудообразования.

Поскольку при поисках урана его содержание в руде обычно определяется косвенно — методом гамма-каротажа, для калибровки урановых ресурсов требуется анализ большого числа образцов на Kp, что формирует обширную базу данных для определения возраста минерализации.

Авторы обобщили данные по Kp для ряда урановых месторождений песчаникового типа Центральноазиатского рудного пояса. Значения Kp в большинстве случаев <1:Сугларе (сверхкрупное, Узбекистан, Кызылкум): Kp 0.50–0.80Кендик Цюбэ (крупное): Kp 0.40–0.83Кызыл Кели и Мун (Чусаресу, Казахстан): Kp 0.60–0.80Месторождение №511 (бассейн Или): Kp 0.84Диншань (Джунгарский бассейн): Kp 0.60Шихунтань (бассейн Ту-хэ): Kp 0.81Дуншэн (бассейн Ордос): Kp 0.70–Цяньцзядянь (бассейн Сунляо): Kp 0.66–0.77

Пик распределения Kp для этих месторождений приходится на интервал 0.50–0.80, что соответствует возрастам урановой минерализации от 0.25 до 0.57 млн лет. Таким образом, установлен новейший этап регионального уранового рудообразования песчаникового типа в Центральной Азии.

Интересно, что этот временной интервал соответствует климатическому потеплению в среднем плейстоцене (0.6–0.3 млн лет), которое считается самым тёплым и влажным периодом четвертичного времени в Центральной Азии и Китае. Среднегодовая температура тогда превышала современную на 4–7 °C. В этот период формировался известный палеопочвенный горизонт S5 на северо-западе Китая, а в северных регионах обитала тёплолюбивая фауна (например, Чжоукоудянь). Увеличение химического выветривания и инфильтрации кислородсодержащих вод способствовало выщелачиванию урана и его миграции, что благоприятствовало формированию урановых месторождений песчаникового типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда открытого проекта Национальной ключевой лаборатории по поиску и добыче урановых ресурсов и ядерному дистанционному зондированию (№ NKLUR-2024-YB-005).

1. Levinson, A.A.; Bland, C.J.; Dean, J.R. Uranium series disequilibrium in young surficial uranium deposits in southern British Columbia. Can. J. Earth Sci. 1984, 21, 559–566.
2. Luo Jincheng, Shi Shaohua, Chen Youwei, Tian Jianji. 2019. Review on dating of uranium mineralization. Acta Petrologica Sinica, 35(2): 589–605 (in Chinese with English abstract).
3. Zhang Xiliang, Cai Yuqi, Zhao Xingqi, He Feng. 2025. Metallogenic conditions and prospecting indications of sandstone-type Uranium deposits in the western margin of Qaidam basin. Uranium Geology, 41(1): 29–43 (in Chinese with English abstract).

Научное электронное издание

Коллектив авторов

МЕТАЛЛОГЕНИЯ БЕЗ ГРАНИЦ 2025: Российско-Китайская конференция, Чита, 11 – 17 августа 2025 г. Тезисы докладов [Электронный ресурс] – Электрон. дан. (1 файл: 29,7 Мб) – М.: ИГЕМ РАН, 2025.



Подписано к использованию: 04.08.2025
Объём издания 29,7 Мб. Заказ №. 25-1э. Тираж 300 экз.

ISBN 978-5-88918-080-7

Гарнитура Times New Roman

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук
(ИГЕМ РАН)
119017, Москва,
Старомонетный пер., 35