

# **МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН  
(ГЕОХИ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ РАН)

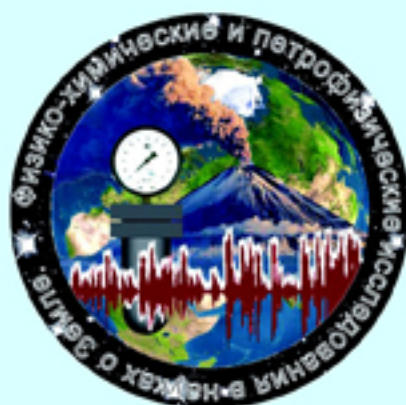
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

Петрофизическая комиссия Межведомственного  
Петрографического комитета при Отделении Наук о Земле РАН

## **ДВАДЦАТЬ ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ**

Москва, 29 сентября - 1 октября, Борок, 3 октября 2025 г.

### **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**



2025

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН  
(ГЕОХИ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта (ИФЗ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

Петрофизическая комиссия Межведомственного  
Петрографического комитета при Отделении Наук о Земле РАН

**ДВАДЦАТЬ ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ**

Москва, 29 сентября – 1 октября, Борок, 3 октября 2025 г.

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Москва  
2025

УДК 550.3:550.4:550.8:552:11  
ББК26.0  
Ф50

Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать шестая международная конференция. Москва, 29 сентября – 1 октября, Борок, 3 октября 2025 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2025. – 272 с.

ISBN 978-5-88918-081-4 / ISSN 2686-8938

Представлены материалы докладов, оглашенных на заседаниях тематических секций:

Физико-химические свойства пород и расплавов при высоких давлениях и температурах;  
Современные методы экспериментальных исследований;  
Петрофизика и ее роль в интерпретации геофизических данных и поиске месторождений полезных ископаемых;  
Региональные геолого-геофизические, петрофизические и геоэкологические исследования, исследования в целях освоения Арктики;  
Петролого-геофизические подходы построения моделей состава и строения планетарных тел и космохимия;  
Петрофизические и геодинамические исследования в интересах экологии.

Главный редактор д.т.н. А.В.Жариков

Зам. главного редактора:  
д.г.-м.н. И.А.Чижова,  
к.г.-м.н. В.А.Минаев

**ISBN 978-5-88918-081-4**  
**ISSN 2686-8938**

© ИГЕМ РАН, 2025

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytic Chemistry of RAS  
Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS  
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy  
and Geochemistry of RAS  
Petrophysical Commission of Petrographical Committee of RAS

**THE TWENTY-SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE**  
**PHYSICAL-CHEMICAL AND PETROPHYSICAL RESEARCHES**  
**IN THE EARTH'S SCIENCES**

Moscow, September 29 – October 1, Borok, October 3, 2025

**PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE**

Moscow  
2025



УДК 550.3:550.4:550.8:552:11  
ББК26.0  
Ф50

Physical-chemical and petrophysical researches in the Earth's sciences.  
The twenty-sixth international conference. Moscow, September 29 –  
October 1, Borok, October 3, 2025. Proceedings of the conference. M.:  
IGEM RAS, 2025. - 272 p.

ISBN 978-5-88918-081-4 / ISSN 2686-8938

The book contains the proceedings of the reports presented at the  
thematic sessions of the conference:

Physical-chemical properties of rocks and melts under high  
pressures and temperatures;  
Modern techniques of experimental studies;  
Petrophysics and its role in interpretation of geophysical data and  
prospecting of mineral deposits;  
Regional geological-geophysical, petrophysical and geoecological  
studies, research for the Arctic exploration;  
Petrological-geophysical approaches to modelling of the  
composition and structure of planetary objects and cosmochemistry;  
Petrophysical and geodynamic studies for ecology.

Editor-in-chief Dr.Sci. A.V.Zharikov

Deputy Editor-in-chief:  
Dr.Sci. I.A.Chizhova,  
Ph.D. V.A.Minaev

**ISBN 978-5-88918-081-4**  
**ISSN 2686-8938**

© ИГЕМ РАН, 2025

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ И ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

### *Председатели комитета*

Анисимов Сергей Васильевич (ГО Борок ИФЗ РАН)

Баюк Ирина Олеговна (ИФЗ РАН)

Дорофеева Вера Алексеевна (ГЕОХИ РАН)

Жариков Андрей Виленович (ИГЕМ РАН)

Персиков Эдуард Сергеевич (ИЭМ РАН)

### *Ученый секретарь*

Кронрод Екатерина Викторовна (ГЕОХИ РАН)

### *Члены комитета*

Белобородов Денис Евгеньевич (ИФЗ РАН)

Дмитриев Эльдар Михайлович (ГО Борок, ИФЗ РАН)

Краснова Мария Александровна (ИФЗ РАН)

Кронрод Виктор Александрович (ГЕОХИ РАН)

Кусков Олег Львович (ГЕОХИ РАН)

Ладыгин Владимир Михайлович (МГУ)

Лобанов Константин Валентинович (ИГЕМ РАН)

Минаев Василий Александрович (ИГЕМ РАН)

Михайлова Алла Владимировна (ГЕОХИ РАН)

Редькин Александр Федорович (ИЭМ РАН)

Чижова Ирина Александровна (ИГЕМ РАН)

Цельмович Владимир Анатольевич (ГО Борок, ИФЗ РАН)

## О конференции

Первая Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» состоялась в 1997 г. В период с 1997 по 2004 г. конференции проводились раз в два года, а с 2005 г. стали ежегодными. Конференции организуют четыре института Российской академии наук: ГЕОХИ, ИФЗ, ИГЕМ, ИЭМ и Петрофизическая комиссия Петрографического комитета РАН. Заседания секций конференции проходят в Москве: в ГЕОХИ, ИФЗ и ИГЕМ РАН. Начиная с 2008 г., выездные сессии проходят в Геофизической лаборатории «Борок» ИФЗ РАН (п. Борок, Ярославская обл.). Более подробную информацию о предыдущих конференциях: участниках, организациях, которые они представляли, тематике оглашенных докладов, состоявшихся дискуссиях и принятых решениях можно найти в «Хрониках ...», которые регулярно выходят в журнале Геохимия.

### Тематика конференции

Физико-химические свойства пород и расплавов при высоких давлениях и температурах

Современные методы экспериментальных исследований

Петрофизика и ее роль в интерпретации геофизических данных и поиске месторождений полезных ископаемых

Региональные геолого-геофизические, петрофизические и геоэкологические исследования, исследования в целях освоения Арктики

Петролого-геофизические подходы построения моделей состава и строения планетарных тел и космохимия

Петрофизические и геодинамические исследования в интересах экологии

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>Анчугов А.В., Тарасенко К.Л. АНАЛИЗ<br/>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА СООТВЕТСТВИЕ<br/>ЗАКОНУ ОМОРИ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ КЕРНА ГОРНОЙ ПОРОДЫ<br/>ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ: ОТ<br/>ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ К СЕЙСМИЧЕСКИМ<br/>ЗАКОНОМЕРНОСТЯМ</b>  | 13 |
| <b>Баренбаум А.А., Шиловский А.П. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В<br/>ГЕОЛОГИИ</b>   | 17 |
| <b>Белобородов Д.Е., Пономарев А.В., Багдасарян Т.Э.,<br/>Баяк И.О. ВЗАМОСВЯЗЬ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ С<br/>ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД</b>  | 21 |
| <b>Белякова А.Ю., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В.<br/>Ti, Nb, Fe, V, Mn, Ba-СОДЕРЖАЩЕЕ КАРБЕНИЗИРОВАННОЕ<br/>ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ПОРОДАХ ТОМТОРСКОГО<br/>МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ):<br/>ОСОБЕННОСТИ И ГИПОТЕЗЫ ОБРАЗОВАНИЯ</b> | 23 |
| <b>Бреннан Е., Савов И.П., Агостини С., Чурикова Т.Г.,<br/>Гордейчик Б.Н., Муравьев Я.Д., Морган Д.Дж., Ивесон А.А.,<br/>Хамфрис М. ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД КОЗЕЛЬСКОГО ВУЛКАНА</b>   | 26 |
| <b>Гарагаш И.А., Славина Л.Б., Кучай М.С. ИЗМЕНЕНИЕ<br/>ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАМЧАТКИ НА<br/>СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С МАГНИТУДОЙ<br/>M8.8 29 ИЮЛЯ 2025 г.</b>   | 30 |
| <b>Голубев Ф.В. ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ РАСТЕНИЙ<br/>РОДА CLADOSCHAEIA DC НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ С ЦЕЛЬЮ<br/>ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ<br/>ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b>  | 33 |
| <b>Гордейчик Б.Н., Чурикова Т.Г., Муравьев Я.Д., Кронц А.,<br/>Вёрнер Г. ВРЕМЕНА ФОРМИРОВАНИЯ FO-NI<br/>НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОЛИВИНАХ АВАЧИНСКОГО<br/>ВУЛКАНА</b>   | 37 |
| <b>Гореликова Н.В., Чижова И.А., Раткин В.В. КАССИТЕРИТ КАК<br/>ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ<br/>ФОРМИРОВАНИЯ ОЛОВОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ</b>   | 41 |
| <b>Градов О.В., Елфимов А.Б., Марнаутов Н.А.<br/>НЕЙРОСЕТЕВАЯ СЕДИМЕНТОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ<br/>АЛГОРИТМОВ УГЛОВОГО ВРАЩЕНИЯ</b>   | 45 |
| <b>Градов О.В., Маклакова И.А., Сергеев А.И.<br/>ВРЕМЯРАЗРЕШЕННАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ<br/>МИКРОСКОПИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ САЛЬТАЦИЙ ПЕСКА</b>  | 50 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Григорян А.Г., Канониди К.Х. КАК ОТРАЖАЕТСЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <math>M \geq 5</math> НА ВАРИАЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ <math>\delta T</math></b>   | 55  |
| <b>Гуляев П.А., Николенко П.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ</b>  | 60  |
| <b>Гусев А.В., Мен Чжиго ЛАВОВЫЕ ПЕЩЕРЫ НА ЛУНЕ</b>  | 64  |
| <b>Девятова В.Н., Некрасов А.Н., Воронин М.В., Дрожжина Н.А., Щербаков В.Д., Симакин А.Г. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕГИДРАТАЦИИ КАЛЬЦИЕВОГО АМФИБОЛА ПРИ <math>T=900-1150^{\circ}\text{C}</math> И ДАВЛЕНИИ <math>P_{\text{H}_2\text{O}}</math> ДО 300 БАР</b> | 68  |
| <b>Дьяур Н.И., Пономарев А.В. О ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ГОРНЫХ ПОРОД В ЭКСПЕРИМЕНТАХ</b>  | 72  |
| <b>Ильченко В.Л., Каулина Т.В., Нерович Л.И., Песков Д.А. ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД МАССИВА ЯРВА-ВАРАКА И ВМЕЩАЮЩИХ ГРАНИТОИДОВ (МОНЧЕГОСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА) – К ВОПРОСУ ОБ ИМПАКТНОМ ПРОИСХОЖДЕНИИ МАССИВА</b>                         | 76  |
| <b>Индаков Г.С., Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Шарычев И.В. ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД, СОДЕРЖАЩИХ ЗЕРНА РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ</b>   | 80  |
| <b>Казакова (Русак) А.А., Алферьева Я.О., Щекина Т.И. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛАХ</b>  | 84  |
| <b>Казначеев П.А., Подымова Н.Б., Индаков Г.С., Майбук З.-Ю.Я., Шарычев И.В., Пономарев А.В. АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД</b>  | 88  |
| <b>Кочанов А.Н. СТРУКТУРА ТРЕЩИНЫ В ГРАНИТЕ И ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ</b>   | 92  |
| <b>Кошлякова А.Н., Шишкина Т.А., Лоренц К.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ УЛЬТРАКАЛИЕВЫХ РАСПЛАВОВ НА ПРИМЕРЕ ЛАМПРОИТОВ ВУЛКАНА ГАУССБЕРГ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)</b>   | 96  |
| <b>Краснова М.А., Белобородов Д.Е. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД</b>   | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Краюшкин Д.В., Казначеев П.А., Мигунов И.В., Индаков Г.С., Строганова С.М., Патонин А.В., Закржевская Н.А., Пономарев А.В. ПОДХОДЫ К АГРЕГИРОВАНИЮ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ</b>        | 102 |
| <b>Кузнецова К.И., Хозяинов М.С. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СКОРОСТЯМ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫХ ПРОСЛОЕВ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ИНДИКАТОРНЫМ (ТРАССЕРНЫМ) МЕТОДОМ</b>   | 106 |
| <b>Кузьмина Т.Г., Хохлова И.В., Ромашова Т.В., Тронева М.А. ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ</b>  | 110 |
| <b>Левшунова С.П., Карташов А.А., Роот Д.В., Иванова С.Р. ВЛИЯНИЕ ГЛУБИННЫХ ФЛЮИДОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ НЕФТЕЙ В ЖЕСТКИХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ГЛУБИН ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ</b>   | 113 |
| <b>Лобанов К.В., Чичеров М.В., Горностаева Т.А., Жиров Д.В., Мохов А.В., Карташов П.М., Прокофьев В.Ю. ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОНЫ РУДОНОСНОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА В РАЗРЕЗЕ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ</b> | 117 |
| <b>Луканин О.А., Жаркова Е.В. РЕДОКС СОСТОЯНИЕ АЛМАЗОНОСНЫХ ЭКЛОГИТОВЫХ КСЕНОЛИТОВ В КИМБЕРЛИТАХ КРАТОНА КАССАИ (ЗАПАДНАЯ АФРИКА) ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОБСТВЕННОЙ ЛЕТУЧЕСТИ КИСЛОРОДА ГРАНАТОВ И КЛИНОПИРОКСЕНОВ</b>     | 121 |
| <b>Мальковский В.И., Жариков А.В. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЗАДЕРЖКА РАДИОКОЛЛОИДА ПОРОДАМИ УЧАСТКА ЕНИСЕЙСКИЙ НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА, КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ</b>   | 128 |
| <b>Мальковский В.И., Пэк А.А., Петров В.А. ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ РУДОНОСНЫМИ ФЛЮИДАМИ НА УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА ПРИ НАЛИЧИИ РАЗЛОМОВ В ПОРОДАХ ФУНДАМЕНТА</b>  | 132 |
| <b>Мальковский В.И., Юдинцев С.В. ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА БЕЗОПАСНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГРУППЕ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН</b>   | 136 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Мельников Ф.П., Боева Н.М., Макарова М.А., Шипилова Е.С., Внучков Д.А. КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕГИДРОКСИЛИЗАЦИИ ГИББСИТА В БОКСИТАХ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА</b>  | 140 |
| <b>Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О. РАЗЛОМНАЯ ТЕКТОНИКА И РУДООБРАЗОВАНИЕ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ ОБЛАСТИ: АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b>                 | 144 |
| <b>Муравина О.М., Сотников А.А. КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА</b>  | 148 |
| <b>Патонин А.В., Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Шихова Н.М. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ: АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА</b>  | 152 |
| <b>Пащенко Р.А., Смирнов В.Б., Шихова Н.М., Патонин А.В., Пономарев А.В., Строганова С.М. ОЦЕНКА ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗРУШЕНИЯ</b>                | 156 |
| <b>Пилипенко О.В., Азаров Е.С. ПРОБЛЕМЫ ПЕТРО- И АРХЕОМАГНЕТИЗМА НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМИКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ПАМЯТНИКА ГРИШИНСКИЙ ИСТОК III</b>  | 158 |
| <b>Пономарев А.В., Казначеев П.А., Патонин А.В., Шихова Н.М., Смирнов В.Б., Краюшкин Д.В. ФРАГМЕНТИРОВАНИЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ В МОДЕЛИ РАЗЛОМА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ НОРМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ</b>   | 161 |
| <b>Пономарева Т.А. ИЗУЧЕНИЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД НЕРКАЮСКОГО КОМПЛЕКСА (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ): ПЕТРОФИЗИКА, ПЕТРОГРАФИЯ И ГЕОФИЗИКА</b>   | 165 |
| <b>Потанина М.Г., Петрушов А.А., Смирнов В.Б., Патонин А.В., Пономарев А.В., Строганова С.М., Шихова Н.М. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ В ЦИКЛАХ НАГРУЗКИ-РАЗГРУЗКИ ОБРАЗЦОВ ГРАНИТА И ПЕСЧАНИКА</b> | 170 |
| <b>Редькин А.Ф., Котова Н.П., Некрасов А.Н., Дрожжина Н.А. ВЛИЯНИЕ <math>T</math>-<math>P</math>-<math>fO_2</math> НА СТРУКТУРУ ОКСИФТОРИДНЫХ ФАЗ НИОБИЯ И НАТРИЯ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРАХ</b>                              | 174 |
| <b>Родкин М.В., Стром А.Л., Цельмович В.А. ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА МАКРО- И МИКРОУРОВНЯХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КАМЕННЫХ ЛАВИН</b>  | 177 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Романько А.Е., Малых М.М., Минаев В.Е.,<br/>Имамвердиев Н.А., Криночкина О.К., Новиков В.П.,<br/>Викентьев И.В., Савичев А.Т., Полещук А.В., Хейдари М.</b><br>ОБЗОР МАГМАТИЗМА, РУДООБРАЗОВАНИЯ, ТЕКТониКИ<br>ОТДЕЛЬНЫХ ЗОН ПАМИРА: НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ<br>СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА | 181 |
| <b>Салюков В.С., Вознесенский А.С.</b> ВНУТРЕННИЕ<br>МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В<br>НИЗКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ВОЗДЕЙСТВИЙ   | 185 |
| <b>Сафронов А.Н.</b> К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ АЛМАЗОВ,<br>ВОДЫ, ПРИРОДНОГО ГАЗА И НЕФТИ  | 188 |
| <b>Симакин А.Г., Девятова В.Н., Ширяев А.А.</b> ПРОДУВКА<br>РИОЛИТОВОЙ МАГМЫ СО <sub>2</sub> В НАЧАЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ –<br>СХОЛАСТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?  | 191 |
| <b>Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Макеев А.Б., Терехов Е.Н.</b><br>U-Рb ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА АНДРАДИТА<br>КОРКОДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)   | 194 |
| <b>Суетнова Е.И.</b> НАКОПЛЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СКОПЛЕНИЙ<br>ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ЗОНАХ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА В<br>МОРСКОМ ДНЕ  | 198 |
| <b>Турьшев В.В.</b> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИТОФАЦИЙ ОТЛОЖЕНИЙ<br>ВЕРХНЕ-КОЛИКЪЕГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА<br>ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ГАММА-МЕТОДА   | 201 |
| <b>Уланова А.С., Кроль И.М., Комаров В.Б., Стефановская О.И.,<br/>Никольский М.С.</b> ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ<br>СТЕКОЛ С ИМИТАТОРАМИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ<br>ОТРАБОТАВШЕНО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА   | 205 |
| <b>Федькин В.В.</b> СУБДУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ<br>МАКСЮТОВСКОГО ЭКЛОГИТ-ГЛАУКОФАНСЛАНЦЕВОГО<br>КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)  | 209 |
| <b>Франишку Т., Вознесенский А.С.</b> РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД<br>ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ<br>КОЭФИЦИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ГОРНЫХ<br>ПОРОДАХ  | 215 |
| <b>Фролова Ю.В.</b> ИЗМЕНЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ<br>ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД НА ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЯХ ЮЖНОЙ<br>КАМЧАТКИ  | 219 |
| <b>Хаустов А.П., Редина М.М.</b> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ<br>АКТИВНОСТЬ ПОЛИАРЕНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ<br>КОМПОНЕНТОВ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ<br>(ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ)   | 224 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Цельмович В.А., Камышов А.Н. АРХЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ГИПОТЕЗЫ ИЗНАЧАЛЬНО ГИДРИДНОЙ ЗЕМЛИ</b>   | 228 |
| <b>Цельмович В.А., Кузина Д.М., Муфтахетдинова Р.Ф., Яковлев Г.А., Ежов В.Ф., Четвериков Ю.О., Булат С.А. МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ АНТАРКТИДЫ, СОБРАННОГО МАГНИТНОЙ ЛОВУШКОЙ</b> | 232 |
| <b>Чижова И.А., Петроченков Д.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В КАССИТЕРИТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АПОСКАРНОВОГО-ОЛОВЯННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЗРАЧНОСТЬ И ЦВЕТ КРИСТАЛЛОВ</b>  | 236 |
| <b>Чижова И.А., Петроченков Д.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В КАССИТЕРИТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОЛОВО-СИЛИКАТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЦВЕТ КРИСТАЛЛОВ</b>                        | 240 |
| <b>Чирков Е.Б. НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b>   | 244 |
| <b>Шихова Н.М., Патонин А.В., Фокин И.В. СВЯЗЬ МЕЖДУ РЕЖИМОМ НАГРУЖЕНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ</b>  | 248 |
| <b>Шорников С.И. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ <math>\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2</math></b>  | 252 |
| <b>Шорников С.И., Голяпа Е.С. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ <math>\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2</math></b>  | 256 |
| <b>Шорников С. И., Яковлев О.И. РАСХОЖДЕНИЯ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА В <i>РТ</i>-УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ <math>\text{CaIs}</math></b>  | 260 |
| <b>Шорников С.И., Яковлев О.И. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРТОСИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ</b>   | 264 |
| <b>Якушина О.А., Хозяинов М.С. МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ (МИКРО)ТОМОГРАФИИ В ПРАКТИКЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД</b>   | 268 |

# АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА СООТВЕТСТВИЕ ЗАКОНУ ОМОРИ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ КЕРНА ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ: ОТ ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ К СЕЙСМИЧЕСКИМ ЗАКОНОМЕРНОСТЯМ

<sup>1,2</sup>**Анчугов А.В.**, <sup>3</sup>**Тарасенко К.Л.**

<sup>1</sup>ИНГГ СОРАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>ООО Ситен Технологии, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>АО Геологика, г. Новосибирск, Россия

[alexey.anchugov@gmail.com](mailto:alexey.anchugov@gmail.com); [ktarassenko@gmail.com](mailto:ktarassenko@gmail.com)

Рассмотрено выполнение закона Омори для экспериментальных данных записей акустической эмиссии, полученных в 2-канальном режиме при одноосном нагружении до разрушения 55 образцов керна различной литологии. Сравниваются два варианта обработки данных, по результатам которой определяется время первых вступлений сигналов акустической эмиссии: с применением алгоритма Байера-Крадольфера - для автоматического выделения времени первого вступления и пороговым алгоритмом. Выполнен анализ временного ряда микрособытий. Эксперимент поставлен без нагрева, при комнатной температуре. Для регистрации ультразвуковых волн используется пьезоэлектрический преобразователь.

Как правило, регистрация сигналов акустической эмиссии на образцах керна горной породы при проведении в лаборатории различных экспериментов делается в многоканальном режиме. Применяются специализированные системы сбора данных, со множеством датчиков, размещаемых на манжете (до 18), в которую помещается образец. Известны системы иностранного производства, такие как MTS (гидравлический пресс с 3-осной ячейкой нагружения, установленный в Сколково), где объем получаемых данных даже в ходе одного нагружения образца до разрушения может достигать десятков гигабайт и больше, существуют и отечественные многоканальные измерительные системы, используемые к примеру в Институте физики Земли, с помощью которых проводятся информативные подобные эксперименты. На протяжении последних десятилетий регулярно проводятся эксперименты по лабораторному моделированию процессов разрушения применительно к сейсмическому режиму, а акустическая эмиссия, наблюдаемая на образцах, рассматривается как модель естественной сейсмичности. [Смирнов и др. 2019].

Несмотря на это, для проведения экспериментов по нагружению образцов до разрушения и сбора данных акустической

эмиссии на установке для проведения геомеханических экспериментов можно использовать и простую двухканальную измерительную систему, когда активные датчики, которыми уже оборудована установка (с излучающей и приёмной продольно поляризованными пьезопластинами) переводятся в режим регистрации и подключаются ко входам двухканального усилителя сигналов. Какие задачи можно решать с помощью лишь двухканальной системы регистрации?

Эксперимент по исследованию эффекта Кайзера проводится на более чем 50 образцах керна различной литологии размером 60х30 мм в одноосном режиме нагружения до разрушения. При этом используется гидравлически управляемый пресс и плиты нагружения (акустические плунжера) с установленными внутри пьезопластинами с резонансной частотой 1 МГц. Скорость осевого нагружения составляет 60 МПа/мин, без обжимного давления. При этом ячейка стабилметра оборудована датчиками продольной и поперечной деформации образца и датчиком усилия на оси. Интервал записи данных о текущей деформации образца и его нагруженном состоянии составляет одну секунду.

Цель задуманного Калининым С.А. с коллегами эксперимента состоял в изучении эффекта Кайзера [Lavrov, 2003; Калинин, 2018]. Для этого были специально подготовлены ориентированные образцы керна и собрана измерительная система для регистрации сигналов акустической эмиссии в двухканальном режиме, состоящая из датчиков, непосредственно контактирующих с образцом (они же передают нагрузку на образец), двухканального усилителя сигнала на 40 Дб, и регистратора Аурис В-320 с управляющим компьютером и проведены необходимые эксперименты. Запись данных на компьютер проводится с помощью специально разработанного М. Романютой программного обеспечения.

Частота дискретизации составляет 1 МГц, разрешение 10 бит, что обеспечило непрерывный режим регистрации на имеющемся в наличии оборудовании, при этом все эксперименты заканчиваются разрушением образца в течение первых минут. Описание и результаты экспериментов по исследованию эффекта Кайзера представлены в публикации [Цветков и др. 2022]. Здесь же рассматривается другой аспект: полученные данные анализируются с точки зрения сейсмологии, считая, что момент разрушения образца это основное сейсмическое событие, а все сигналы акустической эмиссии, которые следуют после, — это афтершоки основного события, и выполняется ли фундаментальный закон Омори для полученных в результате экспериментов данных. Таким

образом, **цель**, которая поставлена, - исследовать временную динамику АЭ до/после макроразрушения и её соответствие закону Омори.

Исследовано 55 образцов различной литологии. Получены данные акустической эмиссии для 46 образцов в 2-канальном режиме. Для всех исследованных образцов выделено время каждого события, их максимальные амплитуды, а также отмечен момент разрушения образца.

Из анализа временных рядов данных следует что:

- Закон Омори применим к лабораторным данным с поправкой на условия эксперимента, записанным в 2-канальном режиме.

- Аналогии и различия в параметрах  $p$ ,  $c$  между результатами, полученными при лабораторном эксперименте и природными сейсмическими явлениями, связаны с разными масштабами времени и энергии. В то же время прослеживается общность механизмов разрушения в разных масштабах. Одноосное нагружение образцов при простом эксперименте позволяет моделировать природные явления.

- Закон Омори можно использовать для прогноза устойчивости пород.

- Экспериментально подтверждена зависимость параметров  $p$ ,  $c$  от типа породы, скорости нагружения, уровня напряжения.

- Образец имеет конечный размер, и не все события из одного канала также регистрируются в другом канале. Количество зарегистрированных в различных каналах событий значительно различается. Это, а также то, что при проведении экспериментов не используется обжимное давление и не исследуется влияние температуры и насыщенности флюидами образцов горной породы, а эти факторы окажут влияние на поведение образца под нагрузкой, следует учитывать при планировании последующих исследований.

### **Литература**

1. Анчугов. А.В. Применение алгоритма Бэра - Крадольфера для автоматического выделения первого вступления отраженной ультразвуковой волны, возбуждаемой излучателем и регистрируемой от границы вода-нефть в сепараторе. // Сейсмические приборы. - 2023. - Т. 59. № 43. - С. 5–17.
2. Гульельми А. В. Закон Омори (из истории геофизики) // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 3. – С. 343–348.
3. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Станциц С.А., Потанина М.Г., Патонин А.В., Dresen G., Narteau C., Bernard P., Строганова С.М. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и

- Гутенберга–Рихтера от напряжений // Физика Земли. 2019. № 1. С. 149–165
4. Смирнов В.Б., Карцева Т.И., Пономарев А.В., Патонин А.В., Bernard P., Михайлов В.О., Потанина М.Г. О взаимосвязи параметров Омори и Гутенберга–Рихтера в афтершоковых последовательностях // Физика Земли. 2020. № 5. С. 3–22.
  5. Цветков С.С., Колесников Ю.И., Жарасбаева Д.К. Эффект Кайзера в осадочных горных породах на примере отложений Вертолётной площади Томской области. // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 2. № 2. - Новосибирск: - С. 196–201.
  6. Baer M., and Kradolfer U. (1987). An automatic phase picker for local and teleseismic events. Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1437-1445.
  7. Hirano R. Investigation of aftershocks of the great Kanto earthquake at Kumagaya // Kishoshushi. Ser. 2. 1924. V. 2. P. 77–83.
  8. Lavrov A., 2003. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 40, Issue 2, pp. 151-171.
  9. Omori FJ. College Sci. Imperial Univ. Tokyo 7 111 (1894)

#### ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA FOR COMPLIANCE WITH OMORI LAW FOR CORE SAMPLES OF ROCK UNDER UNIAXIAL LOADING TO DESTRUCTION: FROM LABORATORY DATA TO SEISMIC REGULARITIES

<sup>1,2</sup>**Anchugov A.V.**, <sup>3</sup>**Tarassenki K.L.**

<sup>1</sup>IPGG SBRAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>SciTen Technologies, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Geologika, Novosibirsk, Russia

[alexey.anchugov@gmail.com](mailto:alexey.anchugov@gmail.com); [ktarassenko@gmail.com](mailto:ktarassenko@gmail.com)

The article discusses the implementation of Omori's law for experimental data of acoustic emission records obtained in 2-channel mode with uniaxial loading before destruction of 55 core samples of various lithology. Two variants of data processing are compared, according to the results of which the time of the first arrivals of acoustic emission signals is determined: using the Bayer-Kradolfer algorithm - for automatic allocation of the time of the first arrival and the threshold algorithm. Microevent time series was analyzed. The experiment was performed without heating, at room temperature. A piezoelectric transducer is used to detect ultrasonic waves.

## КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГЕОЛОГИИ

**Баренбаум А.А., Шиловский А.П.**

Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), Москва

[azary@mail.ru](mailto:azary@mail.ru), [shilovsky@ipng.ru](mailto:shilovsky@ipng.ru)

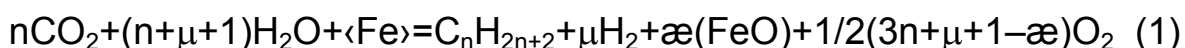
**Введение:** Считается, что прямые квантовые явления на уровне атомов и элементарных частиц непосредственно не проявляются в геологических процессах на макроскопическом уровне (Wikipedia).

У нас иное мнение. Приводим три примера квантовых явлений в современных геологических процессах. Это: 1) механизм геосинтеза углеводородов (УВ); 2) систематические взрывы метана в угольных шахтах и 3) макроскопические флуктуации природных процессов, обнаруженные С.Э. Шнолем.

**1. Механизм геосинтеза.** Так мы называем [Закиров и др., 2013] квантовый механизм образования УВ, играющий ключевую роль в современном пополнении месторождений нефти и газа [Баренбаум, 2024]. В основе этого механизма лежит [Научное открытие №362], заключающееся в том, что под воздействием сейсмотектонических процессов, даже таком слабом, как приливное притяжение Солнца и Луны, в минералах пород возникают внутрикристаллические дефекты (разорванные химические связи), которые диффундируют к границе кристаллов, где создают слой радикалов, снижающий энергию Гиббса химических реакций на величину  $\approx 40-80$  кДж/моль и более [Молчанов, 1981; Черский и др., 1985; Царев, 1988].

В результате реакции, термодинамически возможные лишь при высокой температуре и давлении, на поверхности активированных пород происходят в стандартных условиях ( $T = 25^\circ\text{C}$  и  $P = 1$  атм).

Примером таких реакций служит реакция геосинтеза « $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ». Для  $n$ -алканов ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ) ее можно записать как [Баренбаум, 2024]:



где:  $n$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$  – стехиометрические коэффициенты, а значком  $\langle\text{Fe}\rangle$  обозначены механохимические свойства среды.

Реакция (1) является основной при современном образовании УВ нефти и газа в 40 летнем цикле круговорота углерода и воды через земную поверхность. В этой реакции синтезируется широкий спектр алифатических УВ газа и нефти. Донором углерода в них служит любое вещество, содержащее окисленный углерод (органика (COH),  $\text{CO}_2$  и карбонаты), а донором водорода в них является  $\text{H}_2\text{O}$ .

Другим примером геосинтеза является реакция « $\text{C} + \text{H}_2\text{O}$ »:



В «стандартных» условиях эта реакция термодинамически идти не может, но на активированной поверхности сколов угля при его

шахтной добыче она не только интенсивно происходит, но и может носить взрывной характер [Баренбаум, Шиловский, 2024].

**2. Образование метана и его взрывы в шахтах.** Хотя взрывы метана в угольных шахтах изучают и пытаются устранить более 150 лет, источник метана в углях и механизм его взрыва, пока не поняты [Грицко, 2012]. Отметим две трудности их объяснения.

**Первая трудность** заключается в том, что в момент взрыва атмосфера шахт содержит газ двух разных генезисов: «угольный» и «глубинный», отличающихся составом и взрывными свойствами. «Угольный» газ почти всецело состоит из метана, а «глубинный» наряду с  $\text{CH}_4$  содержит его гомологи ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  и  $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), жидкие УВ, а также  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и редкие газы (He, Ra и др.).

Источники «угольного» и «глубинного» газов пока еще не имеют общепринятого объяснения [Грицко, 2012; Ашурков, Евдокимов, 2022]. Наиболее вероятной причиной взрыва метана в шахтах эти авторы считают внезапное поступление в шахту «глубинного» газа, который смешивается с «угольным» газом, что и приводит к детонации возникшей газовой смеси.

**Вторую трудность** мы связываем с тем, что в Кузбассе, как и других угольных бассейнах мира, наблюдается ритмика взрывов в шахтах, причем сразу в нескольких шахтах, которая совпадает с полупериодом солнечной активности. На частоту взрывов влияет и Луна. Более частые взрывы в шахтах происходят в новолуния и полнолуния, когда Земля находится на одной линии между Солнцем и Луной [Ашурков, Евдокимов, 2022].

Очевидно, что «космический» фактор также требует объяснения, поскольку влияет на безопасность работы в шахтах.

Что касается первой трудности, в работе [Баренбаум, Шиловский, 2024] на основе биосферной концепции [Баренбаум, 2024] показано, что «глубинный» и «угольный» газ являются продуктами геосинтеза УВ при геохимическом круговороте углерода и воды через земную поверхность. При этом «глубинный» метан – результат образования УВ из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в реакции геосинтеза (1), а «угольный» метан – в реакции (2).

В работе [Баренбаум, Шиловский, 2024] мы обратили внимание также на то, что в результате природных сейсмических процессов и при шахтной добыче угля, в его массиве образуются заполненные водой микротрещины и каналы, а в периоды работы шахтеров еще в больших количествах образуются частицы угольной пыли. При этом на поверхности тех и других обязательно возникает слой радикалов, способный при определенных обстоятельствах придать реакции (2) взрывной характер.

Обратимся теперь к объяснению «космического» фактора.



**3. Феномен макроскопических флуктуаций.** Влияние космоса на квантовые явления было открыто С.Э. Шнолем [Шноль, 2008, Юдович, Кетрис, 2023], первым установившим их связь с вращением Земли. Изучая эти явления в биологии, химии, при радиоактивном распаде химических элементов, в электромагнитном и нейтронном поле Земли, а также в разных электронных устройствах, он обратил внимание, что все они подвержены неслучайным макроскопическим флуктуациям (МФ). При этом спектры МФ разных квантовых явлений одинаково меняются с периодами суточного вращения Земли, мод основных месячных колебаний Луны при ее вращении вокруг Земли, а также годичного обращения Земли вокруг Солнца.

Анализируя результаты экспериментов С.Э. Шноля, а также Н.А. Козырева [Козырев, 1991], получен вывод [Баренбаум, 2024а], что эти эксперименты доказывают мгновенность действия тяготения Ньютона на материальные тела при всех расстояниях между ними. Носителями силы и энергии гравитационного взаимодействия тел являются гравитоны, представляющие собой виртуальные бозоны. Величина энергии гравитонов составляет  $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$  эВ, поэтому на квантовом уровне они могут взаимодействовать исключительно с объектами микромира [Barenbaum, 2024, 2025].

Так как при вращении Земли изменения силы тяготения Солнца, Луны и других объектов космоса малы, а их влияние на микромир квантовое и его реализуют гравитоны, то на основании материалов этой статьи можем заключить, что квантовые явления обязательно проявляются на макроскопическом уровне в процессах геологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ашурков В., Евдокимов И., 2022. Первопричина взрывов // Уголь Кузбасса, 2022.05. <http://www.uk42.ru/index.php?id=16312>
2. Баренбаум А.А. Биосферная концепция и современное нефтегазообразование // Смирновский сборник – 2024. М.: МАКС ПРЕСС, 2024, 160-180.
3. Баренбаум А.А.а О механизме гравитационного притяжения ньютона и физической природе гравитации // Основания фундаментальной физики и математики. Матер. VIII Российской конференции (ОФФМ-2024). М.: РУДН. 2024. 154-159.
4. Баренбаум А.А., Шиловский А.П. Метан в угольных шахтах: образование и причина его взрывов. // Физические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать пятая международная конференция посвященная 300-летию Российской академии наук. Москва. 30 сентября-2 октября 2024. Материалы конференции. М. ИГЕМ РАН. 2024.- 312 с. С. 14-17.



5. Грицко Г. И. Внезапные выбросы в шахтах // Наука Сибири, №32-33, 2867-2868, 23.08.2012.
6. Закиров С.Н., Закиров Э.С., Баренбаум А.А., Климов Д.С., Лысенко А.Д., Серебряков В.А. Геосинтез в проблеме происхождения нефти и газа // Труды VIII Межд. технол. симп. М.: Институт нефтегазового бизнеса. 2013. С. 43-46.
7. Козырев Н.А. Избранные труды. Ленинград. Ленинградский университет. 1991. С. 363-383.
8. Молчанов В.И. Генерация водорода в литогенезе. Новосибирск: Наука. 1981, 142 с.
9. Научное открытие №362: Явление преобразования органического вещества осадочных пород под действием тектонических и сейсмических процессов земной коры. Авторы: Трофимук, А.А., Черский Н.В., Царев В.П., Сороко Т.И. Приоритет 21.04.1982.
10. Царев В.П. Особенности нефтегазообразования в зонах тектоно-сейсмической активации. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1988, 186 с.
11. Черский Н.В., Царев В.П., Сороко Т.И., Кузнецов О.Л. Влияние тектоно-сейсмических процессов на образование и накопление углеводородов. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
12. Шноль С.Э. Космохимические факторы в случайных процессах. Svenska fysikarkivet. 2009.
13. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Российский ученый Симон Шноль и его герои. Сыктывкар: Коми респуб. типография, 2023, 524 с.
14. Barenbaum A.A. Influence of Sun, Moon and planets on Earth's gravitational field: Discovery of gravitons and estimation their energy // The Fifteenth Moscow Solar System Symposium. IKI RAS, 2024. 15MS3-MN-PS-15. p. 224-226.
15. Barenbaum A.A. Experiments of S. Shnol, the Physical Nature of Gravitation, Hubble's Law and Cosmic Microwave Background Radiation // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment. 2025. 440–459, DOI:10.1007/978-3-031-88459-7\_48

## QUANTUM PHENOMENA IN GEOLOGY

**Barenbaum A.A., Shilovsky A.P.**

Oil and Gas Research Institute (OGRI) RAS, Moscow.

[azary@mail.ru](mailto:azary@mail.ru), [shilovsky@ipng.ru](mailto:shilovsky@ipng.ru)

Examples are given proving that quantum phenomena necessarily manifest themselves at the macroscopic level in geological processes. These examples demonstrate the inseparable connection and mutual influence of physical processes at the macro- and micro-levels.

ВЗАМОСВЯЗЬ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ С  
ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД  
**Белобородов Д.Е., Пономарев А.В., Багдасарян Т.Э., Баяк И.О.**  
Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), Москва  
[beloborodov@ifz.ru](mailto:beloborodov@ifz.ru)

С целью изучения прочностных характеристик песчаников рассмотрены верхнеюрские песчаники Егановского месторождения стекольных песков, их минералогический состав, структурные и текстурные особенности. Егановское месторождение расположено в 17 км. к югу от г. Люберцы и в 10 км. к западу от ж.д. станции Раменское. Группа Раменских месторождений стекольных песков располагается на территории, сложенной неогеновыми, нижнемеловыми, верхнеюрскими и каменноугольными отложениями [Ширшов, 2005].

Физико-механические свойства песчаников характеризуются следующими параметрами: объемный вес от  $2,14 \text{ г/см}^3$  до  $2,57 \text{ г/см}^3$  (в среднем  $2,39 \text{ г/см}^3$ ), удельный вес – от  $2,65 \text{ г/см}^3$  до  $2,66 \text{ г/см}^3$ . Особенностью песчаников является повышенная прочность от 960 до  $1665 \text{ кг/см}^2$  [Горюшкин, Крайнов, 2016].

С помощью сканирующего электронного микроскопа проведено изучение образцов песчаников. Установлено, что состав песчаников преимущественно мономинеральный, кварцевый. Песчаник неравномернозернистый, средне- мелкозернистый. Зерна имеют как ровные так и неровные края, размеры зерен не равномерные. Структура гранобластовая и механоконформная, степень приспособления зерен друг к другу достигает 95-97%. Размер зерен до 0,5 мм. Поры не крупные, в виде промежутков на стыках тройного или более сочленения зерен либо пустот, образовавшихся из-за выкрашивания зерен (Рис.1). При увеличении 50 микрон можно увидеть внутризерновую пористость.

Особенности структуры песчаника определяют аномально высокую прочность этих пород, что проявилось при геомеханических испытаниях этих образцов на сервогидравлической установке ИФЗ РАН. Как видно на рис. 1, минеральные зерна образуют «пазлообразную структуру», тем самым увеличивая способность породы сопротивляться разрушению.

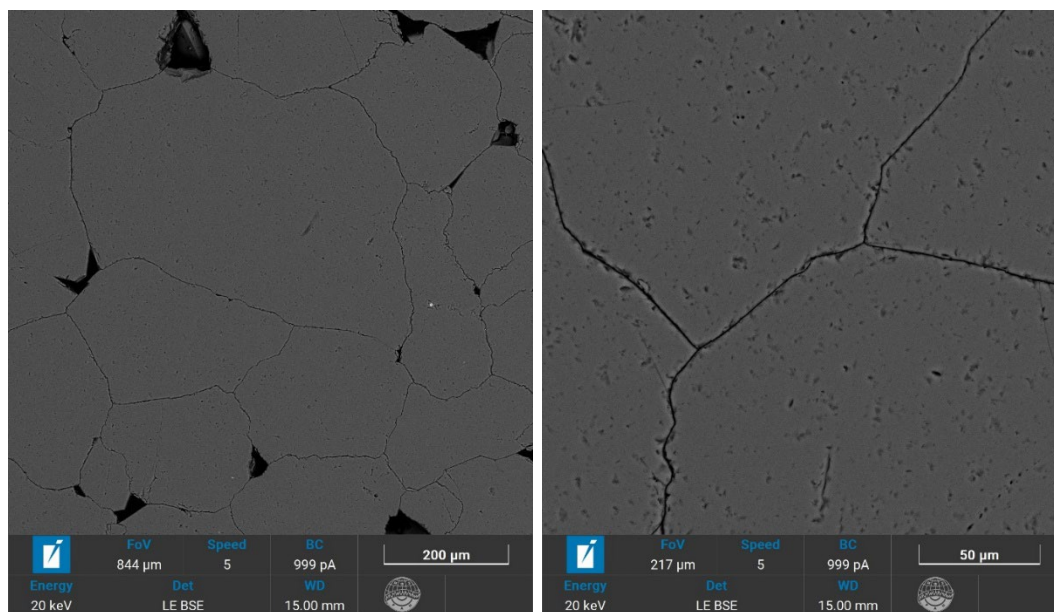


Рис. 1. Гранобластовая структура песчаника.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

### Литература

1. Горюшкин В.В., Крайнов А.В. Песчаники Латненского месторождения // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2016. №1. С. 22-26.
2. Ширшов С.А. Стекольные пески Чулковского месторождения (Московская область) // Вестник Воронежского университета. Геология. 2005. №1. С. 177-193.

### RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL FEATURES AND STRENGTH PROPERTIES OF SEDIMENTARY ROCKS

**Beloborodov D.E., Ponomarev A.V., Bayuk I.O., Bagdasaryan T.E.**

Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow,

[beloborodov@ifz.ru](mailto:beloborodov@ifz.ru)

The physical and mechanical properties of sandstones of the Eganovskoye deposit have been studied. The structural features have been revealed using a scanning electron microscope. The granoblastic structure and high degree of grain adaptation determine the high strength of the sandstones.

TI, Nb, Fe, V, Mn, Ba-СОДЕРЖАЩЕЕ КАРБОНИЗИРОВАННОЕ  
ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ПОРОДАХ ТОМТОРСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ): ОСОБЕННОСТИ И  
ГИПОТЕЗЫ ОБРАЗОВАНИЯ

**Белякова А.Ю., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В.**

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г.  
Новосибирск, [a.belyakova@g.nsu.ru](mailto:a.belyakova@g.nsu.ru)

В настоящее время активно изучаются месторождения редких металлов. В России находится одно из крупнейших месторождений редких и редкоземельных элементов, связанное с Томторским комплексом (ТК) щелочных пород и карбонатитов. В пределах ТК разведаны уникально-богатые Nb-REE руды ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$  – 4.5 мас. %,  $\text{REE}_2\text{O}_3$  – 7–10 мас. %), которые залегают в виде трёх пластовых залежей (участки Буранный, Северный и Южный) в депрессиях на коре выветривания по карбонатитам. Генезис руд является предметом дискуссий [Лазарева и др., 2015]. В богатых рудах (участок Южный, скв. 328/58.3 м) методами сканирующей электронной микроскопии в сочетании с Рамановской спектроскопией были диагностированы 2 типа углефицированного (карбонизированного) органического вещества, различающиеся по набору примесных элементов. Объекты размером 10-100 мкм, главным компонентом которых является углерод, а также присутствуют REE, Th, P (в сумме до 16 мас%) в первом случае и Ti, Nb, Fe, V, Mn, Ba (в сумме до 48 мас%) во втором (далее – тип1 и тип2) [Белякова и др., 2023]. Существует вероятность, что эти объекты являются карбонизированным остатками микробных сообществ, о чем свидетельствуют морфология и состав этих объектов. В рудах Томторского месторождения ранее уже были установлены органические остатки растительного происхождения и описаны структурно-морфологические признаки участия микроорганизмов в формировании руд [Добрецов и др., 2021].

Целями данного исследования было выявить особенности структуры и состава карбонизированного вещества типа 2, предложить механизм накопления металлов этим веществом, сравнить оба типа карбонизированного вещества, обнаруженных в рудах Томторского месторождения, с подобными объектами, описанными в литературе,

В породах Ловозерского и Хибинского массивов Кольского полуострова для поздних ассоциаций пегматитов ранее были описаны твердые битуминозные вещества (ТБВ) с высокими содержаниями металлов [Чуканов и др., 2005]. В гетерогенных агрегатах ТБВ, содержащих REE, Th, Y, Ti, Nb, Mn, описаны структуры распада между ТБВ и многочисленными разнообразными минеральными фазами, содержащими в ряде случаев все перечисленные элементы. В отличие от них, в карбонизированном веществе руд Томторского месторождения элементы накапливались селективно, а распределение отдельных элементов внутри

фрагментов типа 2 равномерное по данным ЭДС. Неоднородность фазового состава выявлена в нм масштабе с помощью ПЭМ и дифракции электронов – зафиксировано 2 фазы.

Тонкослоистые руды Томторского месторождения преимущественно сложены аутигенными минералами группы крандаллита (МГК), монацитом, рабдофаном, анатазом и терригенными рутилом, пирохлором; встречаются сульфиды и каолинит. Карбонизированные органические остатки типа 2 формируют протяженные тонкие слои, разбитые поперечными трещинами, располагающиеся среди слоёв, сложенных МГК, фосфатами REE, в некоторых образцах - анатазом. Главным минералом Ti в породах ТК является рутил, с высоким содержанием Nb, Fe, V, Mn. Аутигенный анатаз содержит первые проценты V и Fe, а также до 10% Nb.

Предположительно, осаждение на органическом веществе кластеров  $TiO_2$  могло привести к кристаллизации агрегатов анатаза. При сорбции из раствора Ti, Nb, Mn и Ba в виде комплексов накопление их органическим веществом происходило равномерно и не привело к образованию отдельной минеральной фазы, причем этот тип сорбции был преобладающим.

Возможно, воздействие органического вещества было одним из факторов мобилизации в раствор компонентов из исходных минералов [Звягинцев, 2005]. Образование металлоорганических комплексов делает элементы гидролизаты подвижными в гипергенных условиях [Юдович, Кертис, 2006].

Таким образом, обнаруженные объекты доказывают подвижность Ti и Nb (часто рассматриваемых как инертные в геохимических процессах) в минералообразующей системе Томторского месторождения. В качестве механизма образования карбонизированного вещества типа 2 предлагается сорбция органическим веществом элементов в виде комплексов и наночастиц, с последующей карбонизацией. Причины селективного накопления элементов двумя типами карбонизированного органического вещества в настоящий момент не выяснены. Предполагаются избирательное концентрирование содержащихся в системе элементов разными типами микробиальных сообществ [Gustafsson, 2019; Ayupova et al., 2017]; сорбция на разных типах органического вещества (живого или нет), отличающихся строением и свойствами поверхностных групп, например, осаждение REE и Th на клеточных стенках колоний микроорганизмов, покрытых фосфатными группами [Hoffmann et al., 2021] – как механизм селективного накопления элементов веществом 1 типа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 23-63-10017.*

### **Литература**

1. Белякова А.Ю., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В. Особенности состава органических остатков в Nb-REE руде участка Южный Томторского месторождения (Арктическая



- Сибирь) // Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований. Москва: ИГЕМ. 2023. С. 21–23.
2. Добрецов Н. Л., Жмодик С. М., Лазарева Е. В. и др. Структурно-морфологические признаки участия микроорганизмов в формировании богатых Nb–REE-руд Томторского месторождения (Россия) // ДАН. 2021. Т. 496. No 2. С. 154–157.
  3. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: Издательство Московского университета. 2005. 445 с.
  4. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и Геофизика. 2015. Т. 56. No 6. С. 1080–1115.
  5. Чуканов Н. В., Ермолаева В. Н., Пеков И. В., Соколов С. В., Некрасов А. Н., Соколова М. Н. Редкометальная минерализация, связанная с битуминозными веществами в поздних ассоциациях пегматитов Хибинского и Ловозёрского массивов // Новые данные о минералах. 2005. Вып. 40. С. 80-95.
  6. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: Наука. 2006. 538 с.
  7. Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Sadykov S.A., Safina N.P., Tessalina S.G., Shilovsky O.P., Statsenko E.O., Hollis S.P., Danyushevsky L.V. Tube fossils from gossanites of the Urals VHMS deposits, Russia: Authigenic mineral assemblages and trace element distributions // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 85. P. 107-130.
  8. Gustafsson J.P. Vanadium geochemistry in the biogeosphere – speciation, solid-solution interactions, and ecotoxicity // Applied Geochemistry. 2019. Vol. 102. P. 1–25.
  9. Hoffmann T. D., Reeksting B. J., Gebhard S. Bacteria-induced mineral precipitation: a mechanistic review // Microbiology. 2021. V. 167. No. 4.

TI, NB, FE, V, MN, BA-CONTAINING CARBONIZED ORGANIC SUBSTANCE IN THE ROCKS OF THE TOMTOR DEPOSIT (ARCTIC SIBERIA): FEATURES AND FORMATION HYPOTHESES

**Belyakova A.Yu., Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Tolstov A.V.**

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk,  
[a.belyakova@g.nsu.ru](mailto:a.belyakova@g.nsu.ru)

Two types of microscopic objects have been found in the rocks and ores of the Tomtor rare metal deposit. The main component of these objects is carbon, and they differ in their selective accumulation of elements: type 1 is rich in REE and Th, while type 2 is rich in Ti, Nb, Fe, V, Ba and Mn. Carbonized substance type 2 sorbed metals, and their distribution was uniform. There are areas where the anatase aggregate is interlayered with carbonized substance. The activity of two types of microbial communities or sorption by different types of organic matter with different structures and properties of surface groups are assumed to be the reasons for the selective accumulation of elements by two types of carbonized matter.

## ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД КОЗЕЛЬСКОГО ВУЛКАНА

<sup>1</sup>Бреннан Е., <sup>1</sup>Савов И.П., <sup>2</sup>Агостини С., <sup>3</sup>Чурикова Т.Г.,  
<sup>3,4</sup>Гордейчик Б.Н., <sup>3</sup>Муравьев Я.Д., <sup>1</sup>Морган Д.Дж., <sup>5</sup>Ивесон А.А.,  
<sup>5</sup>Хамфрис М.

<sup>1</sup>Институт геофизики и тектоники, Факультет Земли и окружающей среды, Университет Лидса, Великобритания, [eeeebr@leeds.ac.uk](mailto:eeeebr@leeds.ac.uk);

<sup>2</sup>Институт наук о Земле и ресурсах Земли, Пиза, Италия;

<sup>3</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский;

<sup>4</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка;

<sup>5</sup>Отделение наук о Земле, Университет Дарема, Великобритания

Представлены новые минералогические, петрологические и геохимические данные (XRF, EMPA, ICP-MS) для базальт-андезитовой серии пород Козельского вулкана. Породы характеризуются повышенными содержаниями MgO (5–15 мас. %), Ni (10–200 ppm) и Cr (60–800 ppm) и повышенными отношениями Ba/Zr и Sr/Y в сравнении со средне-дуговыми лавами.

### **Введение**

Островодужный вулканизм является основным фактором при обмене летучими и флюидно-подвижными элементами между различными резервуарами Земли. Мы используем вариации химического и изотопного состава пород для понимания вклада этих элементов в мантийные источники и их последующего переноса.

Низкие содержания бора при тяжелых значениях его изотопов в породах Авачинского вулкана [Tomanikova et al., 2019; Iveson et al., 2021] поставили задачу дополнительного изучения вулканов Авачинско-Корякской группы. Вулкан Козельский, самый восточный в группе и ближайший к преддуговому желобу, крайне мало изучен. В настоящей работе приводятся новые петрографические, петрологические и геохимические данные для пород и минералов обоих вулканов полученные методами XRF, EMPA, ICP-MS.

### **Район работ и сбор образцов**

Породы стратовулкана Козельский, экструзии и конусы Козлята опробовались в южном и юго-восточном секторах (рис. 1). Породы Авачинского вулкана уже исследовались ранее [Пузанков, 1990; Castellana, 1998], поэтому мы ограничились опробованием высокомагнезиальных конусов, расположенных на сочленении Авачинского и Корякского вулканов (верхнеплейстоценовые конусы Добрыня и Попович и раннеголоценовый конус Страж [Базанова и др., 2014]), а также несколькими оливиносодержащими породами из того же сектора вулкана (рис. 1).

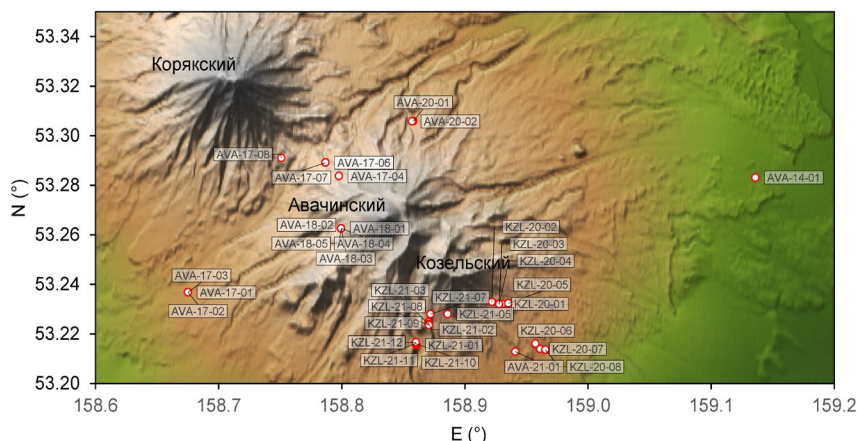


Рис. 1. Образцы вулканов Козельский (KZL) и Авачинский (AVA).

### Описание пород и минералов

Высоко-Mg лавы вулкана Козельский из нижней части постройки представлены порфировыми разностями с содержанием вкрапленников оливина и клинопироксена 20–40 %. Породы верхней части постройки вулкана более эволюционированные, это пироксеновые, пироксен-плагиоклазовые, плагиоклазовые и роговообманковые андезиты. Оливин в них редок и не превышает 5 % объема. Породы конусов – плагиоклазовые (до 30 % Pl), пироксен-плагиоклазовые и субафировые андезибазальты. Породы экструзий – роговообманковые и пироксен-роговообманковые андезиты и дациты, встречаются двупироксеновые и плагиоклазовые андезибазальты и андезиты.

Породы Авачинского вулкана представлены бомбами, шлаками, лавовыми потоками свежих ОI-базальтов. Содержания оливина в породах обычно 5–7 %, а клинопироксена не более 1 %.

Оливины из базальтов Козельского вулкана имеют диапазон по форстериту 65–91. Оливины из высокомагнезиальных конусов Авачинского вулкана варьируют в диапазоне по форстериту 62–87, а в образцах авачитов 73–90.5.

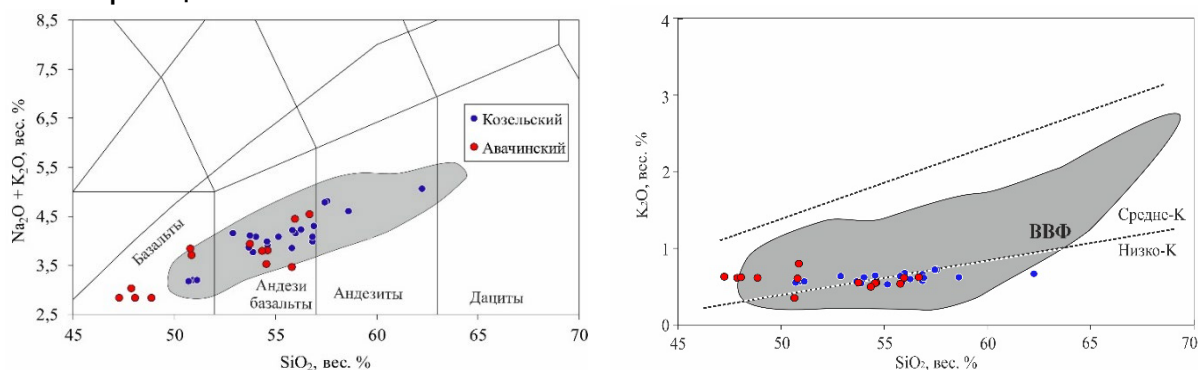


Рис. 2. Сумма щелочей и содержание  $K_2O$  в породах Авачинского и Козельского вулканов в зависимости от кремнезема. Серое поле – составы пород восточного фронта северного пересечения Камчатки.



### Петрохимическая и геохимическая характеристики пород

Породы вулканов Козельский и Авачинский лежат в едином тренде и представлены серией от базальтов до андезидацитов, при этом породы Авачинского вулкана составляют более примитивную часть тренда, а лавы Козельского вулкана – более эволюционированную. Все породы занимают самую низко-К зону среди пород восточного фронта и лежат вблизи классификационной границы между средне-К и низко-К вулканитами (рис. 2).

Все изученные породы лежат в поле базальтов островных дуг (рис. 3а). Хром в породах обоих вулканов формирует единый тренд, варьирующий по хрому при постоянном значении иттрия. Единые тренды характерны для многих геохимических диаграмм, предполагая близкие первичные источники. Диаграмма Ba/Zr (рис. 3б) показывает, что все породы обогащены флюидно-подвижным барием, источник которого может быть представлен как субдукционным флюидом, так и расплавом осадочного материала.

Следует отметить, что исследованные породы обоих вулканов имеют довольно высокие Sr/Y отношения: 13–21 (среднее 16) для Козельского и 14–22 (среднее 18) для Авачинского вулканов.

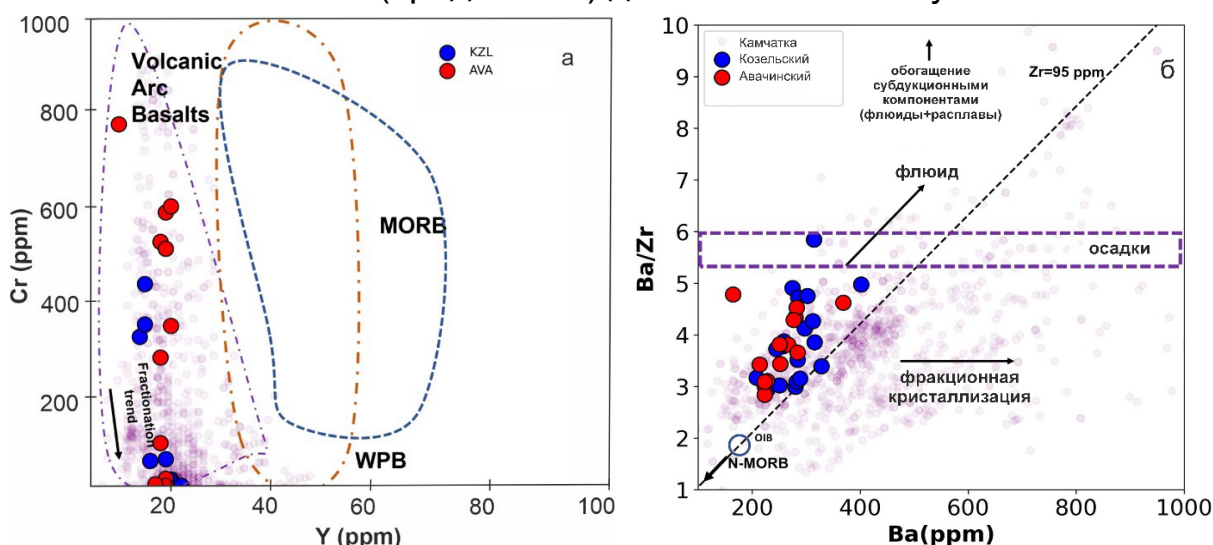


Рис. 3. Графики микроэлементов и их отношений в породах вулканов Авачинский и Козельский. а) Cr в зависимости от Y на диаграмме Пирса [Pearce, 1982]; б) Ba/Zr в зависимости от Ba отражает добавку флюидной компоненты. Бледные кружки – данные для пород Камчатки из базы данных GEOROCK.

*Полевые и лабораторные работы проводились в рамках НИР № FWME-2024-0009, анализ результатов в рамках НИР № FWME-2024-0009 и № FMUF-2022-0004.*

## Литература

1. Базанова Л.И., Пузанков М.Ю., Кулиш Р.В. О возрасте шлаковых конусов на сочленении подножий Авачинского и Корякского вулканов // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 70–71.
2. Пузанков М.Ю. Геохимическая зональность в островной дуге (на примере Авачинского ряда вулканов) / Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки / Отв. Ред. А.П. Кривенко. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1990. С. 114–127. <https://search.rsl.ru/ru/record/01002123232>.
3. Castellana B. Geology, chemostratigraphy, and petrogenesis of the Avachinskiy volcano, Kamchatka, Russia. A dissertation of Doctor of Philosophy in Geology. UMI Number: 9818050. Los Angeles: University of California, 1998.
4. Iveson A., Humphreys M.C., Savov I.P. et al. Deciphering variable mantle sources and hydrous inputs to arc magmas in Kamchatka // Earth and Planetary Science Letters. 2021. V. 562. Art. 1067. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116848>
5. Tomanikova L., Savov I.P., Harvey J. et al. A limited role for metasomatized subarc mantle in the generation of boron isotope signatures of arc volcanic rocks // Geology. 2019. V. 47. Is. 6. P. 517–521. DOI: <https://doi.org/10.1130/G46092.1>

## PETROCHEMISTRY OF THE KOZELSKY VOLCANO ROCKS

<sup>1</sup>Brennan E., <sup>1</sup>Savov I.P., <sup>2</sup>Agostini S., <sup>3</sup>Churikova T.G.,  
<sup>3,4</sup>Gordeychik B.N., <sup>3</sup>Muravyev Ya.D., <sup>1</sup>Morgan D.J., <sup>5</sup>Iveson A.,  
<sup>5</sup>Humphries M.

<sup>1</sup>Institute of Geophysics and Tectonics, School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, UK

<sup>2</sup>Istituto di Geoscienze e Georisorse, Pisa, Italy

<sup>3</sup>Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

<sup>4</sup>Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka

<sup>5</sup>Department of Earth Sciences, Durham University, Durham, UK

New mineralogical, petrological and geochemical data (XRF, EMPA, ICP-MS) for the basalt-andesite series of rocks of the Kozelsky volcano are presented. The rocks are characterized by elevated contents of MgO (5–15 wt.%), Ni (10–200 ppm) and Cr (60–800 ppm) and elevated Ba/Zr and Sr/Y ratios in comparison with mid-arc lavas.

# ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАМЧАТКИ НА СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С МАГНИТУДОЙ М8.8 29 ИЮЛЯ 2025 г.

**Гарагаш И.А., Славина Л.Б., Кучай М.С.**

Институт физики Земли (ИФЗ) РАН, Москва, [garagash@ifz.ru](mailto:garagash@ifz.ru)

Сейсмическая активность связана с медленными тектоническими движениями земной коры, приводящими к накоплению в них значительной упругой энергии, которая разряжается в окружающее пространство в результате разрушения материала земной коры в тех местах, где тектонические напряжения достигают предела прочности [Гарагаш, 1991; Гарагаш и др., 1997; Лобковский и др., 2013]. Согласно теории постоянной упругой энергии формоизменения (М.Губер, Г.Генки), критическая плотность энергии сдвига, соответствующая пределу прочности, является константой, не зависящей от характера напряженного состояния [Nadai, 1950]. Поэтому увеличение плотности потенциальной энергии сдвига приближает среду к разрушению.

Изменение напряженного состояния трещиноватой земной коры отражается на раскрытии трещин и их концентрации [Гарагаш и др., 2005], что приводит к изменению отношения скоростей продольных и поперечных волн  $V_p/V_s$ , регистрируемых на сети сейсмических станций. [Славина и Мячкин, 2005]. На этой основе разработана методика, позволяющая следить за напряженно-деформированным состоянием земной коры и ее энергонасыщенностью. В основу методики положены соотношения теории сред с большим числом трещин [Kachanov et al, 1994]. Методика реализована для территории Камчатки. Расчеты, проводимые ежемесячно, позволяют следить за изменением распределения плотности энергии сдвига в земной коре.

29 июля 2025 произошло сильное землетрясение магнитудой М8.8 в результате разрыва обширной области у восточного побережья Камчатского полуострова в 150 километрах от Петропавловска-Камчатского. На основе методики анализа изменений энергонасыщенности земной коры по вариациям отношения  $V_p/V_s$  была изучена эволюция распределения плотности потенциальной энергии деформации сдвига в земной коре Камчатки с января по июнь 2025г. На рисунке 1 показаны изменения плотности потенциальной энергии сдвига на глубине 35км. Видно, что начиная с января плотность энергии в регионе начала постепенно возрастать и достигла наивысшего уровня в июне, тем самым приблизив среду к разрушению. При этом сформировалось два отчетливых максимума в окрестности одного

из которых, под Петропавловском-Камчатским, и произошло землетрясение.

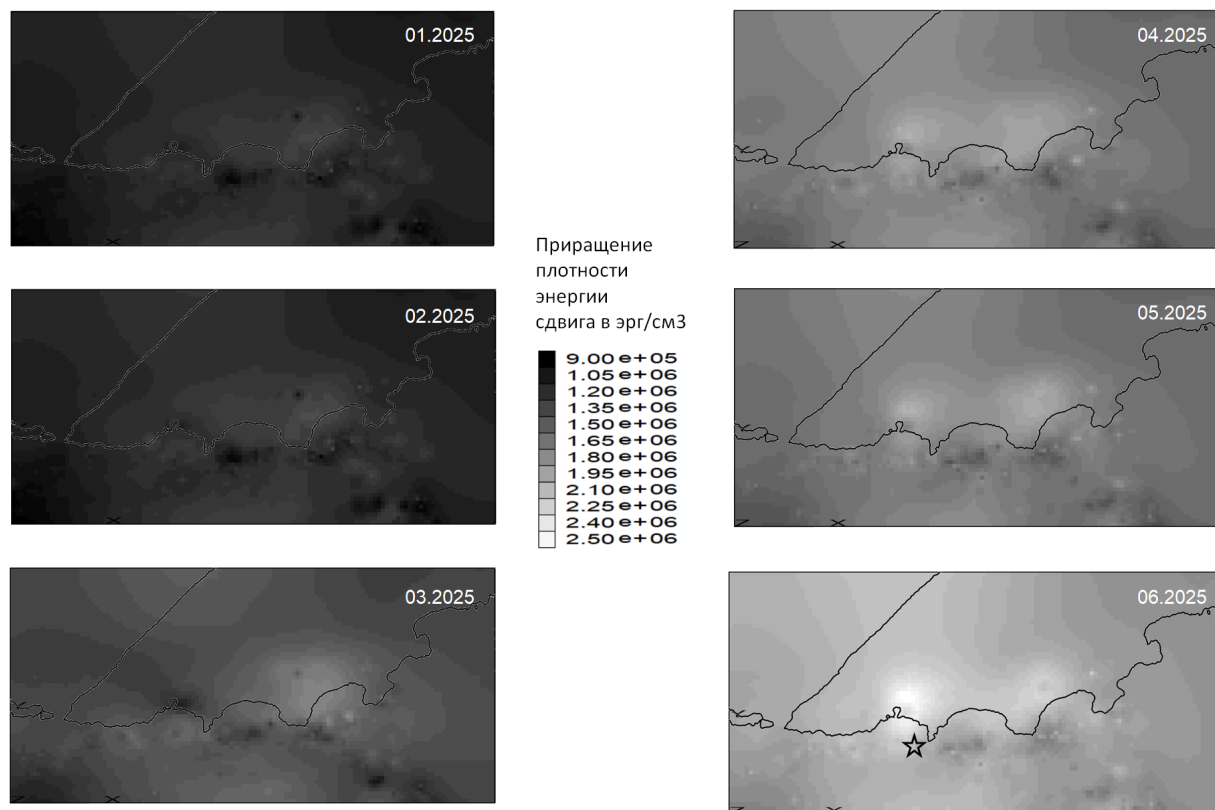


Рис. 1. Вариации потенциальной энергии деформации сдвига в земной коре Камчатки на глубине 35 км с января по июнь 2025 г.

Следует заметить, что одной информации об увеличении плотности потенциальной энергии сдвига недостаточно для указания места сейсмической подвижки, поскольку неизвестно распределение предела прочности земной коры. Поэтому землетрясение может произойти не в области максимально увеличившейся плотности энергии, а в ее окрестности. В любом случае можно заключить, что глобально энергонасыщенность земной коры Камчатского региона перед сильным землетрясением заметно возрасла.

*Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

## Литература

1. Гарагаш И.А. Поиск мест возникновения сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1991. Т.318. Вып. 4. С. 862-867
2. Гарагаш И.А., Славина Л.Б., Белянкин Г.А. Напряженное состояние земной коры и сейсмическая опасность Восточного Предкавказья // Вулканология и сейсмология. 1997. № 1. С.105-122.
3. Гарагаш И.А., Иогансон Л.И., Шлезингер А.Е. Осадочные бассейны, связанные с трансформированной консолидированной корой: особенности современной структуры и ее связь с механизмом образования // Геотектоника. 2005. № 6. С. 32–41.
4. Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Дубовская А.В. Связь напряженно деформированного состояния земной коры Восточного Прикаспия с зонами возникновения очагов землетрясений // ДАН. 2013. Т. 449. № 4. С. 458-462.
5. Славина Л.Б., Мячкин В.В. Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.
6. Kachanov, M., Tsukrov, I., Shapiro, B. Effective moduli of solids with cavities of various shapes. // Appl. Mech. Rev. 47 (1S). 1994. P. 151–174.
7. Nadai A. Theory of flow and fracture of solids. Vol. 1, McGraw-Hill, 1950, 572p.

### CHANGE IN THE ENERGY SATURATION OF THE EARTH'S CRUST OF KAMCHATKA AT THE PREPARE STAGE OF THE EARTHQUAKE WITH MAGNITUDE M8.8 ON JULY 29, 2025

**Garagash I.A., Slavina L.B., Kuchay M.S.**

Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow, [garagash@ifz.ru](mailto:garagash@ifz.ru)

A method has been developed that allows monitoring changes in the stress-strain state of the earth's crust and its energy saturation. The method has been implemented for the territory of Kamchatka. It has been established that six months before a strong earthquake with a magnitude of M8.8, the density of potential shear energy gradually increased and reached a maximum before the seismic event.

# ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ РАСТЕНИЙ РОДА CLADOCHAETA DC. НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ С ЦЕЛЬЮ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**Голубев Ф.В.**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), Москва,  
[f.v.golubev@mail.ru](mailto:f.v.golubev@mail.ru)

## Введение

В Алагирском районе Северной Осетии находится Садонская группа ряда свинцово – цинковых полиметаллических месторождений, добыча которых негативно повлияла на экологическую обстановку этого района.

Среди современных методов мониторинга состояния окружающей среды значительную роль играет биологический метод. Немалая роль в нём отводится высшим сосудистым растениям к которым относится кладохета чистейшая (*Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.) из семейства Астровых (Asteraceae) растущая на Кавказе. Впервые нами было установлено высокое содержание кадмия и свинца в кладохете чистейшей (*Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.), растущей в окрестностях с. Н.Унал, расположенного рядом с хвостохранилищем [Голубев, Ермаков, 2019]. Поэтому, в связи с вопросами оценки состояния окружающей среды, изучались способности этого растения накапливать тяжелые металлы, и прежде всего кадмий и свинец, на территориях с различным уровнем загрязнения.

## Результаты

Растения кладохеты чистейшей (*Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.) и почвы из прикорневой части растений отбирали на галечниковых отложениях реки Ардон на участке, включающим населённые пункты: Нижний Унал – Зинцар – Биз – Тамиск – Алагир в соответствии с ранее проводимыми исследованиями распространения этого вида растения на территории Северной Осетии [Голубев, 2021]. Валовое содержание свинца и кадмия в объектах исследования определяли методом ААС после минерализации кислотами. Точность анализа контролировали посредством анализа аттестованных образцов почв и растений (стандартные образцы КНР, Польши и России). Нижний предел определения для Cd был равен 0,02 мг/кг, для Pb – 0,1 мг/кг. Статистическая обработка результатов исследований проводилась с применением программы Statistica 10. О накоплении элементов, также, судили по величине коэффициента биологического



накопления (КБН), который рассчитывали по формуле:  $K = \frac{\text{содержание элемента в сухой надземной биомассе (мг/кг)}}{\text{содержание элемента в почве (мг/кг)}}$ . При значении  $K \geq 1$  растения рассматривались как аккумуляторы химических элементов.

Диапазон колебаний свинца в техногенных грунтах окрестностей хвостохранилища составил от 255 до 2202 мг/кг. Содержание свинца в растениях изменялось от 4,5 до 41,7 мкг/г. На относительно фоновых территориях содержание свинца варьировало в пределах 2,4–6,9 мг/кг, а на отдельных участках изменялось от 2,4 до 3,6 мг/кг (у с. Тамиск и г. Алагир в пойме р. Ардон). КБН (Pb) = 0,013 – 0,384.

Содержание кадмия в почвах с. Н. Унал и районе хвостохранилища варьировало от 1,80 до 66,0 мг/кг. В технозёмах, находящихся выше хвостохранилища, кадмия содержалось от 1,80 до 14,22 мг/кг, рядом с хвостохранилищем – 66,0 мг/кг. Диапазон колебаний кадмия для почв фоновых территорий составил 0,23 – 0,72 мг/кг. Содержание кадмия в растениях на фоновых территориях изменялось в пределах 1,14 – 4,95 мг/кг и 2,58 – 6,0 мг/кг на техногенных территориях. КБН (Cd) = 0,79 – 9,75.

### **Обсуждение результатов**

Содержание Pb в техногенных грунтах окрестностей с. Н.Унал значительно превышало ПДК для почв России, которые составляют 32 мг/кг [ГН 2.1.7.2041–06]. Учитывая, что допустимые значения свинца в растениях варьируют от 0,1–6 мг/кг, уровень содержания свинца в кладохете чистейшей превышал ПДК в 1,5–7,5 раз на техногенных участках, а на фоновых территориях соответствовал норме (пойма р. Ардон у Тамиска и г. Алагир). Наиболее высокое содержание свинца в почвах и растениях отмечено в районе хвостохранилища. В кладохете чистейшей установлено высокое содержание свинца, но она не относится к растениям–аккумуляторам этого элемента, т.к. КБН  $\leq 1$ .

Для почв населённых пунктов России ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) кадмия составляют 0,5 мг/кг [ГН 2.1.7.2511–09]. Почвы техногенных участков (окрестностей с. Н. Унал и хвостохранилища) имели аномально высокие значения по содержанию кадмия (1,80 – 66,0 мг/кг). По мере отдаления от воздействия района горнорудной промышленности, содержание кадмия в почвах снижалось до 1,50 мг/кг (между с. Зинцар и с. Биз), 0,72 мг/кг (между с. Биз и с. Тамиск), но распределение кадмия на всей исследуемой территории имело дискретный характер. На отдельных участках (от с. Тамиск до г. Алагир) содержания кадмия было ниже ОДК (0,23 – 0,36 мг/кг).

В растениях *Cladochaeta candidissima* содержание Cd в среднем составило 3,17 мг/кг при вариабельности 1,14 – 6,00 мг/кг, что значительно превышало мировые показатели. Учитывая, что допустимые значения содержания этого элемента как в растениях, так и в препаратах, производимых на их основе, варьируют от 0,03 – 1 мг/кг [Галенко и др., 2021; СанПиН 2.3.2.1078–01], очевидно, что уровень содержания кадмия в кладохете превышал ПДК в 6 – 38 раз. Концентрации кадмия в растениях техногенных и фоновых территорий отличались незначительно, что характеризует кладохету чистейшую как растение, имеющее высокий адаптивный потенциал и очень высокую кадмий – аккумулятирующую способность. Высокая аккумулятирующая способность растений проявлялась в почвах с низким содержанием кадмия (0,24 – 0,72 мг/кг). В кладохете чистейшей установлено значительное содержание Cd, она относится к растениям – аккумуляторам этого элемента, т.к. КБН (Cd)  $\geq 1$ .

### **Заключение**

В результате исследований установлено, что в растениях кладохеты чистейшей (*Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.) отмечено высокое содержание свинца, и особенно кадмия на территориях с различным уровнем антропогенной нагрузки. Применение этого вида в мониторинге состояния окружающей среды территорий Северного Кавказа, загрязнённых тяжёлыми металлами (свинцом и кадмием) вполне возможно.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).*

### **Литература**

1. Галенко М.С., Гравель И.В., Вельц Н.Ю., Аляутдин Р.Н. Нормирование содержания ТМ и мышьяка как фактор безопасности использования лекарственных растительных препаратов // Безопасность и риск фармакотерапии. 2021. №9 (2). С. 61–68.
2. Голубев Ф.В., Ермаков В.В. Геохимическая экология растений – перспективное направление биогеохимии // Труды XI Международной биогеохимической школы. Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека. Т.2. Тула: ТГПУ. 2019. С.26–28.
3. Голубев Ф.В. Распространение *Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC. в бассейне реки Ардон (Северная Осетия) // В кн.: Горные экосистемы и их компоненты. Материалы VIII Всероссийской



конференции с международным участием, посвящённой Году науки и технологий в Российской Федерации. Нальчик.2021. С.32–33.

4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041–06. 1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М.,2006.
5. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511–09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве / Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. М.,2009.
6. Гигиенические требования СанПиН 2.3.2.1078–01 / Министерство здравоохранения Российской Федерации. М.,2002.

RESEARCH OF SOME PLANTS OF THE GENUS CLADOCHAETA DC.  
IN THE NORTH CAUCASUS FOR THE PURPOSE OF THEIR  
APPLICATION IN MONITORING THE STATE OF THE ENVIRONMENT  
**Golubev F.V.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the  
Russian Academy of Sciences (GEOHI), Moscow,  
[f.v.golubev@mail.ru](mailto:f.v.golubev@mail.ru)

The aim of the work was to study the possibility of using some Caucasian plants of the genus *Cladochaeta* DC. in monitoring the state of the environment of the North Caucasus territories polluted with heavy metals (lead and cadmium). The AAS method was used to study samples of soils and plants of the genus *Cladochaeta* DC. in the polluted territory of the North Ossetia Alagir mining district and background territories. Plants have been found to contain high levels of lead and especially cadmium. It has been shown for the first time that *Cladochaeta candidissima* (Bieb.) DC.– a species of the genus *Cladochaeta* DC., is a Cd accumulator and contains high concentrations of lead. The species may well be used in biological monitoring of the state of the environment in the territories of the North Caucasus subject to pollution by heavy metals.

## ВРЕМЕНА ФОРМИРОВАНИЯ FO-NI НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОЛИВИНАХ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА

<sup>1,2</sup>Гордейчик Б.Н., <sup>2</sup>Чурикова Т.Г., <sup>2</sup>Муравьев Я.Д., <sup>3</sup>Кронц А.,  
<sup>3</sup>Вёрнер Г.

<sup>1</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка,  
[gordei@mail.ru](mailto:gordei@mail.ru);

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-  
Камчатский;

<sup>3</sup>Abteilung Geochemie, Universität Göttingen, Göttingen, Germany

Реконструкция истории оливина на основе диффузионной хронометрии требует подгонки решения диффузионных уравнений к измеренным концентрациям элементов [Costa et al, 2008]. Кратко опишем используемый для этого комплекс из физической, математической и численной моделей.

**Физическая модель.** Рассматриваются две простые физические ситуации: диффузия на краю кристалла с начальной постоянной концентрацией некоторого компонента (Fo или Ni) и диффузия внутри кристалла, изначально состоящего из двух частей, каждая со своей начальной постоянной концентрацией компонента. Пространственно однородные значения компонентов вокруг моделируемой зоны используются в качестве начальных условий, они же используются и как граничные условия. Анизотропные коэффициенты диффузии зависят как от давления, температуры, фугитивности кислорода ( $P$ - $T$ - $fO_2$ ), так и от состава оливина (Fo).

**Математическая модель** в своей основе содержит уравнения диффузии Fo-Ni в виде законов сохранения:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c^{pr} \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $x$  – координата вдоль профиля,  $t$  – время,  $C$  – компонент, т.е. либо Fo (мол. %), либо NiO (мас. %),  $D_c^{pr}$  – коэффициент диффузии вдоль профиля с учетом ориентации кристалла [Chakraborty, 2010]

$$D_c^{pr} = D_c^a \cos^2 \alpha + D_c^b \cos^2 \beta + D_c^c \cos^2 \gamma, \quad (2)$$

где  $D_c^a$ ,  $D_c^b$ , и  $D_c^c$  — коэффициенты диффузии вдоль главных кристаллографических осей, а  $\alpha$ ,  $\beta$ , и  $\gamma$  — углы между профилем и осями. Анизотропия Fo и Ni выражаются соотношениями:

$$D_c^a = D_c^b = D_c^c / 6. \quad (3)$$

Если граница кристалла или граница между его частями имеет координату  $x_b$ , то начальные условия формулируются одинаково:

$$C = \begin{cases} C_l, & x_l \leq x \leq x_b \\ C_r, & x_b \leq x \leq x_r \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_l$  и  $x_r$  левая и правая границы области,  $C_l$  и  $C_r$  — начальные и граничные условия компоненты слева и справа от границы контакта.

Коэффициенты диффузии даны в [Chakraborty, 2010, p. 617-618]:

$$D_{Fo}^c = 10^{-9.21} \left( \frac{fO_2}{10^{-7}} \right)^{\frac{1}{6}} 10^{3(0.9 - \frac{Fo}{100})} \exp \left( - \frac{201000 + (P - 10^5) \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{RT} \right), \quad (5)$$

$$D_{Ni}^c = 3.84 \cdot 10^{-9} \left( \frac{fO_2}{10^{-6}} \right)^{\frac{1}{4.25}} 10^{1.5(0.9 - \frac{Fo}{100})} \exp \left( - \frac{220000 + (P - 10^5) \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{RT} \right), \quad (6)$$

где  $fO_2$  – фугитивность кислорода и  $P$  – давление в Паскалях,  $T$  – температура в Кельвинах, коэффициенты диффузии  $D_c^c$  и универсальная газовая постоянная  $R$  в системе единиц СИ.

Уравнения (5) и (6) показывают, что решение уравнения (1) для NiO не влияет на решение уравнения для Fo; поэтому систему уравнений (1) можно решать последовательно: сначала уравнение для Fo, а затем при известной зависимости  $Fo(x, t)$  уравнение для NiO. Отметим, что зависимость коэффициентов диффузии от  $Fo(x, t)$  обеспечивает нелинейные свойства уравнениям (1). Это обстоятельство требует численного решения уравнений диффузии.

**Численная модель** для расчета временных масштабов диффузии Fo и Ni реализована на листе Excel. Входными данными являются ориентации кристаллов, полученные методом EBSD, термодинамические условия, полученные окситермобарометрами, а также Fo и NiO, измеренные вдоль профиля методом EPMA, причем координаты точек корректируются по алгоритму [Chernov, 2010].

Используемая явная консервативная схема [Roache, 1976] является разностным аналогом уравнения диффузии

$$C_i^{n+1} = C_i^n + \tau \frac{\left( \Phi_{i-\frac{1}{2}}^c - \Phi_{i+\frac{1}{2}}^c \right)}{v_i}, \quad (7)$$

где  $C_i^n$  – компонент в ячейке  $i$  на слое  $n$ ,  $\tau$  – шаг между слоем  $n$  и  $n + 1$ ,  $v_i = (x_{i+1} - x_{i-1})/2$  – размер ячейки  $i$ ,  $\Phi_{i+\frac{1}{2}}^c$  – поток компонентов между ячейками  $i$  и  $i + 1$ , то есть разностный аналог закона Фика:

$$\Phi_{i+\frac{1}{2}}^c = -D_{i+\frac{1}{2}}^c \cdot \frac{C_{i+1}^n - C_i^n}{x_{i+1} - x_i}, \quad (8)$$

где  $D_{i+\frac{1}{2}}^c = (D_i^c + D_{i+1}^c)/2$  – усредненный коэффициент диффузии по соседним ячейкам, вычисляемый по (5) или (6).

Схема устойчива при временном шаге  $\tau < (v_i)^2 / 2D_i^c$  [Roache, 1976].

Расчет выполняется в два этапа. Сначала задаются границы  $x_l$  и  $x_r$ , положение  $x_b$  и величины  $Fo_l$  и  $Fo_r$ . Сумма квадратов разностей между численным решением и измеренными точками используется как критерий наилучшего решения, и по нему определяется время действия диффузии для Fo. На втором этапе выбираются значения  $NiO_l$  и  $NiO_r$ , и находится время действия диффузии для Ni.

**Результаты моделирования** даются на примере анализа структуры оливинов из пород Авачинского вулкана.

Оливины из пород Авачинских конусов Попович и Страж схожи по внутренней структуре: ядра окружены обрастаниями, как и в оливинах маара Шивелуча 7600 BP [Gordeychik, 2018]. В ядрах Fo и Ni изменяются плавно, а в обрастаниях имеют крутые градиенты на внутренней границе обрастание-ядро и на внешней границе каждого кристалла (см. рисунок). Внутренние ядра имеют как прямую зональность, так и обратную, такое поведение свидетельствует о контрастных составах расплавов в магматической камере. Характерные времена пребывания оливинов в неравновесном составе варьируют от 21 до 386 дней для конуса Попович, и от 12 до 190 дней для конуса Страж. Времена подъема оливинов, то есть их выноса на поверхность несущим расплавом варьирует от 1 до 17 дней для конуса Попович, и от 5 до 45 дней для конуса Страж.

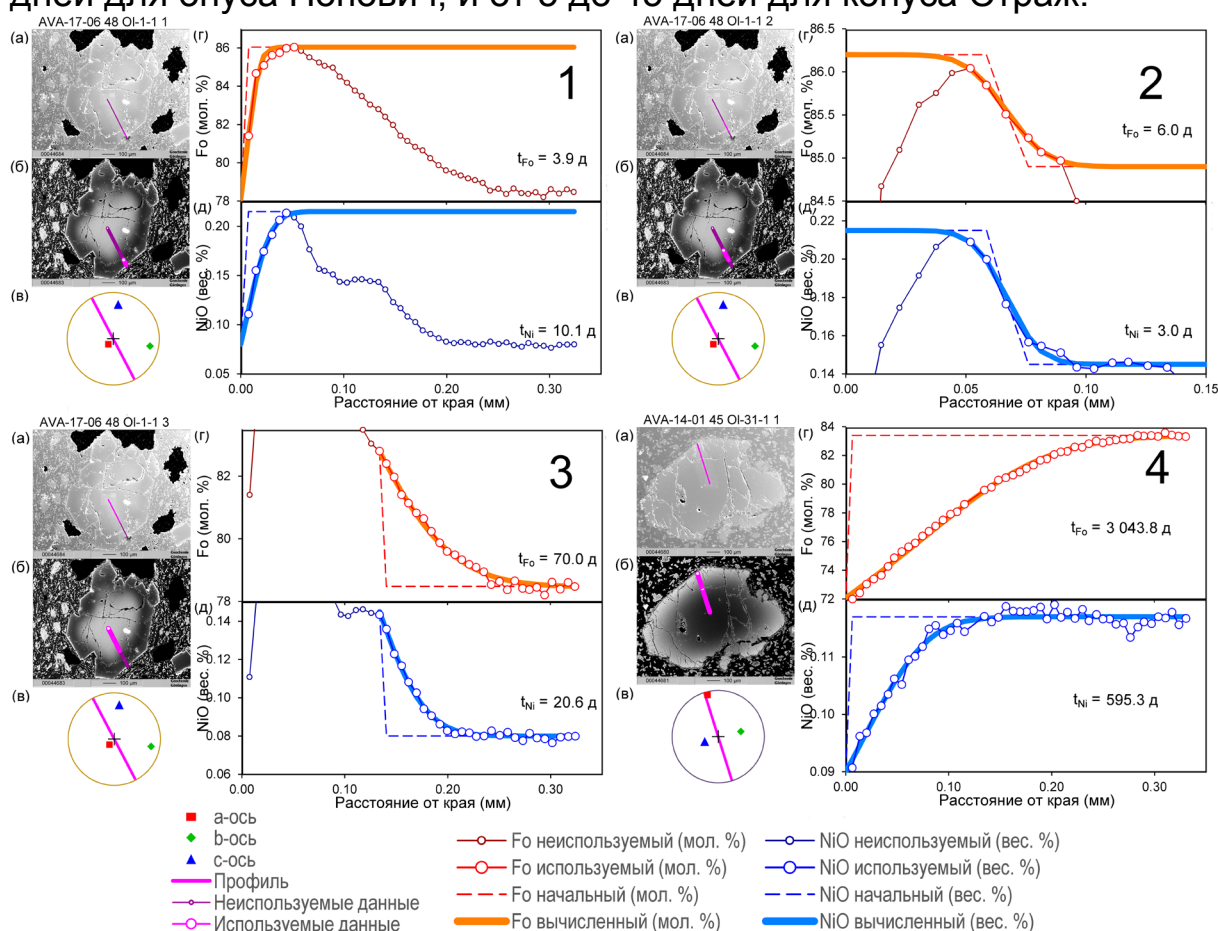


Рисунок. Характерный оливин Авачинских конусов: краевая зона – 1, обрастание – 2, ядро – 3. Характерный оливин авачита – 4. Изображение во вторичных электронах (а) показывает оливин и профиль, в обратно рассеянных электронах (б) – распределение атомного веса и использованные точки. Стереографический график (в) отображает проекции профиля и кристаллографических осей. Графики Fo (г) и NiO (д) показывают измерения, используемые точки, начальные данные и результаты моделирования.

Концентрации элементов в оливинах авачитов плавно изменяются от ядра к краю (см. рисунок). Времена действия диффузии в оливинах авачитов оказались заметно больше, чем для конусов, 200–11 000 дней. Длительные времена действия диффузии в оливинах авачитов свидетельствуют об интрузивном происхождении пород и их медленном остывании.

*Полевые работы и лабораторные измерения проводились в рамках НИР № FWME-2024-0009, модели разрабатывались в рамках НИР № FMUF-2022-0004.*

### Литература

1. Chakraborty S. Diffusion coefficients in olivine, wadsleyite and ringwoodite // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2010. Vol. 72, Is. 1. P. 603-639. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2010.72.13>.
2. Chernov N. Circular and Linear Regression: Fitting Circles and Lines by Least Squares // Monographs on statistics and applied probability. CRC Press, 2010. 286 p.
3. Costa F., Dohmen R., Chakraborty S. Time scales of magmatic processes from modeling the zoning patterns of crystals // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2008. Vol. 69, Is. 1. P. 545-594. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.14>.
4. Gordeychik B., Churikova T., Kronz A., et al. Growth of, and diffusion in, olivine in ultra-fast ascending basalt magmas from Shiveluch volcano // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, Is. 1. Art. 11775. P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30133-1>.
5. Roache P.J. Computational Fluid Dynamics. Albuquerque: Hermosa Publishers, 1976. 446 p.

### TIMES OF FORMATION OF FO-NI ZONING IN OLIVINES OF AVACHINSKY VOLCANO

<sup>1,2</sup>Gordeychik B.N., <sup>2</sup>Churikova T.G., <sup>2</sup>Muravyev Ya.D., <sup>3</sup>Kronz A., <sup>3</sup>Wörner G.

<sup>1</sup>Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, [gordei@mail.ru](mailto:gordei@mail.ru);

<sup>2</sup>Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky;

<sup>3</sup>Abteilung Geochemie, Universität Göttingen, Göttingen, Germany

A set of models for determining the formation times of Fo-Ni zoning (diffusion chronometry) in olivine is briefly described. The results of modeling are presented using the example of olivines from Avacha volcano.

## КАССИТЕРИТ КАК ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОЛОВОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

<sup>1</sup>Гореликова Н.В., <sup>1</sup>Чижова И.А., <sup>2</sup>Раткин В.В.

<sup>1</sup>ИГЕМ РАН, <sup>2</sup>ДВГИ ДВО РАН

При поисках новых объектов большую помощь в работе могут оказать эффективные методы, пригодные для поисковых работ рудных месторождений. Разработанный нами геохимический подход моделирования по микроэлементам касситеритов позволяет выявлять геодинамические условия формирования оловорудных месторождений, оценивать их промышленную значимость и фиксировать время их образования. Наличие россыпной металлоносности в пределах Арктического региона предполагает возможность открытия коренных месторождений вблизи этих россыпных объектов. Как это и случилось в Северо-Ляховском районе, где вначале были найдены оловянные россыпи, а позже при бурении – коренные оловянные руды.

Нами изучены оловорудные месторождения Сихотэ-Алинской металлогенической провинции Дальнего Востока, где выявлены оловорудные месторождения разного типа и значимости в пределах Комсомольского района Хабаровского края, Кавалеровского, Баджальского и Хинганского районов Приморья.

Сихотэ-Алинская провинция представляет металлогеническую оловоносную крупную зону с центрами гранитоидного магматизма мезо-кайнозойского возраста. В ранний мел-палеоценовой геодинамической эволюции территории выделяются несколько этапов: 1) ранний мел-ранний сеноман (140-93 млн. лет) – *трансформная окраина (ороген)*, 2) поздний сеноман-маастрихт (93-65 млн. лет) – *надсубдукционная окраина*, 3) палеоцен (65-57 млн. лет) – *переходный режим (смена субдукции на режим трансформной окраины)*. Каждый из этапов сопровождается гранитоидным магматизмом, который связан с интенсивной переработкой мезозойской новообразованной континентальной литосферы Сихотэ-Алиня. При отчетливом характерном доминировании гранитоидов, образованных при переработке мантийного клина и верхней коры в период субдуцирования, в период орогенеза (в геодинамическом режиме трансформной окраины) формируются гранитоиды при участии верхнекоровых источников и образований подлитосферной мантии [Ханчук, 2000]. В результате этого возникают весьма петрохимически различные гранитоидные комплексы с варьирующим уровнем оловоносности. Выделяются три эпизода оловоносного гранитоидного магматизма. Наиболее высока металлоносность оловоносных гранитоидных комплексов, сформированных в альбе-сеномане в орогенном



режиме трансформной окраины. Оловорудные районы субдукционного магматизма часто наследуют орогенные центры, где пространственно совмещены разновозрастные месторождения. Менее значительны проявления олово-полиметаллических месторождений палеоценового возраста. Ассоциированные с ними гранитоиды сохраняют петрохимические черты надсубдукционных образований. Указанные особенности определяют прогнозный потенциал выявляемых оловорудных месторождений. При этом следует отметить, что корректная оценка возраста и геодинамической приуроченности месторождений в силу их пространственной разобщенности с рудоносными интрузиями на раннем этапе изучения объектов практически невозможна. Решение этой проблемы лежит в использовании минералого-геохимических индикаторов.

По нашим данным, универсальным индикатором могут выступать элементы-примеси в касситерите и их сочетания, отражающие петрогеохимические особенности формирующихся в изменяющемся геодинамическом режиме рудоносных интрузий.

В основу обобщений положена база данных 900 образцов касситеритов из руд типовых детально изученных оловорудных месторождений Дальнего Востока России. Касситериты охарактеризованы, по данным количественного спектрального анализа, на содержания **Sc, W, Nb, V, Cr, Be, Ti, Zr, Fe, Mn**.

Понятие о парагенезисе элементов введено впервые А.Е.Ферсманом [Ферсман, 1953], который полагал, что наиболее информативными являются не сами содержания отдельных элементов, а их закономерные сочетания. Эту идею развил С.А.Щека, который ввел понятие «парагенезис», который может быть использован как в рудно-формационном анализе, так и в решении задач прикладного характера [Щека и др, 1987]. На основании изучения минерализации оловянных руд и составов касситеритов различных месторождений Дальнего Востока нами установлены значительные вариации парагенезисов касситерита в рудах разных формационных типов.

Мы использовали в работе логико-информационный анализ данных, разработанный И.А.Чижовой [Чижова, 2010]. Этот метод по современной классификации можно отнести к методам машинного обучения, поскольку модели и решающие правила для решения прогнозных задач формируются на основе компьютерного анализа эталонной выборки объектов исследования из базы данных, описанных в системе геохимических характеристик проб. Сущность метода состоит в разделении различных групп объектов, их описании и оценке степени их сходства и различия. Процедура математической обработки аналитических данных состоит в

следующем: а) выделение *интервалов-индикаторов* из диапазона изменения значений признаков (элементов) для каждой анализируемой группы, значения из которых с максимальной вероятностью встречаются в пробах из конкретной группы и не встречаются в пробах из других групп; б) вычисление *разделяющих весов* признаков (элементов), количественно характеризующих их степень информативности для данной группы; в) вычисление *функции принадлежности (информационного веса)* - интегральной характеристики объекта по составу данной пробы; г) на основе полученных оценок принимается решение о *сходстве или различии* изучаемых объектов и групп, используя следующее правило: проба относится к той группе, для которой *функция принадлежности (информационный вес)* принимает максимальное значение.

Метод позволяет классифицировать каждую пробу и определить ее вероятную генетическую принадлежность к той или иной группе. В результате идентифицируется каждый образец базы данных и определяется в целом специфичность каждой группы.

В качестве примера приводятся данные анализа на основе логико-информационного метода некоторых эталонных объектов оловорудных месторождений Сихотэ-Алинской мегапровинции, включая:

Фестивальное (рудная зона Геофизическая) и Перевальное месторождения -

- зоны орогенного типа Комсомольского рудного района (ранний мел-сеноман);

- интервалы рудных зон (Кулисная, Тектоническая, 8-ая Восточная, Турмалиновая, Северная) Высокогорского месторождения, сформированных в орогенный этап (ранний мел-сеноман);

- интервалы рудных зон Арсеньевского месторождения (Южная, Индукционная, Фельзитовая, Турмалиновая, Подружка), формирование которых связывается с субдукционным этапом (сеноман-маастрихт);

- рудная зона Фельзитовая Арсеньевского месторождения, сопряженная с дайками риолитов палеоценового возраста.

На графике (рис.) отчетливо выражены две группы разновозрастных оловорудных месторождений:

- сформированные в геодинамике трансформной континентальной окраины (ороген) ранний мел-сеноманского возраста (Фестивальное и Высокогорское в части рудных зон);

- сформированные в геодинамике сеноман - маастрихтской субдукционной окраины (рудные зоны Индукционная и Южная Арсеньевского месторождения).



Рудная зона Подружка, где совмещены руды орогенного и субдукционного этапа имеет переходные характеристики. Касситериты зоны Фельзитовой, сформированной в палеоценовый этап (смена субдукционного режима трансформным) практически неотличимы от «субдукционных». Это следует учитывать в прогнозных построениях.

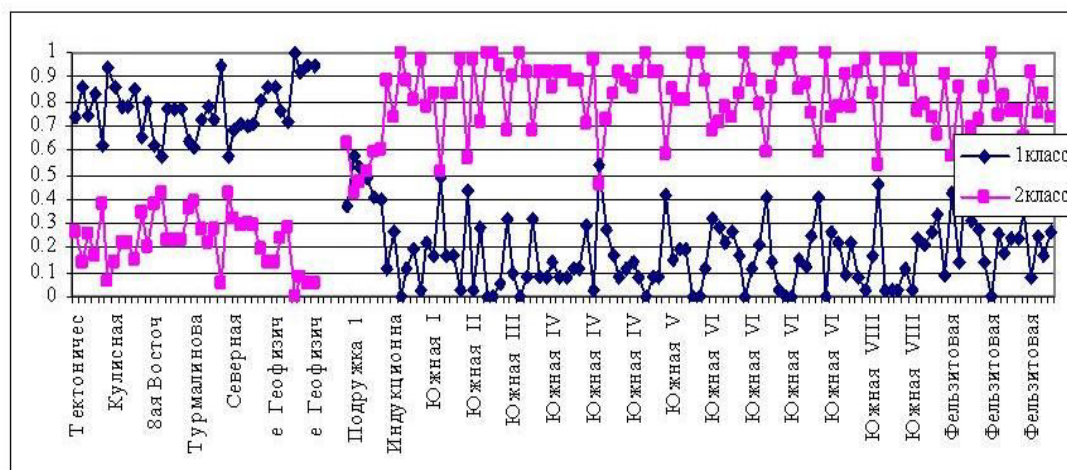


Рис. Геодинамическая типизация рудных зон оловорудных месторождений Сихотэ-Алиня.

### Литература

1. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России / Рудные месторождения континентальных окраин. – Выпуск 1. Владивосток. Дальнаука. 2000. – С. 5-34.
2. Чижова И.А. Логико-информационное моделирование при прогнозно-металлогеническом анализе перспективных площадей // Современные проблемы рудной геологии, минералогии и геохимии. – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – С. 59-84.
3. Щека С.А. и др. Типоморфизм минералов как поисковый критерий // Новые данные по минералогии Дальнего Востока. – Владивосток. 1987. – С. 9-33.

### CASSITERITE AS INDICATOR OF GEODYNAMIC CONDITIONS OF TIN ORE DEPOSITS FORMATION

<sup>1</sup>Gorelikova N.V., <sup>1</sup>Chizhova I.A., <sup>2</sup>Ratkin V.V.,

<sup>1</sup>IGEM RAS, <sup>2</sup>FEGI FEB RAS

Based on the analysis of the paragenesis of trace elements in cassiterite of tin ore deposits, the geodynamic identification of tin ore deposits was carried out using the method of logical and information analysis, and the possibility of using the characteristics of cassiterite in assessing the predictive potential of deposits was demonstrated.

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ СЕДИМЕНТОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ УГЛОВОГО ВРАЩЕНИЯ

<sup>1</sup>Градов О.В., <sup>2</sup>Елфимов А.Б., <sup>2</sup>Марнаутов Н.А.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им.  
Н.Н. Семенова РАН (ФИЦ ХФ РАН), Москва,

<sup>2</sup>Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН),  
Москва [nick.marnautov.dev@gmail.com](mailto:nick.marnautov.dev@gmail.com)

## 1. Введение

Проблемы слоистости / "слойчатости" осадочных горных пород и образования ритмичных / периодических структур или текстур при седиментогенезе, обусловленных комплексом факторов являются в высшей степени интригующими, с точки зрения нелинейной физики, моделирования реакционно-диффузионных процессов образования осадочных пород (как "Тьюринговского" морфогенеза с элементами синхронизации и захвата частоты внешних регулирующих факторов, включая тидальные и теллурические факторы, вековую геодинамику и собственные биоритмы - инфрадианные, циркадианные, годовые популяционно-динамические и феноспектральные ритмы отдельных биогенных составляющих из числа диатомовых водорослей и др.), а также качественными индикаторами и дескрипторами геохимических и геофизических условий формирования соответствующих пород (in loco). Множество работ с 1970-х гг. по наше время посвящено роли тидальных и иных факторов в формировании регулярных структур и текстурной ритмичности в геологии [Reineck & Singh, 1972; Kvale et al., 1989; Williams, 1990; Brown et al., 1990; Tada, 1991; Helgeson & Aydin, 1991; Caplan & Bustin, 2001; Sadovnikov, 2008; Tsoy, 2011], но, к сожалению, автоматические методы анализа и оценки текстурных характеристик в геологических системах до сих пор слабо развиты. В данном постерном докладе представлены новый метод и новое программное обеспечение для этих целей, разработанные в 2022 г. Н.А. Марнаутовым и тестированные А.Б. Елфимовым [Elfimov et al., 2025].

## 2. Обработка и анализ изображений

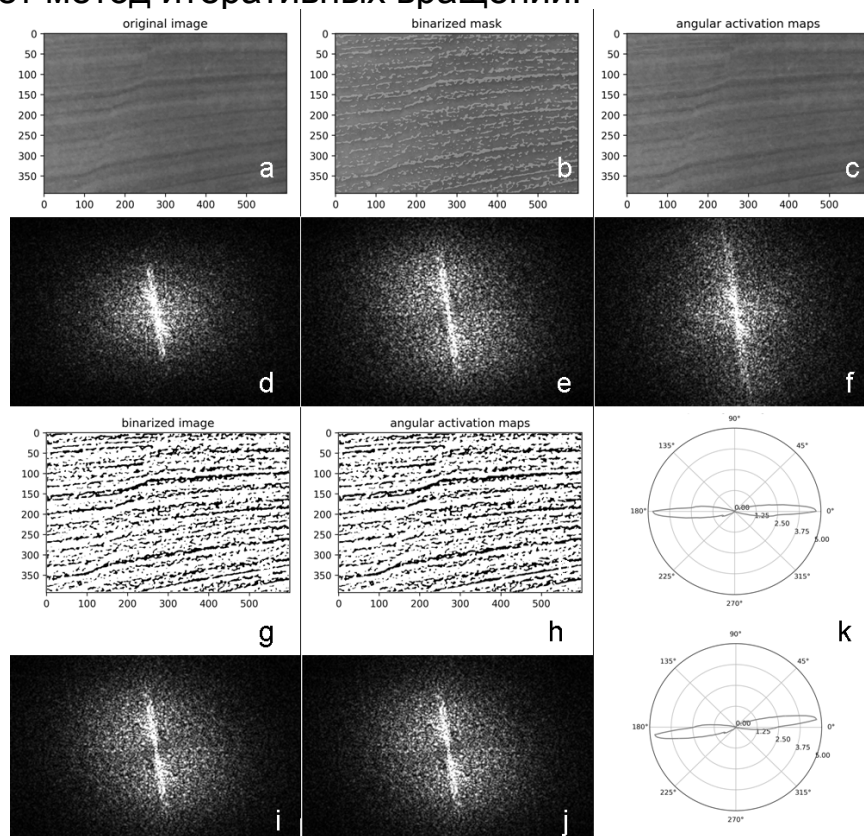
Для количественного анализа ориентации слоистых структур использовался разработанный Н.А. Марнаутовым программный комплекс "*ImageMorphLab*".

Актуальная версия программного обеспечения и подробная документация доступны для бесплатного использования в открытом репозитории (<https://nmar33.github.io/ImageMorphLab>)\*.

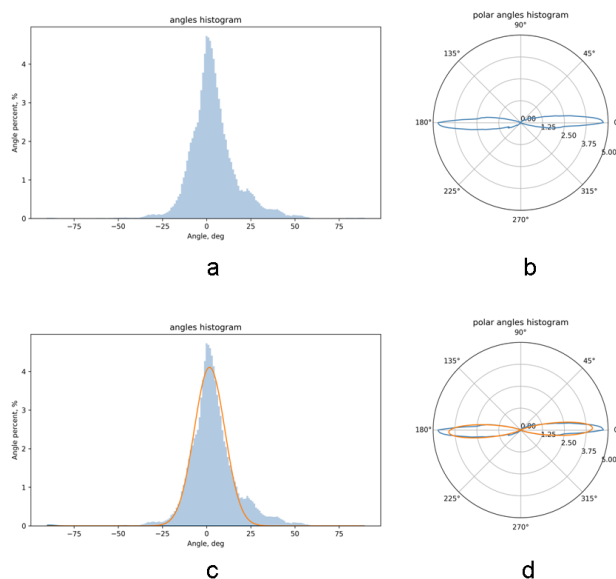
Процесс обработки изображений состоял из двух шагов. Сначала с помощью модуля "*LayerNet Segmenter*", основанного на нейросети архитектуры U-Net, производилась сегментация межслоевых границ.

Модель была предварительно обучена на синтетически сгенерированных данных, что позволило ей эффективно выделять слоистые структуры на микрофотографиях алевролитов.

Далее, для полученных бинаризованных масок рассчитывались гистограммы угловых распределений с помощью алгоритма OrientLayer. В отличие от стандартных градиентных методов, подверженных артефактам дискретизации растровых изображений, проявляющимся в виде "эффекта лесенки" (когда гладкая наклонная линия аппроксимируется ступенчатой пиксельной структурой, что может искажать локальное определение угла), данный алгоритм использует метод итеративных вращений.



**Рис. 1:** Пример обработки изображения алевролита от бинаризации до получения масок угловой активации (a,b,c,g,h) на ПО разработки Н.А. Марнаутова и результат 2D FFT-анализа (соответствующих им изображений) на ПО QAVIS (d,e,f,i,j) из ТОИ ДВО РАН; визуализация распределения по углам в полярных координатах с использованием ПО Н.А. Марнаутова дана на рис. 1-k.



**Рис. 2:** Гистограммы статистического распределения (гистограммы угловой ориентации) в декартовых (а) и полярных (б) координатах и их аппроксимации для текстуры осадочной породы (ср. с рис. 1).

Изображение поворачивается с шагом в  $1^\circ$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $359^\circ$ , и на каждом шаге выполняется поиск горизонтальных элементов с помощью линейного фильтра. Суммарный отклик фильтра на каждом угле поворота формирует итоговую гистограмму ориентаций, что обеспечивает высокую точность анализа. Ключевые параметры анализа, такие как длина фильтра и порог бинаризации, подбирались для каждого набора изображений с целью наилучшего соответствия результирующей маски исходной структуре.

В качестве контроля можно использовать анализ интегральных пространственных характеристик (ИЧХ) изображения с помощью двумерного преобразования Фурье, моделирующего дифракцию излучения на периодических структурах.

Отличием визуализации будет то, что рассеяние излучения будет перпендикулярно периодической структуре (например, дифракционной решетке), а ориентация дифрагирующей структуры в этом случае происходит с помощью вторичного преобразования на основе интегральной пространственной характеристики (ИПХ) с использованием программного обеспечения QAVIS.

### 3. Примеры использования

В качестве наглядного примера рассмотрим анализ ритмичной седиментации при образовании алевролитов, показанный на рис. 1. В ходе работы алгоритма выдается следующая последовательность визуализирующих изображений: а – исходные изображения; б – бинаризованные маски; с – карты угловой активации. На каждом шаге в качестве контроля может быть применен «дифракционный» анализ регулярности / периодичности структуры, как это показано на

рисунках d, e и f, расположенных под a (исходное изображение), b (бинаризованная маска) и c (карты угловой активации). Бинаризации могут быть подвергнуты как само изображение, так и маски и карты, как показано на рисунках g и h. К бинаризованным изображениям может быть применен «дифрактометрический» подход (2D FFT), как то показано на рисунках i и j. Для сравнения на вставке k показаны соответствующие ортогональные отображения угловой ориентации реальных структур («гистограммы ориентации текстур») в полярных координатах, полученные с помощью разработанного Марнаутовым Н.А. алгоритма. Ниже приведены реальные гистограммы углового распределения слоёв в исследованных образцах осадочных пород.

На рисунках 2 (a, b) показаны гистограммы распределения углов в декартовых и полярных координатах на фото, подготовленных для анализа, как это показано на рисунках 1 (a–k). На рисунках 2 (c, d) даны попытки применения гауссовой аппроксимации к гистограммам распределения в декартовых и полярных координатах, показанным на рисунках 2 (a, b). Как можно видеть, распределение не является полностью унимодальным, вовсе не описывается простой гауссовой аппроксимацией, что указывает на неполную параллельность слоев и на наличие дополнительных ориентаций элементов внутри слоев. Это наблюдение соответствует регистрации дополнительных пиков в двумерном преобразовании Фурье (см. рис. 1 d, f–j).

#### 4. Заключение.

Таким образом, слоистые осадочные породы типа алевролитов содержат как регулярную составляющую, содержащую несколько преобладающих направлений ориентации (переходящих друг в друга в ходе осадконакопления / седиментогенеза), так и элементы анизотропии и хаоса (наблюдаемые в ореоле рассеяния 2D FFT). В результате использования рассматриваемых в докладе алгоритмов / ПО удастся охарактеризовать данные процессы и текстуры.

#### **Литература**

1. Reineck, H. E., & Singh, I. B. (1972). Genesis of laminated sand and graded rhythmites in storm-sand layers of shelf mud. *Sedimentology*, 18(1-2), 123-128.
2. Kvale, E. P., Archer, A. W., & Johnson, H. R. (1989). Daily, monthly, and yearly tidal cycles within laminated siltstones of the Mansfield Formation (Pennsylvanian) of Indiana. *Geology*, 17(4), 365-368.
3. Williams, G. E. (1990). Precambrian cyclic rhythmites: solar-climatic or tidal signatures?. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 330(1615), 445-458.
4. Brown, M. A., Archer, A. W., & Kvale, E. P. (1990). Neap-spring tidal cyclicity in laminated carbonate channel-fill deposits and its implications; Salem Limestone (Mississippian), south-central Indiana, USA. *Journal of Sedimentary Research*, 60(1), 152-159.

5. Tada, R. (1991). Origin of rhythmical bedding in middle Miocene siliceous rocks of the Onnagawa Formation, northern Japan. *Journal of Sedimentary Research*, 61(7), 1123-1145.
6. Helgeson, D. E., & Aydin, A. (1991). Characteristics of joint propagation across layer interfaces in sedimentary rocks. *Journal of Structural geology*, 13(8), 897-911.
7. Caplan, M. L., & Bustin, R. M. (2001). Palaeoenvironmental and palaeoceanographic controls on black, laminated mudrock deposition: example from Devonian–Carboniferous strata, Alberta, Canada. *Sedimentary Geology*, 145(1-2), 45-72.
8. Sadovnikov, G. N. (2008). On the global stratotype section and point of the Triassic base. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 16(1), 31-46.
9. Tsoy, I. B. (2011). Silicoflagellates of the middle-early Late Eocene of the Kronotskii Bay. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 19(1), 87-101.
10. Elfimov, A., Gradov, O., Gradova, M., and Marnautov, N. (2025). Neural network-assisted sedimentography based on discrete angular rotation algorithms and real-time correlation-spectral analysis: from physics of natural structured geomaterials to multilayer nanomaterials. *Advanced Structured Materials*, 221:191–233.

## RHYTHMICALLY LAMINATED TEXTURES: NEURAL NETWORK-ASSISTED ANALYSIS BASED ON DISCRETE ANGULAR ROTATION ALGORITHMS

<sup>1</sup>**Gradov O.V.**, <sup>2</sup>**Elfimov A.B.**, <sup>2</sup>**Marnautov N.A.**

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences (FRC CP RAS), RF, Moscow

<sup>2</sup>Emanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences (IBCP RAS), RF, Moscow

The problem of rhythmically laminated textures (rhythmically layered limestones; rhythmically alternating sandstones, aleurolites and argillites; etc. - they are not all literature names, but all well-known "different sides of the same geometrical polyhedron") [Reineck & Singh, 1972; Kvale et al., 1989; Williams, 1990; Brown et al., 1990; Tada, 1991; Helgeson & Aydin, 1991; Caplan & Bustin, 2001; Sadovnikov, 2008; Tsoy, 2011]. But unfortunately, automatic methods for analyzing the structural and textural characteristics of geological and mineral laminations, foliations, beddings and unconformities are still poorly developed. In this talk and poster we present a new method and new software for these purposes, developed by N.A. Marnautov and tested by A.B. Elfimov [Elfimov et al., 2025].

## ВРЕМЯРАЗРЕШЕННАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ САЛЬТАЦИЙ ПЕСКА

**Градов О.В., Маклакова И.А., Сергеев А.И.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н.  
Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), РФ, г. Москва,  
119991, ул. Косыгина д. 4

Известна роль электростатики в обеспечении "сальтации" песка, в том числе при формировании дюн (модифицированный механизм Багнольда), а также вариациях песчаных потоков в пылевых бурях и песчаных облаках в эолологии [Schmidt et al., 1988; Yue et al., 2003, 2007; Zheng et al., 2006; Yue & Zheng, 2007]. Несмотря на пересмотр некоторых механизмов сальтационных эффектов в последние годы, в особенности - недавно обнаруженную немонотонную зависимость порога текучести от диаметра частиц, приложенного электрического поля и поверхностной плотности заряда (приводящую к сепарации в течениях проводящих частиц от диэлектрических - за счёт снижения порога текучести за счёт электростатики для проводящих частиц до 31% и повышения порога текучести до 76% за счёт электростатики у отрицательно заряженных диэлектрических частиц) [Zhang, 2024], в целом, различные электростатические феномены воспроизводятся на песчинках в лабораторных условиях в элементарных установках типа описанной в [Xie et al., 2021]. Две параллельные электродные пластины используются для создания однородного электрического поля, имитирующего атмосферное или эоловое электрическое поле. Под действием электрического поля частицы песка приобретают индуктивный заряд и поднимаются в воздух. Их траектории снимают скоростной камерой, на основе чего вычисляют суммарные заряды отдельных частиц песка, и их заряд на единицу массы. Измеряется также пороговая напряженность электрического поля, приводящая к подъему частиц песка (она увеличивается с диаметром песчинки). В данном методе невозможно воздействовать на одиночную песчинку и наблюдать динамические феномены, сопутствующие сальтациям, в которых она участвует (электростатическая мультистабильность и обратимая агрегация, вращение частиц в вихревых полях и т.д.).

Нами предлагается использовать для этого времяразрешенную (в т.ч. стробоскопическую) сканирующую электронную микроскопию, так как в колонне сканирующего электронного микроскопа возможно программировать разность потенциалов / напряженность поля через варьирование ускоряющего напряжения на катоде. Находящиеся на специализированной платформе с ограничивающими стенками либо в "субкамере" (если речь идёт об ASEM - атмосферной электронной



микроскопии) песчинки будут испытывать воздействие электронного пучка и проявлять динамику строго в находящихся под электронным пучком / облучаемых / сканируемых участках (ROI / region of interest). При этом можно отслеживать их динамику под пучком с временным разрешением, соответствующим техническим свойствам детекторов и системы развёртки.

Времяразрешенное исследование динамики песчинок с разным зарядом (в том числе модифицированных химически) и размерами / морфометрическими характеристиками было произведено впервые на собственноручно модифицированном сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM T330-A в TV-режиме при подключении АЦП с модулем оцифровки видео к BNC-разъёму, выводящему на монитор (обычно при использовании TV-режима). При записи видеосигналов сальтационной динамики частиц песка с параметрами регистрации, отображаемыми на адресно-временном коде / тайм-коде, достигали разрешение от десятков миллисекунд до миллисекунд. Напряжение на катоде варьировали от единиц киловольт до 25 киловольт.

Примеры времяразрешенных микроизображений для динамики калиброванных моделей песчинок с измеренными характеристиками заряда, пористости и морфометрии (SILASORB) приведены на рис. 1-а. Можно видеть вращение одной частицы на поверхности другой - удерживающей первую электростатическими силами. Подтвердить факт вращения можно с применением двумерного преобразования Фурье в реальном времени (мы осуществляли это с использованием ПО QAVIS разработки ТОИ ДВО РАН): динамику изменений 2D FFT данной серии рапид-микрофотографий можно видеть на рис. 1-б. В ряде случаев можно наблюдать прецессию частиц, а также явления, подобные гироскопическому движению песчинки в конфайнменте на поверхности. После отрыва от поверхности частицы уносятся вовне, иногда за пределы зоны сканирования.

Ещё одним экстраординарным феноменом является дискретная динамика переключений при вращении частиц (частица "стопорится" в определенных угловых позициях), а также дискретные переходы в ориентациях песчинки между двумя состояниями ("бистабильность") и более ("мультистабильность"). Также наблюдаются "перемещения частиц на дальние расстояния", предположительно, коррелирующие с размерами и зарядом поверхности песчинок. Они детектируются с использованием осциллографического метода на заданных строках. Примеры этих эффектов показаны на рис. 2-а и рис. 2-б. Результаты модельных экспериментов опубликованы [Elfimov et al., 2025].

Эксперименты могут быть воспроизведены на любом песке при соблюдении электрофизических условий проведения эксперимента, а также могут лечь в основу классификации песков по их динамике.



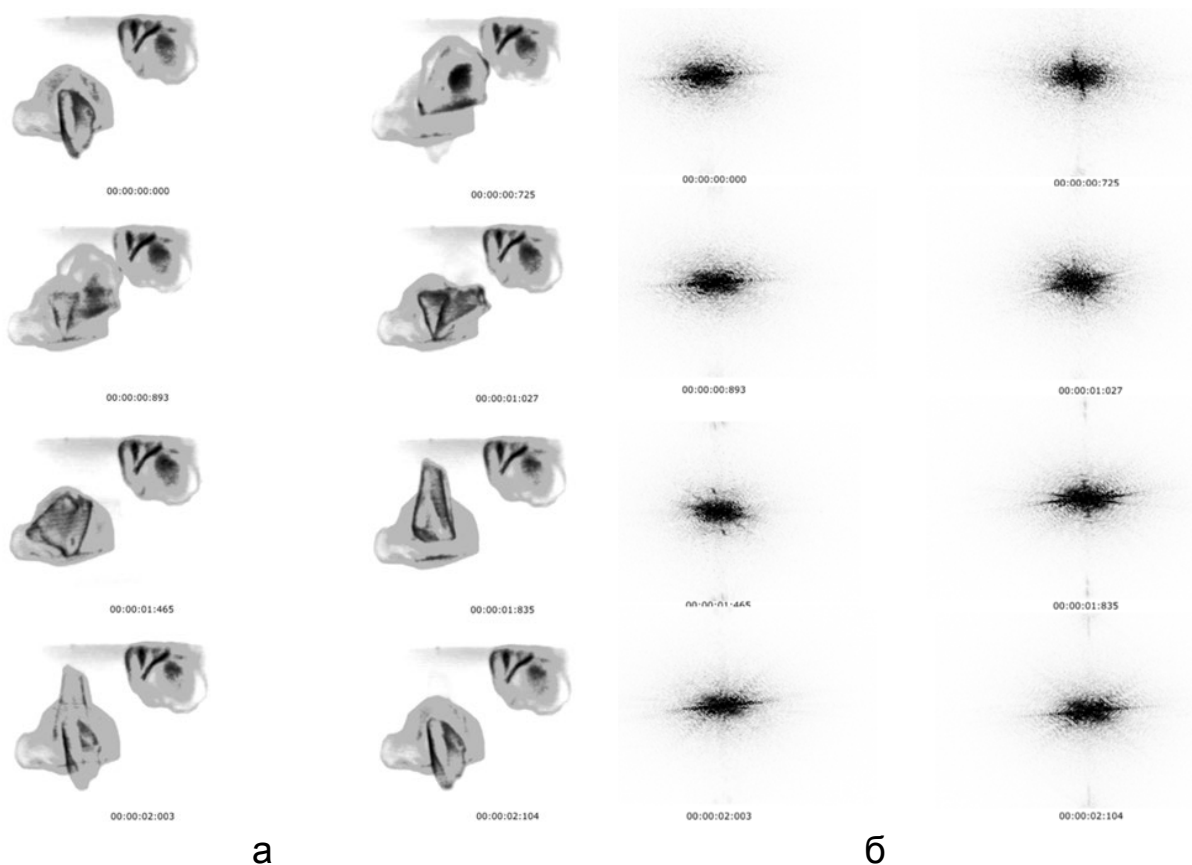


Рис. 1: Вращение модельной песчинки: а- серия микрофотографий; б - двумерные Фурье-спектры (2D FFT), снятые с ПО QAVIS.

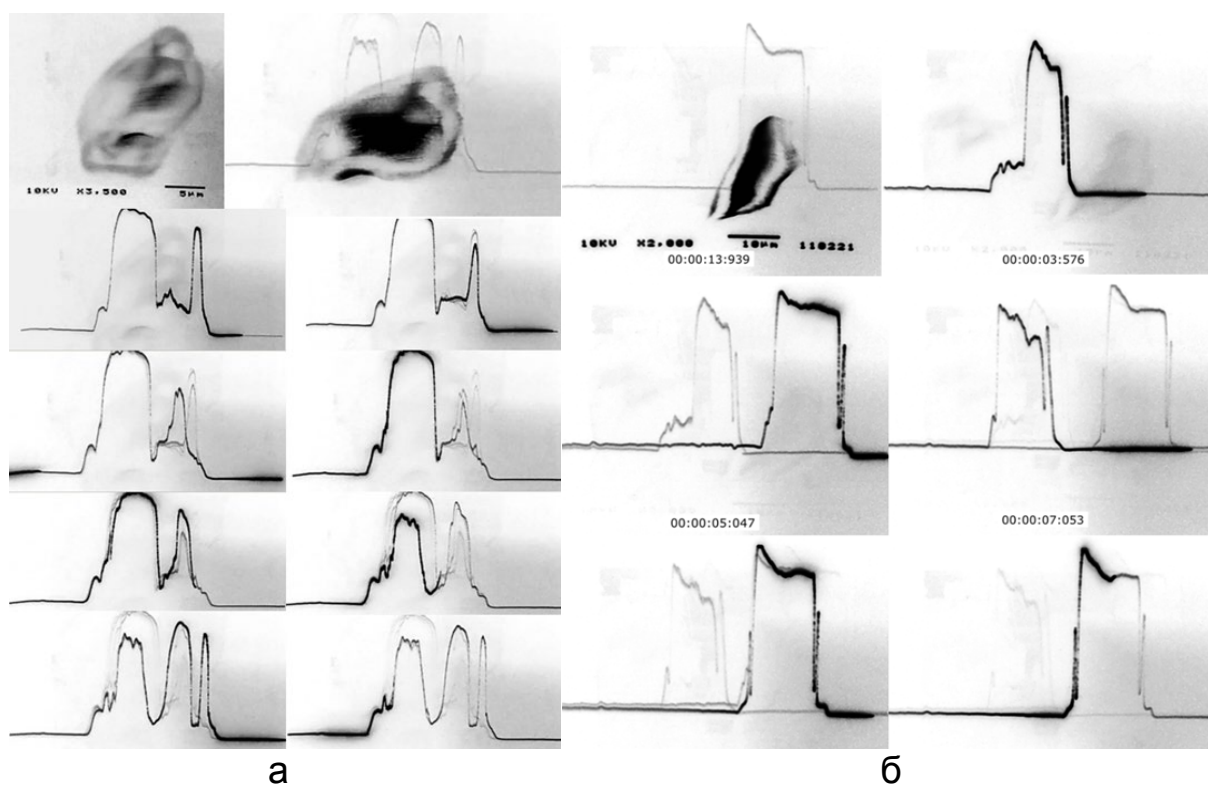


Рис. 2: Осциллограммы динамики модельной песчинки: а - ротация с промежуточными фазами; б - резкое перемещение в пространстве.

Созданные подходы могут иметь значение для геологии также в целях исследования механизмов извлечения отдельных минералов из песков (классический пример, известный с работ R. Collings 1960-х гг. - извлечение пирита из потсдамских песков и работы 2000-2010-х гг. A. Oberrauner и H. Flachberger по электростатической сепарации комплексных кварцево-полевошпатных песков) электростатическим методом. В геобиологическом и геомикробиологическом аспекте они могут применяться в анализе и моделировании электростатических эффектов песчаных / пылевых бурь, воздействующих на вегетацию растений и физиологические процессы, а также на микробиоту почв в ходе выветривания [Li & Zhao, 2012]. Аналогичное касается задачи исследования адгезии и рекомбинации вирусных частиц на песках с разным зарядом, что имеет как геомикробиологическую, так и явную геоэпидемиологическую значимость [Redman et al., 1997]. В аспекте астроминералогии и геохимии экзопланет представляет интерес ряд явлений электростатической агрегации песчаных гранул на Марсе (в том числе в дюнах Багнольда на Марсе), впервые описанных в 1980 г. в Reports of Planetary Geology Program Маршаллом и др., а затем - в отчёте NASA CP-10074 (Ames Research Center, Moffett Field, CA) от 1991 г. (в частности - Д. Сентманом и Р. Личем). По сути, становится возможным моделировать поведение песчаных частиц или реголита под действием наведенного электростатического поля (зарядки под пучком электронного микроскопа) в широком диапазоне условий - от глубокого космического вакуума или криовакуума (высоковакуумная электронная микроскопия / криомикроскопия - HVEM / CryoHVEM) до условий, близких к земным или экзопланетарным (в атмосферной и environmental растровой электронной микроскопии - ASEM / ESEM). Колокализация с данными WDXRS позволяет связать динамику или электростатическую зарядку с составом частиц, "сближая геофизику и геохимию" в исследованиях быстрой динамики песков / реголитов.

### **Литература**

1. Schmidt, D. S., Schmidt, R. A., & Dent, J. D. (1998). Electrostatic force on saltating sand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D8), 8997-9001.
2. Yue, G. W., Huang, N., & Zheng, X. J. (2003). Effect of irregular sand grains and electrostatic force on threshold wind speed. *Journal of Desert Research*, 23(6), 621.
3. Zheng, X. J., Huang, N., & Zhou, Y. (2006). The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud. *The European Physical Journal E*, 19(2), 129-138.

4. Yue, G. W., & Zheng, X. J. (2007). Effect of thermal diffusion and electrostatic force on evolution of wind-blown sand flow. *Applied Mathematics and Mechanics*, 28(2), 183-192.
5. Xie, L., Liu, Y., Zhou, C., Wang, M., Lacks, D. J., & Zhou, J. (2021). A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field. *Aeolian Research*, 50, 100675.
6. Zhang, H. (2024). Revisiting the effects of electrostatic forces on the lifting of sand particles in dust storms. *Journal of Electrostatics*, 127, 103880.
7. Elfimov, A., Gradov, O. V., Gradova, M. A., Maklakova, I. A., and Sergeev, A. I. (2025). Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents. *Advanced Structured Materials*, 221, 157–189.
8. Li, X. C., & Zhao, N. (2012). A Theoretical Analysis of the Effect of Wind-blown Sand Electrostatic Field on Vegetation Physiological Processes. *Journal of Desert Research*, 33(6), 1731-1734.
9. Redman, J. A., Grant, S. B., Olson, T. M., Hardy, M. E., & Estes, M. K. (1997). Filtration of recombinant Norwalk virus particles and bacteriophage MS2 in quartz sand: importance of electrostatic interactions. *Environmental science & technology*, 31(12), 3378-3383.

## TIME-RESOLVED SCANNING ELECTRON MICROSCOPY FOR SAND SALTATION MEASUREMENTS

**Gradov O.V., Maklakova I.A., Sergeev A.I.**

N.N. Semenov Federal Research Center of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences (FRC CP RAS), RF, Moscow, Kosygina 4

The role of electrostatics in providing sand saltations is known (including during the formation of dunes, as well as variations of sand flows in dust storms and sand clouds in aeology). Various electrostatic phenomena can be reproduced on sand grains in laboratory conditions in elementary experimental setups based on two electrodes and a high-speed camera. In this method, it is impossible to influence a single sand grain electrically and observe the dynamic phenomena accompanying saltations in which it participates (electrostatic multistability, reversible aggregation, rotation of sand (micro)particles etc.). We propose to use time-resolved scanning electron microscopy for this purpose, since in the column of a scanning electron microscope it is possible to program the potential difference/field strength by varying the accelerating voltage on the cathode. Examples of time-resolved microimages for the dynamics of calibrated "sand models" (with measured surface charge, porosity and morphometric distributions) are shown in four series of SEM microphotographs with 2D FFT spectra and oscillograms of model sand particle dynamics in this short paper.

## КАК ОТРАЖАЕТСЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ $M \geq 5$ НА ВАРИАЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ $\delta T$

<sup>1</sup>Григорян А.Г., <sup>2</sup>Канониди К.Х.

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), г. Москва,  
[ag-grig@ifz.ru](mailto:ag-grig@ifz.ru),

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения  
радиоволн им. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) г. Троицк,  
[kanonidik@gmail.com](mailto:kanonidik@gmail.com)

С целью изучения геодинамического процесса происходящие в земной коре при подготовке сильных землетрясений в разных сейсмоактивных районах Земли, были изучены вариаций переменного геомагнитного поля  $\delta T$ . Для оценки состояния геологической среды, которое отражается в изменениях переменного геомагнитного поля  $\delta T$ , применялась расчетный параметр  $N(A) = A_i / A_j$ , который является отношением амплитуд синхронно измеренных вариаций компонент  $\delta T$  поля вызываемых внешним источником, где  $A_i$  и  $A_j$  амплитуды вариаций измеренных на разных  $i, j$  пунктах. Как известно перед сильными землетрясениями в геологической среде меняется электропроводность, фактически меняются физические свойства пород. Расчетный параметр  $N(A)$  характеризует динамику изменение электромагнитной индукции (электропроводности) горных пород. Изменение физических свойств геологической среды, является одним из причин возникновения землетрясений.

Для получения более детальной информации об изменении электромагнитной индукции на разных горизонтах земной коры, помимо  $S_q$ - вариаций, были изучены также бухтообразные вариации ( $Db$ ) разных периодов компонент  $\delta Z$  и  $\delta H$ . Изучены вариации с периодами 10-25 мин, 30-60 мин, 60-90 мин. [Григорян, 2007].

Период геомагнитных вариаций показывает глубину проникновения поля вариаций

Расчёты показывали, что глубина проникновения поля вариаций для  $S_q$ -вариаций до 280 км, (5-25) минут 2-8 км, (30-60) минут 10-20 км [Безуглая и др., 1986].

Кроме расчетного параметра  $N(A)$  также был применен метод синхронной разности полного вектора магнитного поля  $\delta T$ .

Вариации переменного геомагнитного поля  $\delta T$ , зарегистрированные на поверхности земли  $\delta H^H$ , являются суммой составляющих:

$$\delta H^H = \delta H^e + \delta H^i$$

Для трех армянских станций оценена влияние  $\delta H^e$  поля в изменениях  $\delta H^H$ . В конечном счете, вопрос сводился к рассмотрению связи вариаций внешнего поля, с географической широтой и местным временем. Расхождение поля  $\delta H^e$  получилось минимальная и составляет  $\sim 0,7$  нТл. Расчеты проводились для Sq и бухтообразных вариаций [Григорян А. Г. 2007].

Оценки с учетом координат станций и уровня активности, позволяют принять, что временные изменения в  $N(A)_Z$  и  $N(A)_H$  (магнитоспокойные дни) за счет неоднородности или различия в  $\delta H^e$  для Sq и бухтообразных вариаций, не превышают 5 %. Можно принять, что изменения среднемесячных значений параметра  $N(A)$  за счет внешней составляющей  $\delta H^e$  в нашем случае не выходят за пределы,  $\pm 0,05$  от расчетных значений [Григорян А.Г. и др, 1999].

Исходя из этого можно предполагать, что неоднородность внешнего поля ( $\delta H^e$ ) не вносит заметных искажений в вариации переменного геомагнитного поля, регистрируемого на поверхности земли  $\delta H^H$ , следовательно и в параметр  $N(A)$ .

Используя все доступные нам данные наблюдения магнитовариационных станций, мы имели возможность изучить изменений электромагнитной индукции или электропроводности в земной коре, при подготовке сильных землетрясений Парванийского (1986 г.,  $M=5.4$ ); Спитакского (1988 г.,  $M=7.0$ )-Армения; Л, Акуилийского - Италия (06.04.2009,  $M=5.4$ ); Турецкого (23.11.2021,  $M=6,0$ ), 06.02.2023,  $M=7.8$ ).

При подготовке всех вышеуказанных землетрясений зафиксированы аномальные изменения в электропроводности земной коры.

Возникает вопрос, какие же процессы происходили в земной коре, в результате которых происходили такие изменения.

Быстрые изменения параметров среды, предполагается, что связаны прониканием в эту среду флюидов и газов- водорода и гелия [Киссин И.Г., 2016]. За счет проникновения и диффузии водорода и гелия в кристаллических структурах создается деформация и изменяются свойства горных пород. При выходе газов из кристаллических структур происходит восстановление параметров среды к почти начальному состоянию [Гуфельд И.Л., 2019]. (Рис.1).

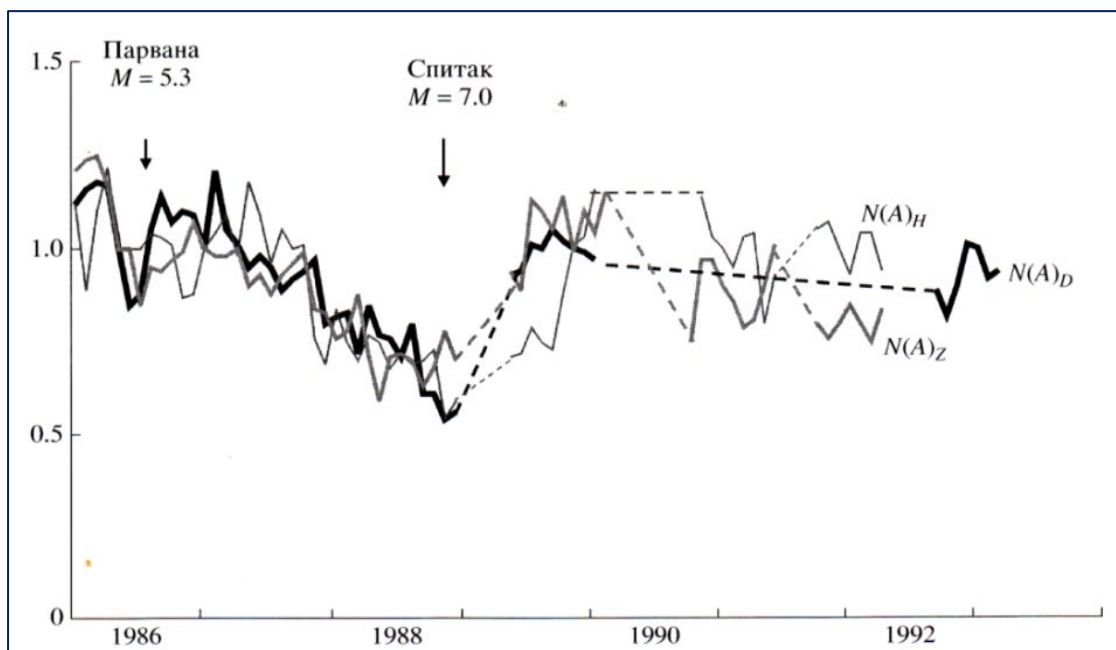


Рис.1. Изменение параметра  $N(A)$  для Sq вариаций компонентов  $\delta D$ ,  $\delta H$  и  $\delta Z$  геомагнитного поля  $\delta T$  между станциями Джрадзор - Товуз за 1986-1993 гг.

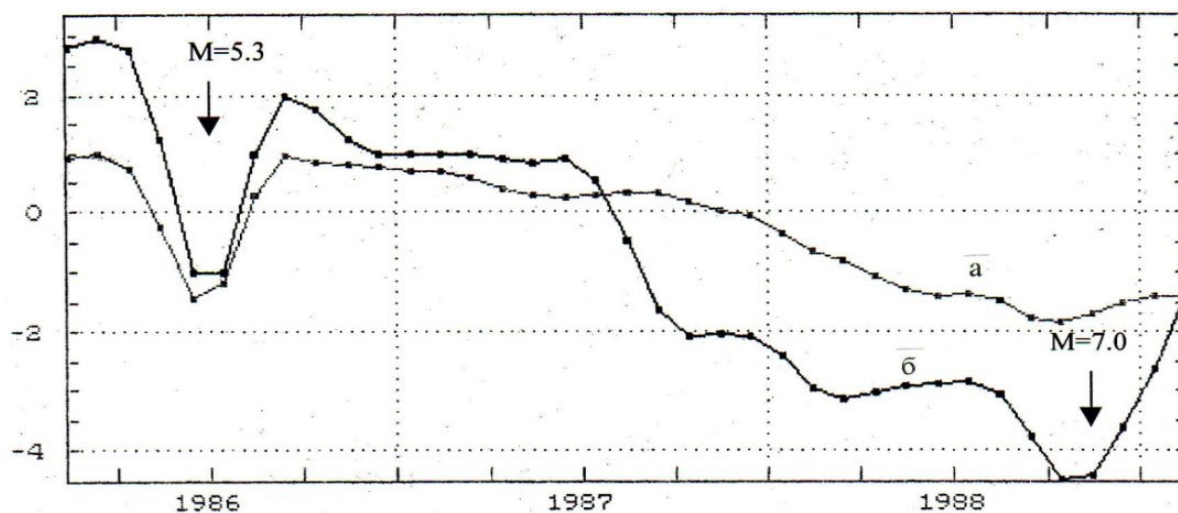


Рис.2. Сглаженные временные ряды среднемесячных значений синхронной разности  $\Delta \delta T$  между станциями Джрадзор и Товуз, для вариаций периодами а) 5-25, б) 30-60 минут за период 1986-1988 гг.

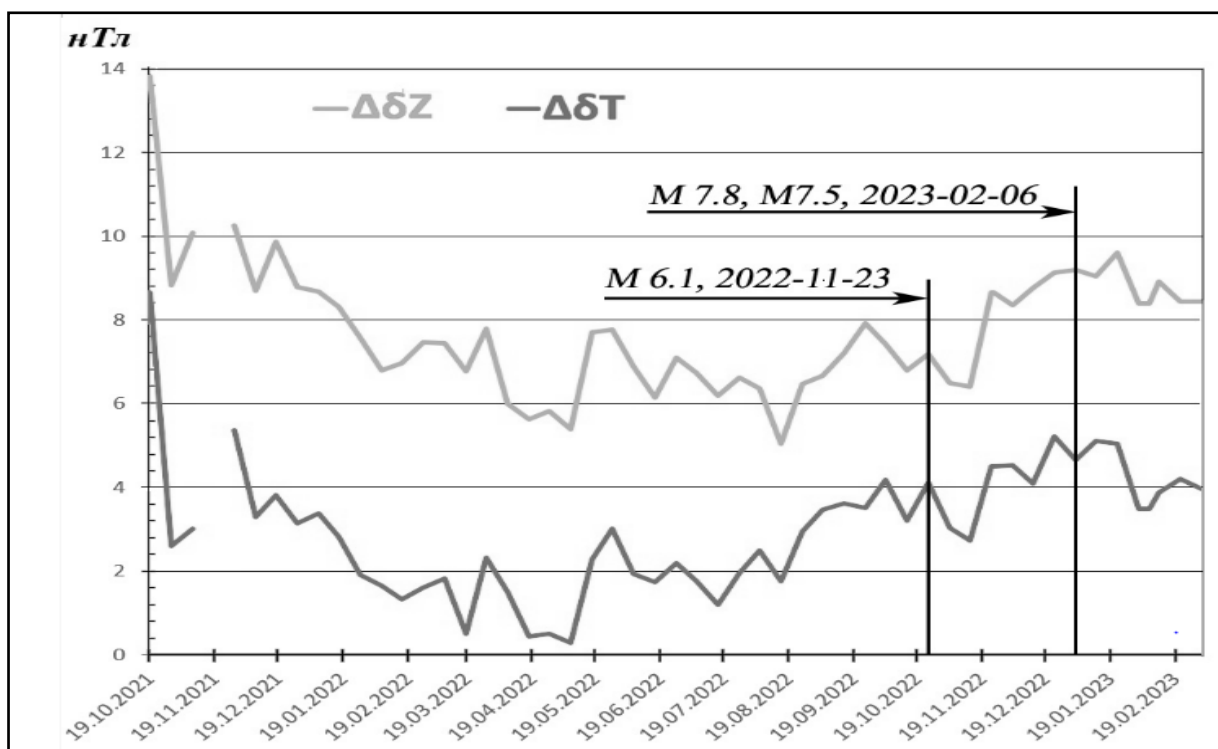


Рис.3. Синхронная разность компонент геомагнитного поля  $\delta Z$  и  $\delta T$  между станциями IZN (Турция) и GLK (Армения) за период 2021-2023 гг.

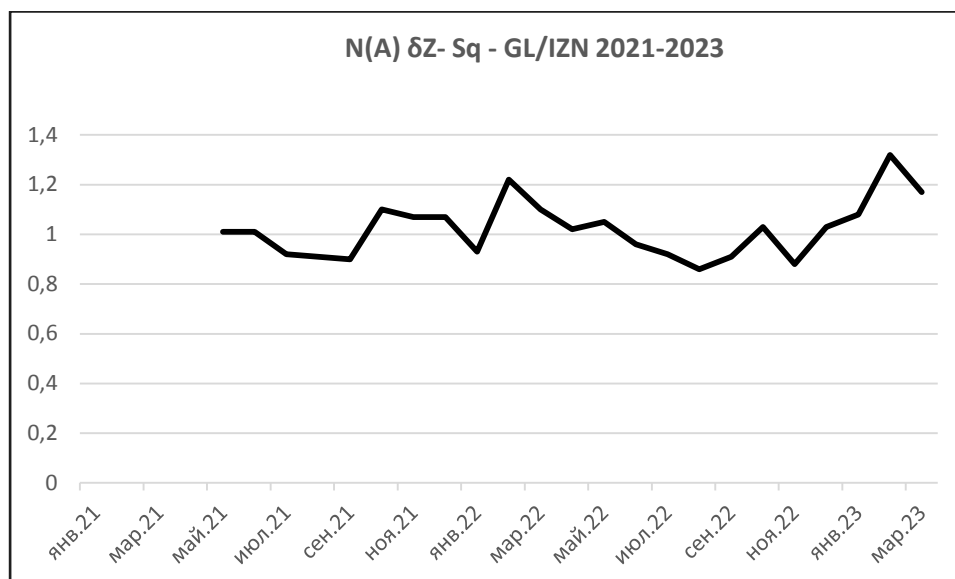


Рис. 4 Изменение среднемесячных значений расчетного параметра  $N(A)$  между станциями GL (Армения) и IZN (Турция) за период май 2021 – 2023 гг.



## Литература

1. Безуглая и др., Исследования прохождения геомагнитных вариаций с помощью модульных измерений на Душанбинском и Гармском полигонах Таджикской ССР. // В. кн.: Прогноз землетрясений, Ё 7, Душанбе; Дониш, 1986, с. 158-161.
2. Григорян А.Г. Изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения на примере Армении // Физика Земли, 2007. № 6. С. 88-95
3. Григорян А.Г. и др., Пространственно- временные изменения электромагнитной индукции в земной коре и верхней мантии на территории Армении.// Изд. Науки о Земле НАН РА, Труды научной конференции, посвященной 10-летию Спитакского землетрясения, по проблемам изучения землетрясений, Ереван, 27-28 октября 1998 г. спец. выпуск, Ереван, 1999, № 4 с. 28-29.
4. Гуфельд И.Л. Проявление дегазации в параметрах геологической среды // Сейсмическая опасность: предотвратить или предупредить. Издательство ООО «Сам Полиграфист», 2019.-98 с
5. Киссин И.Г. Флюидный режим очага и области подготовки землетрясения // Физика Земли. 2016. № 5. С. 102-119.

## HOW DOES THE PREPARATION OF STRONG EARTHQUAKES $M \geq 5$ AFFECT THE VARIATIONS OF THE VARIABLE GEOMAGNETIC FIELD $\delta T$

<sup>1</sup>**Grigoryan A.G.**, <sup>2</sup>**Kanondi K.K.**

<sup>1</sup>O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth (IFZ RAN), Moscow, [ag-grig@ifz.ru](mailto:ag-grig@ifz.ru),

<sup>2</sup>IZMIRAN Institute, Troitsk, [kanonidik@gmail.com](mailto:kanonidik@gmail.com)

In order to study the geodynamic process occurring in the earth's crust during the preparation of strong earthquakes in different seismically active regions of the Earth (Armenia, Türkiye, Italy), anomalous changes in variations of the local geomagnetic field  $\delta T$  were studied.

$A_j$  are the amplitudes of the variations measured at different  $i, j$  observation points.

Anomalous changes in  $S_q$  and bay-like variations from 10-60 minutes were studied.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

**Гуляев П.А., Николенко П.В.**

Национальный исследовательский технологический университет  
МИСИС (НИТУ МИСИС), Москва, [pavelgulaev722@gmail.com](mailto:pavelgulaev722@gmail.com)

Горные породы в естественных условиях залегания характеризуются наличием пространственного термического градиента, обусловленного геотермическим прогревом, при котором температура закономерно увеличивается с глубиной. Данный градиент, как правило, является стационарным во времени. Однако техногенная деятельность человека приводит к формированию нестационарных (изменяющихся во времени) термических полей. Такие ситуации возникают, в частности, после прохождения горной выработки и начала ее активной вентиляции, что вызывает постепенное охлаждение прилегающего массива пород, или при размещении в геологических формациях мощных локальных источников тепла, например контейнеров с радиоактивными отходами (РАО) [Дорофеев А.Н., 2017]. Контроль за распространением и эволюцией этих термических аномалий является критически важной задачей для обеспечения долгосрочной безопасности и прогнозирования состояния геологической среды.

Существующие методы мониторинга температуры имеют ряд существенных ограничений. Бесконтактные измерения с помощью тепловизоров возможны лишь на поверхностях обнажений или горных выработок. На глубине традиционно применяется термокаротаж, который, однако, предоставляет локальные данные только о температуре пород, непосредственно прилегающих к стенке скважины, и не позволяет оценить термическое состояние значительного объема массива между скважинами.

Перспективным направлением для преодоления этих ограничений является использование ультразвуковых методов. Известно, что упругие свойства горных пород, такие как скорости распространения продольных и поперечных волн и их затухание, находятся в тесной взаимосвязи с температурой [Hughes D.S., 1951]. Следовательно, контролируя изменения ультразвуковых параметров, можно дистанционно оценивать изменения термического состояния породного массива. Ключевым преимуществом ультразвукового прозвучивания является его интегральный характер — метод позволяет получать усредненную информацию о свойствах среды по трассе распространения волны, охватывая таким образом значительный объем породы. Однако на

сегодняшний день основным ограничением применения ультразвука можно считать относительно низкую чувствительность скоростей упругих волн к изменяющейся температуре пород. Одним из направлений преодоления указанного ограничения является использование специфических методов обработки сигналов, известных как интерферометрия на кодах волн (coda wave interferometry, CWI). CWI - высокоточный метод, использующий многократно рассеянные ультразвуковые волны для детектирования изменений в сложных средах, таких как горные породы и бетоны. Метод основан на анализе временных сдвигов и декорреляции волн в "хвостовой" части сигнала (коде), что позволяет отслеживать как обратимые (например, упругие деформации), так и необратимые (например, образование микротрещин) изменения [Azzola J., 2018].

На рис.1 приведено изображение специально разработанного лабораторного стенда для проведения многоканального ультразвукового прозвучивания в условиях нестационарного термического градиента.

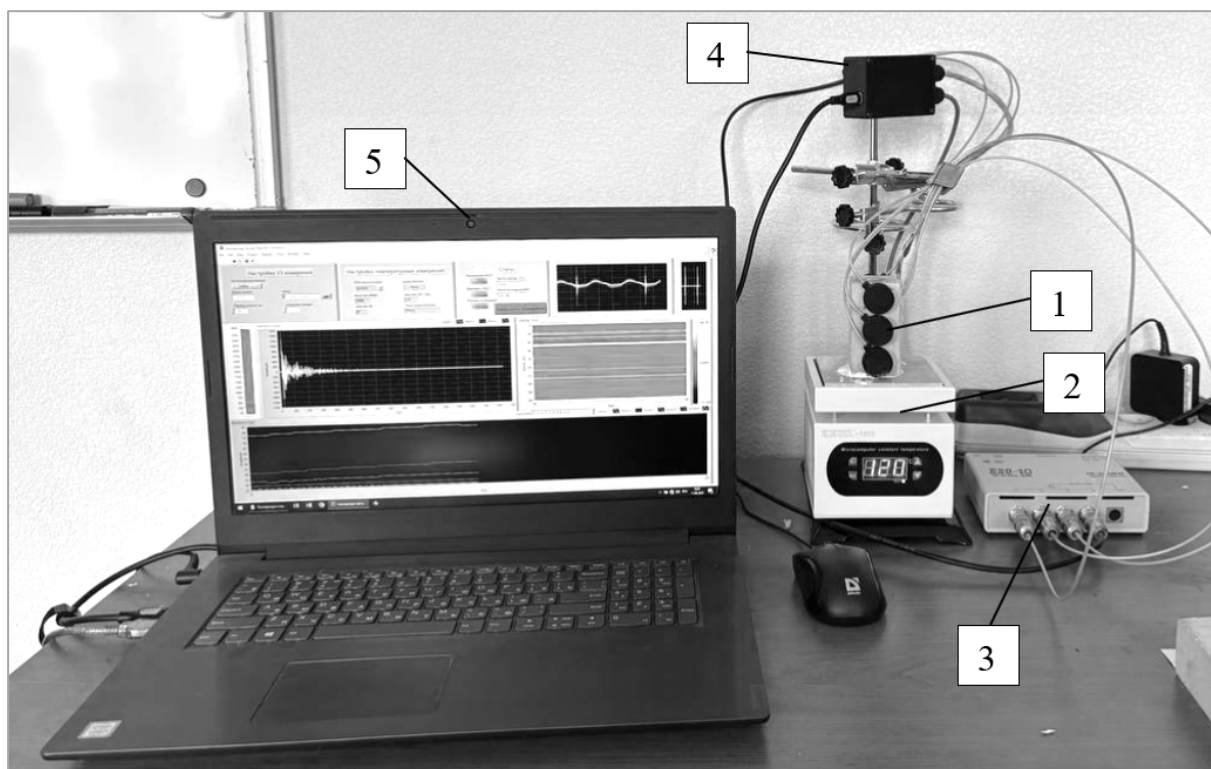


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки со снятым термоизолирующим кожухом: 1 – образец горной породы; 2 – нагревательное устройство; 3 – АЦП для ультразвуковых измерений; 4 – АЦП обработки термических измерений; 5 – управляющий компьютер.

Прозвучивание ведется на частоте 600 кГц тремя парами акустических преобразователей, расположенных на противоположных гранях образцов. Также на свободной грани образца закреплены 4 термистора для контроля температурного градиента в вертикальном направлении. Измерения температуры и регистрация волновых форм производится один раз в секунду. Нагрев осуществляется на нижнем торце образца до температуры 100°C. Верхний торец остается свободным.

На рис. 2 представлены примеры волновых форм, зарегистрированных при температурах 25 и 80°C, синхронизированные по первому вступлению.

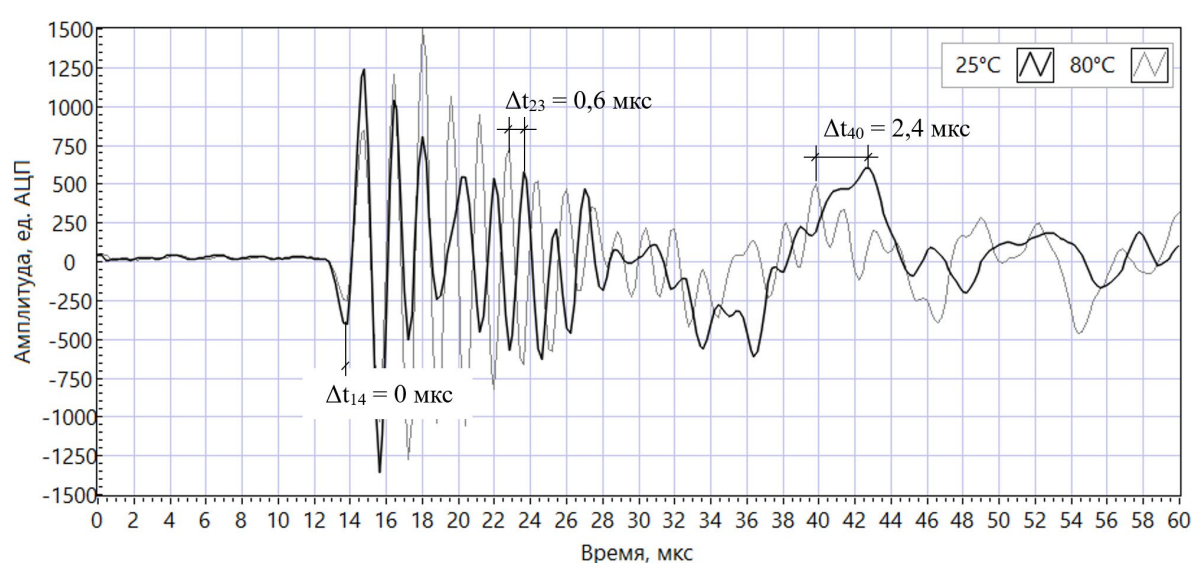


Рис. 2. Волновые формы сигналов, зарегистрированные при различных температурах образца доломита.

Из рис.2 видно, что увеличение температуры приводит к увеличению времен первых вступлений многократно рассеянных волн, информация о которых содержится в коде волны. С увеличением времени подобное отставание ( $\Delta t_i$ ) плавно увеличивается. Применяемый алгоритм CWI позволяет за счет корреляционной обработки увеличить чувствительность прозвучивания на величину до 20% [3].

Разработанный стенд позволяет с высокой точностью отслеживать пространственные и временные параметры термического градиента в образце как в результате прямых термических измерений на поверхности, так и с помощью многоканального ультразвукового прозвучивания. Применение алгоритма обработки сигналов, известного как интерферометрия на кодах волн позволяет дополнительно увеличить точность ультразвуковых измерений на десятки процентов.

## Литература

1. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С., Савельева Е.А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 34-43.
2. D.S. Hughes and J.H. Cross, (1951), "Elastic wave velocities in rocks at high pressures and temperatures," geophysics 16: 577-593.
3. Azzola J., Griffiths L., Schmittbuhl J. et al. Coda wave interferometry during the heating of deep geothermal reservoir rocks. Geotherm Energy 6, 21 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0107-2>
4. Николенко П.В., Зайцев М.Г. Экспериментальное исследование влияния нарушений сплошности на скорости упругих волн в напряженных образцах горных пород с использованием ультразвуковой интерферометрии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 70-79.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL GRADIENT PARAMETERS IN ROCKS USING ACOUSTIC INTERFEROMETRY

**Gulyaev P.A., Nikolenko P.V.**

National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, [pavelgulyaev722@gmail.com](mailto:pavelgulyaev722@gmail.com)

This study investigates thermal gradient parameters in rocks using ultrasonic methods, addressing limitations of traditional temperature monitoring techniques. We present a laboratory setup for multi-channel ultrasonic measurements under non-stationary thermal conditions, applying coda wave interferometry (CWI) to enhance sensitivity to temperature-induced changes. The results demonstrate that CWI significantly improves detection accuracy of thermal gradients, offering promising applications for monitoring geological environments affected by human activities, such as radioactive waste disposal sites or ventilated mine workings.

## ЛАВОВЫЕ ПЕЩЕРЫ НА ЛУНЕ

<sup>1</sup>**Гусев А.В.**, <sup>2</sup>**Мен Чжиго**

<sup>1</sup>Институт Геологии и Нефтегазовых Технологий (ИГиНГТ),  
Казанский Федеральный Университет (КФУ), Казань, Россия.

[agusev33@gmail.com](mailto:agusev33@gmail.com),

<sup>2</sup>Колледж геологоразведочных работ и технологий, Университет  
Цзилинь, Чанчунь, Китай. [mengzg@jlu.edu.cn](mailto:mengzg@jlu.edu.cn)

Реализация современных долгосрочных программ освоения Луны проектами Chang'E 1-8 (Китай), Chandrayan 1- 4 (Индия), Artemis 1-4 (NASA, США), Луна 26-28 (Россия) направлены на создание лунных баз и геологически-коммерческое освоение лунных недр. Краткая история освоение Луны китайскими коллегами [Changa, 2024].

Chang'E-1 обнаружил изотопы гелий-3 в лунном грунте, он безопасен, нет радиоактивных отходов, является топливом будущего. Использование 1 кг гелия-3 эквивалентно десяти тысячам тонн угля. Луна накопила его миллионы тонн за миллиард лет под воздействием солнечного ветра. Сорок тонн гелия-3 достаточно для покрытия потребности США в электричестве в течение 1000 лет.

Chang'E-2 составил топографическую карту Луны с метровой точностью и карту распределения гелия-3 на Луне, выбрал оптимальные зоны будущих посадок на Луну.

Chang'E-3 был оснащен георадаром, спектрометром и панорамной камерой. Питался от изотопного источника и работал в холодные ночи. Доставлен луноход Юйта-1 на видимой стороне Луны.

Chang'E-4 совершил фундаментальный прорыв на обратной стороне Луны, где нет помех с Земли и где сохранились древние геологические структуры: кратер фон Кармен, часть бассейна на Южном Полюсе-Эткин, открыл доступ к слоям верхней мантии Луны. Для связи с Землей был заранее запущен ретранслятор "Цюэцяо" в точку Лагранжа L2, установлена первая внеземная радиоантенна; доставлен луноход Юйта-2. Анализы грунта показали высокую концентрацию титана, железа и редкоземельных металлов.

Chang'E-5 привез лунный грунт около 2 кг на Землю с атомами гелия-3, найден новый минерал Changesite-Y, обнаружено импактное загадочное стекло, образованное при метеоритном ударе. Его химический состав подтвердил наличие материала мантии, выброшенного на поверхность Луны. Научная биосфера опытов на Луне с семенами и яйцами насекомых успешно проведена: впервые на Луне пророс хлопок, доказывая возможность выращивать растения при слабой лунной гравитации.

Главное: данные георадара показали подповерхностные лавовые пещеры с шириной до двух км и длиной более 50 км. Высота их сводов достигает 300 метров! Внутри пещер поддерживается постоянная температура + 17<sup>0</sup> С. В пещерах можно строить целые населенные города.

Chang'E-6 привез около 2 кг лунного грунта с обратной стороны Луны, добытого с 2-метровой глубины. Эти образцы оказались самыми молодыми породами на Луне, возрастом 2 млрд. лет. Концентрация гелия-3 на Луне подтвердила возможность промышленной добычи: из тонны реголиты можно получить до 20 граммов изотопа гелия-3, чего достаточно для работы десяти мегаваттного реактора в течение года [Гусев, Менг, Пинг, 2024]

На Луне существуют разнообразные полезные ископаемые в значительном количестве для коммерческой добычи и транспортировке их на Землю, в том числе и такие как редкие и редкоземельные металлы: платина, никель, кремний, кобальт и другие (до 14 млн тонн). Прогнозируемая интегральная стоимость лунных ресурсов достигает 16 квадриллионов долларов [Гусев, Менг, Пинг, 2024].

В настоящее время идут разработки методик промышленного получения металлов, кислорода и строительных материалов из лунного реголита; уточнены залежи водяного льда и инфраструктура пещер на Луне. Хотя ученые размышляли о возможности существования и использования внеземных пещер более 50 лет, сейчас мы вступаем в начальную фазу исследования и освоения планетарных пещер [Mei, Liu, Gusev, 2024]. В докладе дается обзор геологического происхождения, истории исследований и мест распространения лунных лавовых пещер на Луне. Подробно рассматриваются четыре отличительных преимущества и типичные концепции строительства баз внутри лавовых пещер, а также обобщаются наземные попытки строительства баз на основе лунных лавовых пещер [Horvath, 2022].

Лунные лавовые пещеры – это особые подземные пещеры, образованные вулканическими извержениями, которые считаются идеальными естественными убежищами и научными лабораториями для строительства лунных баз. Пещеры важны, поскольку они предоставляют записи геологической, метеорологической и экологической истории планетарных тел Солнечной системы.

Пещеры на Луне могут защитить исследователей от вредной и негостеприимной поверхностной среды, космических лучей и вспышек на Солнце. Земля представляет из себя самый высокий уровень исследований и знаний о пещерах. За пределами Земли идентификация возможных пещер наиболее продвинута для Луны, с сотнями задокументированных потенциальных входов в пещеры и несколькими предложенными концепциями миссий по исследованию пещер. На сегодняшний день каталогизировано 2660 пещер на восьми планетарных телах (исключая Землю) Солнечной системе: Тритон (3 пещеры), Харон (1 пещера), Титан (1297 пещер), Луна (221 пещера), Марс (1036 пещер), Энцелад (100 пещер). [Гусев, Менг, Пинг, 2024].

До сих пор большинство входов в планетарные пещеры, световых люков и ям обрушения были обнаружены с помощью стандартной

дистанционной контекстной визуализации. На Земле входы в пещеры можно идентифицировать с помощью комбинированного теплового, видимого и сейсмического подходов. Такие подходы должны быть дополнительно уточнены и расширены для обнаружения пещер и на других планетарных телах. Сочетание этих методов с орбитальными подповерхностными геофизическими методами, включая радар, сейсмику и гравиметрию, может обеспечить оптимальные достижения в идентификации пещер. Однако для проведения более широкой инвентаризации входов в пещеры для всей Солнечной системе необходимы дополнительные орбитальные космические аппараты с датчиками, способными точно определять эти геологические особенности [Meng, Sun, Gusev, 2024].

Наука о планетарных пещерах имеет потенциал для значительного расширения и обеспечения исследований в течение следующего десятилетия. На Земле аналоговые, технологические исследования и разработки будут иметь первостепенное значение. Эти системы могут использоваться как для обнаружения, так и для характеристики входа в пещеры. Для луноходов незаменимыми будут приборы, пригодные для космических полетов, способные определять входы в пещеры и их внутреннюю структуру [Гусев, Менг, Пинг, 2024].

Для Луны и Марса миссии в ближайшем будущем (годы или десятилетия) достижимы при условии соответствующих инвестиций в разработку робототехники. В частности, для достижения требуемой технической зрелости обсуждаемые сейчас платформы должны быть разработаны до статуса, пригодного для реального полета. Применяя дорожную карту и продвигая ключевые технологии, мы сможем исследовать планетарные недра— одну из самых многообещающих потенциально пригодных для жизни сред на Луне и планетах Солнечной системы [Feng, 2024].

В работе итальянских авторов анализируются радиолокационные изображения кратера Моря Спокойствия – эллиптического светового люка с вертикальными или нависающими стенами и наклонным дном, которое простирается дальше под лунный грунт. Обнаружено, что часть радиолокационных отражений можно отнести к подземному пещерному каналу длиной в десятки метров [Carrer, 2024].

## **Литература**

1. Changa W., Meng Z.G, Gusev A.V. et al. “Planning a lunar long-term research station in MARE SMYTHII”. Proc. of IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, July 7-12, 2024, p.1-4.
2. Mei, L., Liu, C., Shi, Y., Cai, Z., Gusev, A.V., “Complex Deposits in Lacus Moritis demonstrated by Ce-2 MRM Data. Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS, 2024), Athens, Greece, July 7-12, 2024, p. 6150–6153.



3. Horvath, T., Hayne, P. O., Paige, D.A. Thermal and illumination environments of lunar pits and caves: Models and observations from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Geophysical Research Letters*, V.49, (2022), e2022GL099710.
4. Meng, J.G. Sun H., Gusev A.V. et al., Thermophysical properties of surface deposits in Tsiolkovskiy crater and its geologic significance revealed by CE-2 MRM data. *Icarus*, V.408, Jan 15, 2024, P. 115808.
5. Гусев А.В., Менг Ж., Пинг З., Строительно-прорывное освоение Луны VIII: 3D печать на Луне. Материалы 59-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. РАН - РАКЦ. Секция «Проблемы ракетной и космической техники», 17-19 сентября 2024г, г. Калуга, с.164-168.
6. Гусев А. В., Менг Ж, Пинг З. Глобальные и локальные магнитные поля Луны. Материалы двадцать пятой международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». ГЕОХИ РАН, ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН и Борок, 30 сент. - 5 окт., 2024 г., Москва-Борок, 2024, с.78-82.
7. Гусев А.В., Менг Ж., Пинг З., Лунное время и лунная навигация. «Современные проблемы ракетной и космической техники». Сборник статей, Казань: редакционно-издательский центр «Школа», 2024. стр.115-124. ISBN 978-5-00245-215-6.
8. Feng Y., Pan P-Z, Tang X, et al. A comprehensive review of lunar lava tube base construction and field research on a potential Earth test site. *Int. Journal of Mining Science and Technology*: v.34 (2024) p. 1201–1216.
9. Carrer L., Pozzobon R., Sauro F. et al., Radar evidence of an accessible cave conduct on the Moon below the Mare Tranquillitatis pit. *Nature Astronomy*, vol.8, Sept. 2024, p. 1119-1126.

## LAVA CAVES ON THE MOON

<sup>1</sup>**Gusev A.V.**, <sup>2</sup>**Meng Zhiguo**

<sup>1</sup>Institute of Geology and Oil & Gas Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia, [agusev33@gmail.com](mailto:agusev33@gmail.com).

<sup>2</sup>College of Exploration and Technology, Jilin University, Changchun, China, [mengzg@jlu.edu.cn](mailto:mengzg@jlu.edu.cn)

The review examines scientific, technical, infrastructure-breakthrough, industrial and construction problems of developing quarries, pits and caves on the Moon.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕГИДРАТАЦИИ  
КАЛЬЦИЕВОГО АМФИБОЛА ПРИ  $T=900-1150^{\circ}\text{C}$  И ДАВЛЕНИИ  $P_{\text{H}_2\text{O}}$   
ДО 300 БАР

<sup>1</sup>Девятова В.Н., <sup>1</sup>Некрасов А.Н., <sup>1</sup>Воронин М.В., <sup>1</sup>Дрожжина Н.А.,  
<sup>2</sup>Щербаков В.Д., <sup>1</sup>Симакин А.Г.

<sup>1</sup>Институт Экспериментальной Минералогии РАН (ИЭМ РАН),  
Черноголовка, [dev@iem.ac.ru](mailto:dev@iem.ac.ru)

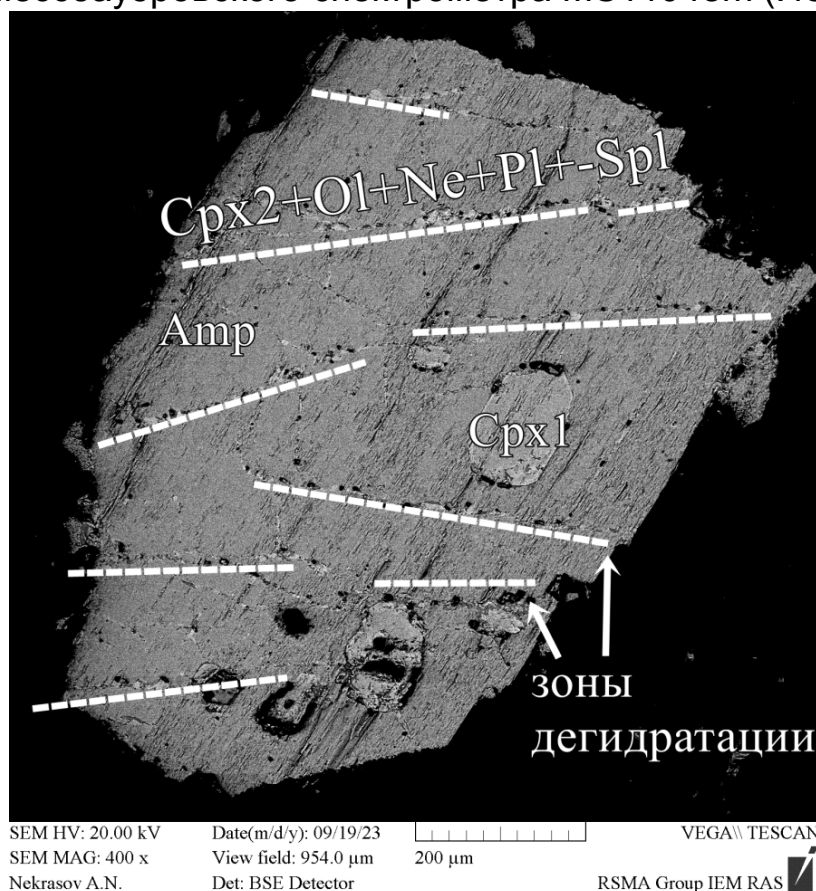
<sup>2</sup>Московский государственный университет им М.В. Ломоносова,  
геологический факультет, (МГУ), Москва

Экспериментально исследован один из возможных механизмов образования опациitized амфиболов – дегидратация. Р,Т-параметры неустойчивости амфибола хорошо известны по ряду экспериментальных работ [Veblen; Ribbe, 1982]. Реакция дегидратации  $\text{Amp} = \text{Cpx} + \text{Pl} \pm \text{Ne} \pm \text{Ol} \pm \text{Opx} + \text{Mag} \pm \text{Ilm} + \text{H}_2\text{O}$  для чистых минералов удовлетворительно описывается с помощью термодинамических функций. Несмотря на длительное изучение этих цепочечных силикатов при исследовании природных опациitized амфиболов сохраняется вопрос о способе их формирования [Rutherford, Hill, 1993; Buckley et al., 2006; Плечов и др. 2008; DeAngelis et al. 2015]. Задачей исследования было изучение механизма дегидратации и выявление признаков разложения амфибола.

Опыты проводились в условиях постоянной фугитивности кислорода при температурах  $T=900-1150^{\circ}\text{C}$  и давлении  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  до 300 бар. В экспериментах использовались природные кристаллы титанистого калиевого паргасита м-я Колонна (Шри-Ланка) (Ti-Prg):  $(\text{Na}_{0.66}\text{K}_{0.35})(\text{Ca}_{1.94}\text{Na}_{0.66})(\text{Mg}_{3.18}\text{Fe}^{\text{II}}_{0.51}\text{Fe}^{\text{III}}_{0.35}\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.56})(\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{23})(\text{OH})_{1.6}$ , любезно предоставленные гл. геологом музея “Самоцветы” Лисицыным Д.В. Работы велись на установке высокого газового давления УВГД-10000. Несколько десятков кристаллов амфибола, размером 1-2 мм закладывались в золотые ампулы, добавлялась вода и ампулы заваривались.

Первичные амфиболы и продукты опытов были исследованы с помощью SEM-EDS анализа (Tescan VEGA II XMU (ИЭМ РАН)), проведены рентгеновские исследования (D2 PHASER (ИЭМ РАН)). Содержание воды в продуктах опытов исследовалось с помощью кулонометрического титрования по методу Карла Фишера на приборе AQUA 40 (ИЭМ РАН), спектры комбинационного рассеяния воды были сделаны на спектрометре RM1000 с CCD камерой (ИЭМ РАН), и на конфокальном рамановском спектрометре JY Horiba

XPlora Jobin (МГУ). Мессбауэровская спектроскопия проведена с помощью мессбауэровского спектрометра MS1104em (ИЭМ РАН).



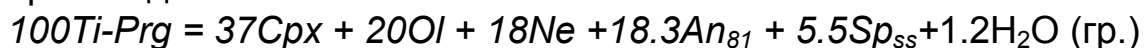
**Рис.1.** BSE-фотография кристалла амфибола после опыта при  $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{H}_2\text{O}}=260\text{ бар}$ ,  $t=40\text{ дней}$ . Белым пунктиром подчеркнуты зоны разложения (дегидратации) амфибола толщиной более 5-10 мкм.. *Amp*-амфибол, *Cpx1* – реликтовый первичный клинопироксен, *Cpx2* – новообразованный в результате разложения амфибола клинопироксен, *Ne* – нефелин, *Pl* – плагиоклаз, *Spl* –шпинель.

Установлено, что потеря воды из амфибола происходит за счет двух различных процессов - дегидрирования и дегидратации(разложения). Дегидрирование сопровождается окислением двухвалентного железа амфибола, для исследованного амфибола преимущественно в октаэдре M1, выделением водорода и появлением окси-компоненты в составе амфибола. Замещение гидроксильной группы на анион  $\text{O}^{2-}$  в позиции (O3) [Popp 1985; 2006] происходит по реакции:



За сутки реакция приходит к равновесному состоянию. Зональности по макрокомпонентам в дегидрированном амфиболе не обнаружено.

Дальнейшая потеря воды происходит путем дегидратации (разложения). Реакция протекает в объеме амфибола, часто локализована по плоскости спайности амфибола (110), реже на контакте с минералом-вростком, крайне редко от границы зерна. На основании изученных продуктов областей распада реакция происходит по схеме:



По полученным данным дегидратация происходит на фоне постоянного содержания в реликтовом амфиболе трехвалентного железа и воды. Для изученного амфибола дегидратация протекает при содержании воды  $C_{\text{H}_2\text{O}} = 1.2 \pm 0.12$  мас.%. Зональность по воде и макрокомпонентам в амфиболе центр-край, плоскость распада в опытах 40 дней не обнаружена. Мощность зон распада за 40 дней составили 5-10 мкм.

Процесс дегидратации (разложения) амфибола протекает с гораздо меньшей, нежели при дегидрировании, скоростью. Исключением служит высокотемпературный процесс при температурах, приближающийся к инконгруэнтному плавлению амфибола [Девятова и др. 2024]. Образование и разрастание зон до 50-100 мкм дегидратации/плавления происходит за минуты. Самоплавление амфибола, также как и дегидратация, происходит в объеме амфибола, преимущественно разрастаясь от плоскостей спайности.

*Работа выполнена за счет средств, выделяемых из бюджета на исследования, ведущиеся в рамках темы Государственного задания ИЭМ РАН FMUF-2022-0004*

## Литература

1. Девятова В.Н., Некрасов А.Н., Бондаренко Г.В. (2024) Экспериментальное изучение устойчивости паргасита  $\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}](\text{OH})_2$  при  $T = 1000\text{--}1100^\circ\text{C}$  и давлении до  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 5$  кбар // Геохимия. 69(2) С.49-65.
2. Плечов П.Ю., Цай А.Е., Щербаков В.Д., Дирксен О.В. (2008) Роговые обманки в андезитах извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный и условия их опацификации // Петрология. 16(1), С.21-37.
3. Buckley V.J.E., Sparks R.S.J., Wood, B.J. (2006) Hornblende dehydration reactions during magma ascent at Soufrière Hills Volcano, Montserrat // Contrib. Mineral. and Petrol. 151(2), P.121-140.

4. De Angelis S.H., Larsen J., Coombs M., Dunn A., Hayden L. (2015) Amphibole reaction rims as a record of pre-eruptive magmatic heating: an experimental approach // *Earth Plan. Sc. Lett.* 426, P.235-245.
5. Popp R.K., Virgo D., Yoder Jr.H.S., Hoering T.C., Phillips, M.W. (1995) An experimental study of phase equilibria and Fe oxy-component in kaersutitic amphibole: Implications for the  $f_{H_2}$  and  $a_{H_2O}$  in the upper mantle // *Am. Miner.* 80(5-6) P.534-548.
7. Rutherford M.J., Hill P.M. (1993) Magma ascent rates from amphibole breakdown: an experimental study applied to the 1980–1986 Mount St. Helens eruptions // *J. Geophys. Research: Solid Earth.* 98(B11), P.19667-19685.
7. Veblen D.R., Ribbe P.H. (ed.)(1982) Amphiboles: petrology and experimental phase relations // *Reviews in mineralogy.* 9B. 390 p.

EXPERIMENTAL STUDY OF DEHYDRATION OF CALCIUM AMPHIBOLES AT T=900–1150 °C AND P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> PRESSURE UP TO 300 BAR

<sup>1</sup>Devyatova V.N., <sup>1</sup>Nekrasov A.N., <sup>1</sup>Voronin M.V., <sup>1</sup>Drozhzhina N.A., <sup>2</sup>Shcherbakov V.D., <sup>1</sup>Simakin A.G.

<sup>1</sup>Institute of Experimental Mineralogy of the Russian Academy of Sciences (IEM RAS), Chernogolovka, [dev@iem.ac.ru](mailto:dev@iem.ac.ru)

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty (MSU), Moscow

The mechanism of formation of opacitized amphiboles – dehydration – was experimentally studied. The parameters of P,T instability of amphibole are known (Review in mineralogy, 1985). The dehydration reaction  $Amp = Cpx + Pl \pm Ne \pm Ol \pm Opx + Mag \pm Ilm + H_2O$  is satisfactorily described using thermodynamic functions. However, when studying natural opacified amphiboles, the question of their formation method remains open [Rutherford, Hill, 1993; Buckley et al., 2006; Plechov et al., 2008; DeAngelis et al., 2015]. The aim of the study was to investigate the dehydration mechanism and identify signs of amphibole decomposition.

## О ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ГОРНЫХ ПОРОД В ЭКСПЕРИМЕНТАХ

**Дьяур Н.И., Пономарев А.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук,  
(ИФЗ РАН), г. Москва, [dyaaur@ifz.ru](mailto:dyaaur@ifz.ru)

В большинстве экспериментов по деформированию горных пород отбирают образцы без видимых дефектов и доводят их до разрушения, сопровождая измерением физических свойств.. Интерес к области запредельного деформирования появляется при изучении физического состояния очаговой зоны землетрясения или, например, зоны гидроразрывов при извлечении углеводородов в нетрадиционных месторождениях, или трещиноватых зон для гидротермальной теплоэнергетики, или в горном деле и т.д.. Такие работы могли бы быть полезными для прогнозирования состояния горных пород или массивов после землетрясений или для прогноза вероятности катастрофических событий. Если рассматривать область запредельного деформирования образца как процесс от начала пластической деформации до разрушения (формирования разрыва), то эта часть давно уже является самой интересной с точки зрения исследования явлений, сопровождающих разрушение горных пород. Наш интерес распространяется еще и на более поздние по времени процессам, происходящим в разрушенной горной породе. Более углубленное исследование запредельной области в горных породах может способствовать, например, изучению механизма формирования сейсмических брешей [Федотов 1965], что, на наш взгляд, необходимо для уточнения прогнозных оценок, которые используются для сейсмогенных регионов.

Запредельному деформированию, которым принято считать короткий период, от начала пластической деформации до разрушения образца, посвящены многие эксперименты по поиску предвестников разрушения по разным физическим свойствам, или по особенностям их изменения перед разрушением. Главные причины появления аномальных свойств перед разрывом в экспериментальных условиях связаны с процессами уплотнения, трещинообразования и изменения напряженного состояния. В данной работе мы пытаемся продолжить наблюдения после разрушения в период разгрузки или повторного нагружения разрушенного образца.

**Эксперименты.** Материалы по экспериментам использовались из наших предыдущих работ, выполненных при циклических

осевых нагружениях в условия различных внешних напряжений ( в камере) от 0.01 до 35 МПа [Пономарев А.В. и др., 2021, Дьяур Н.И и др., 2024]. У части образцов сохранялись условия для контролируемого нагружения сразу после разрыва и сброса напряжения. Для большинства случаев осевое напряжение падало до уровня примерно от 0.9 до 0.3  $\sigma_{1max}$ ., а для небольшой части – до 0. Продолжая движение пуансона с заданной скоростью, можно было наблюдать некоторое повышение напряжения и его падение (Рис. 1а) или переход в псевдопластическую деформацию, которая в данном случае характеризовалась приростом деформации без изменения уровня напряжения. В этом случае, чтобы не доводить до сильного разрушения, мы переключали движение нагружающего пуансона на противоположное, таким образом снижая напряжение и деформацию образца.

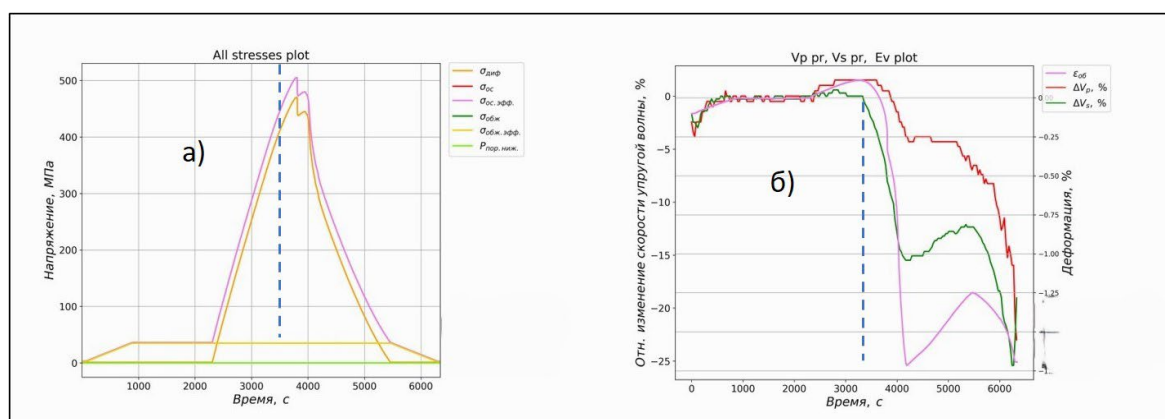


Рис.1. Вариант эксперимента с изменением осевого напряжения (а), объёмной деформации  $\epsilon_v$  и скоростей  $\Delta V_p$  и  $\Delta V_s$  (б) от времени, в упругой и запредельной области деформирования (разделены пунктирной линией) в образце, при внешнем давлении 35 МПа.

Скорость деформации была в диапазоне  $2 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  в разных экспериментах, а при нагружении и разгрузке оставалась постоянной. После разрушения знак деформации менялся на противоположный автоматически или по решению оператора. Измерения деформаций  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_v$ , а так же осевого напряжения  $\sigma_1$  и скоростей объёмных волн **P** и **S** а также параметр **Vp/Vs** продолжалось с такой же частотой и за пределом прочности. Обычно деформации регистрировались с интервалом в 1 с, а времена распространения волн через 30 с или 60 с.

В условиях земной коры после землетрясения продолжается сейсмическая активность и затухает не сразу, проявляясь в

афтершоках. Прямой аналогии между экспериментальными данными и процессами сейсмичности в природе не может быть, но есть подобие по части механических разрушений, изменений упругих и прочностных свойств. В эксперименте невозможно ввести временной фактор восстановления упруго-прочностных свойств горных пород который должен действовать в конкретных геолого-геофизических и прогнозируемых термодинамических условиях сейсмогенного региона. В природе, где не останавливаются физико-химические процессы, через какое-то время  $t_i$  на стенках микротрещин и трещин разной аппертуры может образоваться тонкий слой из минерала-заполнителя или нескольких минералов, состав которых будет зависеть от термодинамических условий и флюида. Со временем микротрещины и трещины будут заполняться (залечиваться) и физические свойства горных пород, в том числе деформационно-прочностные, будут восстанавливаться, в какой-то степени приближаясь к исходным до разрушения, или землетрясения. Вероятно, может восстановиться и способность массива аккумулировать упругую энергию для формирования нового очага землетрясения

**К выводам.** На данном этапе представлена часть экспериментальных данных запредельного (после разрушения) деформирования, с участками возрастания напряжения и изменение скоростей упругих волн после основного события. Это часть, насколько нам известно, является менее изученной в экспериментах по целому ряду причин, таких как частичное нарушение сплошности среды, затухание волн и ухудшение условий для регистрации сигналов.

Сразу после главного события (разрушения в образце) напряжение больше не достигает максимального в эксперименте. Скорости упругих волн остаются всегда ниже достигнутых в эксперименте (Рис. 1б), а их изменение перед новым сбросом напряжения, в связи с повышением осевого напряжения на фоне общего снижения, не всегда выражены однозначно. Это может быть связано с отсутствием процессов залечивания трещин и микротрещин за короткий период времени. В земной коре на залечивание трещин может потребоваться от десятков до сотен и тысяч лет, в зависимости от геологических условий и состава флюидов. В этом направлении необходимо продолжить исследования.



*Исследование выполнено в рамках гос. задания ИФЗ РАН, в Центре коллективного пользования ИФЗ РАН.*

### **Литература.**

1. Федотов С. А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Японских островов. 1965, Труды Института физики Земли АН СССР № 36 (203), с. 66-93
2. Пономарев А.В., Дьяур Н.И., Арора К., Фокин И.В., Леонова А.М., Егоров Н.А., Смирнов В.Б., Баяк И.О., Баженова Г.Н. Упругие свойства гранитоидов сейсмогенной зоны Койна-Варна при многостадийном нагружении. // Материалы XXII международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 2021, М. ИГЕМ РАН Москва, с. 204-208
3. Дьяур Н.И., Пономарев А. В., Фокин И. В., Егоров Н. А., Чистякова А. В., Багдасарян Т. Э., Шарычев И. В. Трещинообразование в гранитоиде по данным скоростей упругих волн, акустической эмиссии и сканирующего электронного микроскопа. // Материалы XXIV международной конференции “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”. 2024, М.: ИГЕМ РАН, с. 83-86.

### **ON OUT-OF-LIMIT DEFORMATION AND PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS IN EXPERIMENTS.**

**Dyaur N.I., Ponomarev A. V.**

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow. [dyaur@ifz.ru](mailto:dyaur@ifz.ru).

Experimental data of out of limit (after destruction) deformation with areas of increasing stress and a change in the velocities of elastic waves after the main event with a general decrease in axial stress are presented. As far as we know, this part is less studied in experiments for a number of reasons, such as partial disruption of the continuity of the medium, attenuation of waves and deterioration of conditions for recording signals.

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД МАССИВА ЯРВА-ВАРАКА И ВМЕЩАЮЩИХ ГРАНИТОИДОВ (МОНЧЕГОСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА) – К ВОПРОСУ ОБ ИМПАКТНОМ ПРОИСХОЖДЕНИИ МАССИВА

<sup>1</sup>Ильченко В.Л., <sup>1</sup>Каулина Т.В., <sup>1</sup>Нерович Л.И., <sup>2</sup>Песков Д.А.

<sup>1</sup>Геологический институт Кольского научного центра РАН (ГИ КНЦ РАН), Апатиты, [v.ilchenko@ksc.ru](mailto:v.ilchenko@ksc.ru)

<sup>2</sup>Апатитский филиал Мурманского Арктического университета, Апатиты, [danylapple@gmail.com](mailto:danylapple@gmail.com)

Метеоритные кратеры обычно связаны с различными геофизическими аномалиями, при этом природа аномалий не всегда очевидна. Часть аномалий обусловлена структурными или тектоническими преобразованиями пород, часть связана с пост-ударными гидротермальными процессами, часть – с изменением петрофизических свойств пород и минералов [Pesonen, 2011, Maug et al., 2008]. Гравитационные и магнитные аномалии, среди прочих причин, зависят от петрографического типа пород мишени. Поэтому изучение петрофизических свойств пород (плотности, пористости, упругой анизотропии и т.п.) на известных астроблемах весьма полезно, поскольку эти данные помогают интерпретировать природу геофизических аномалий, исследовать влияние удара на физические свойства пород и используются при моделировании ударных структур ([Maug et al., 2008] и ссылки там). В свою очередь, петрофизические исследования могут дать важную информации при поиске и изучении древних метеоритных кратеров [French, Koeberl, 2010].

Обзор петрофизических исследований, проведенных на породах семнадцати ударных кратеров [Pesonen, 2011] показал четкие тенденции, касающиеся изменения некоторых петрофизических свойств пород: 1) пористость уменьшается от зювитов к брекчиям, псевдотахилитам, трещиноватым породам мишени (гнейсам) и далее к нетрещиноватым породам мишени; 2) плотность, наоборот, увеличивается в том же порядке. Пористость является доминирующим фактором, определяющим скорость ультразвуковых волн. Многочисленные исследования показывают отрицательную корреляцию между скоростью и пористостью. Также, существенное влияние оказывает структура и текстура пород, трещиноватость, минералогический состав и распределение зерен по размерам ([Maug et al., 2008] и ссылки там). При этом, плотность пород по-разному коррелирует с пористостью, поскольку свой вклад вносит минеральный состав.

Изучение петрофизических свойств пород структуры Ярва-Варака, расположенной на севере Мончегорского рудного района связано с предполагаемым импактным происхождением массива [Nerovich et al., 2023]. Массив Ярва-Варака находится внутри кольцевого разлома (рис. 1а), выделяются и более мелкие кольцевые структуры, хорошо различимые на аэрофотоснимках. Вмещающими породами являются гнейсы кольской серии с многочисленными пластовыми телами гранитоидов (рис. 1а).

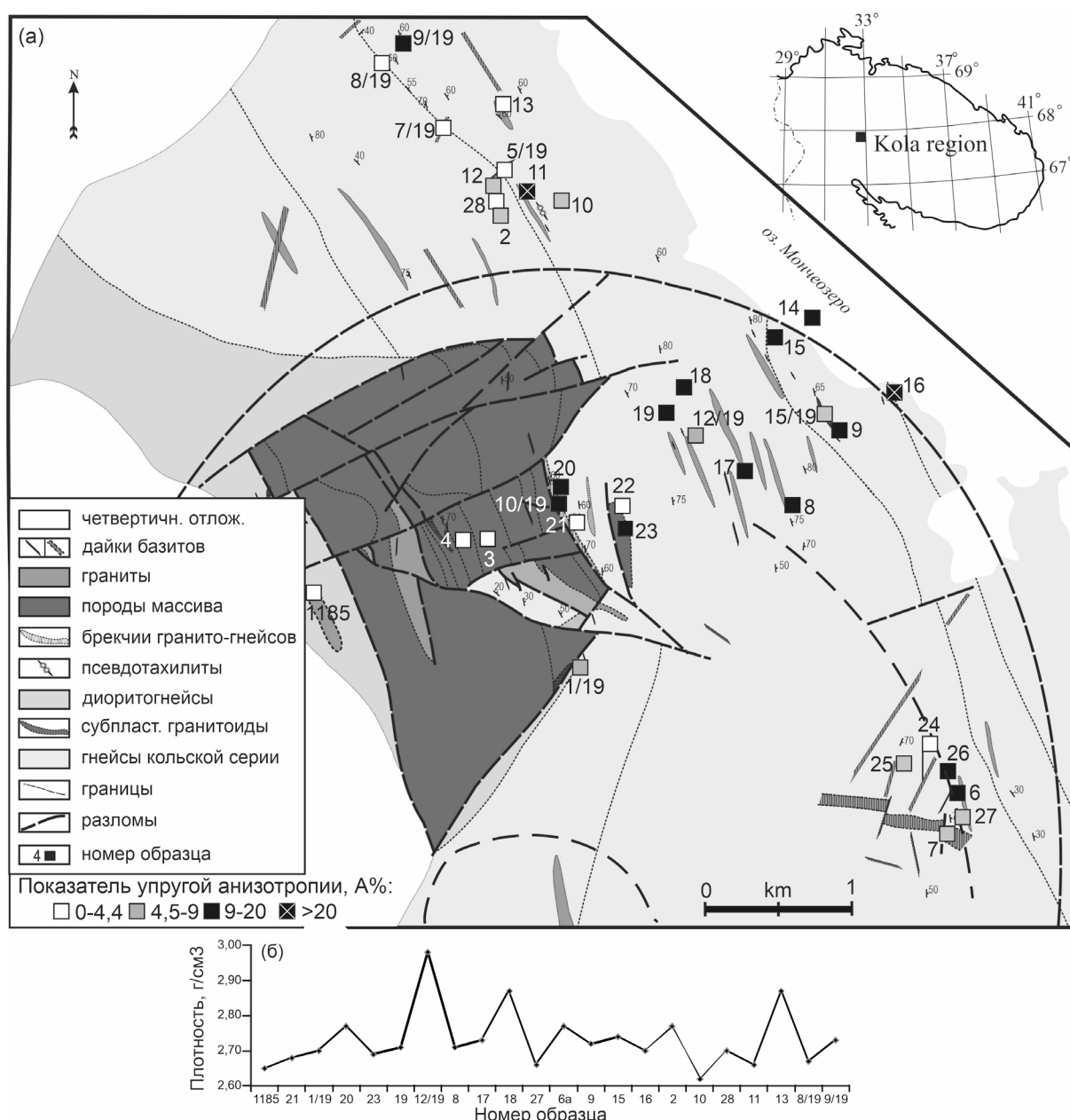


Рис. 1. Геологическая карта-схема строения участка Ярва-Варака (Nerovich et al., 2023 с упрощениями) с точками отбора образцов и значением индекса упругой анизотропии (A%) – (а); (б) – вариации плотности гнейсов и гранитоидов обрамления по мере удаления от массива Ярва-Варака.

Были отобраны образцы из пород массива Ярва-Варака и вмещающих гранитоидов, для которых были определены плотность, скорости распространения в образцах продольных волн и их индекс упругой анизотропии (рис. 1). Методика петрофизических измерений подробно описана в работе [Ильченко и др., 2022].

В целом в пределах кольцевой структуры (рис. 1а) гнейсы и гранитоиды обрамления сильноанизотропны (образцы 6, 8, 9, 4-23, 26) в отличие от пород массива (образцы 3, 4, 22), который, по-видимому, образовался в результате импакта и не был подвержен ударному метаморфизму. За пределами кольца (северный край карты) породы демонстрируют чаще низкую и среднюю степень анизотропии (рис. 1а).

Плотность пород (гнейсов и гранитоидов) по мере удаления от массива (рис. 1б) варьирует от 2,62 до 2,98 г/см<sup>3</sup>, но нельзя сказать, что такая стабильность увеличивается, как это описано для других импактных структур [Mayr et al., 2008], где плотность пород мишени возрастает по мере удаления от центра кратера, что согласуется с менее сильным шокowym метаморфизмом на периферии. В нашем случае, вариации плотности скорее зависят от минерального состава пород, поскольку вмещающие гнейсы и гранитоиды достаточно разнообразны по составу. К тому же, в связи с плохой обнаженностью и древним возрастом, вообще довольно сложно делать выводы о границах импактной структуры, можно лишь сказать, что, судя по карте и расположению кольцевых разломов, массив находится не в центре, а скорей – на периферии более крупной кольцевой структуры.

Применение комплексного подхода к интерпретации физических свойств с учетом петрографического и минералогического анализа горных пород может обеспечить основу для детального изучения ударных кратеров. Изучение петрофизических свойств астроблемы Ярва-Варака, возраст которой 2.5 млрд лет, может дать полезную информацию, которую, в дальнейшем, можно будет использовать в процессе поисков и исследования древних метеоритных кратеров.

*Работа выполнена по теме НИР ГИ КНЦ РАН FMEZ-2024-0006.*

## **Литература**

1. Ильченко В.Л., Афанасьева Е.Н., Каулина Т.В., Лялина Л.И., Ниткина Е.А., Мокрушина О.Д. Лицевское рудопроявление урана (Арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 393-404. DOI: 10.31897/PMI.2022.44

2. French B.M.; Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth Sci. Rev.* 2010. 98. 123–170.
3. Mayr S.I., Wittmann A., Burkhardt H., Popov Y., Romushkevich R., Bayuk I., Heidinger P., Wilhelm H. Integrated interpretation of physical properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Chicxulub impact structure) // *Journal of Geophysical Research*. 2008. V. 113, B07201, <https://doi.org/10.1029/2007JB005420>.
4. Nerovich L.I.; Kaulina T.V.; Bayanova T.B.; Ilchenko V.L.; Kunakkuzin E.L.; Bazai A.V.; Mudruk S.V.; Borisenko E.S.; Sosnovskaya M.F. Granophyre norites and diorites of the Jarva-Varaka massif (Monchegorsk ore area, Kola Region, Russia): geology, petrography, geochemistry, geochronology and origin. *Geochemistry International*. 2023. V. 61, No 6. 572-592. <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>
5. Pesonen L.J. Petrophysical Properties of Impact Rocks - The Key to Understanding Geophysical Anomalies of Meteorite Impact Structures // American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract id. P34A-06

#### PETROPHYSICAL PROPERTIES OF THE YARVA-VARAKA MASSIF ROCKS AND THE HOST GRANITOIDS (MONCHEGOSKY ORE DISTRICT OF THE KOLA PENINSULA) – TOWARDS THE QUESTION ON THE MASSIF IMPACT ORIGIN

<sup>1</sup>**Ilchenko V.L.**, <sup>1</sup>**Kaulina T.V.**, <sup>1</sup>**Nerovich L.I.**, <sup>2</sup>**Peskov D.A.**

<sup>1</sup>Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (GI KSC RAS), Apatity, [v.ilchenko@ksc.ru](mailto:v.ilchenko@ksc.ru)

<sup>2</sup>Apatity branch of the Murmansk Arctic University, Apatity, [danylapple@gmail.com](mailto:danylapple@gmail.com)

Petrophysical properties of rocks of the Järva-Varaka massif and host granitoids showed that within the ring structure granitoids of the target rocks are strongly anizotropic, while outside the ring they often have low and medium degrees of anisotropy. The density variations of the target rocks mainly depend on rock compositions. An integrated approach to interpreting petrophysical data, taking into account petrographic and mineralogical analysis of rocks, can provide a basis for a detailed study of impact craters.

## ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД, СОДЕРЖАЩИХ ЗЕРНА РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ

**Индаков Г.С., Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Шарычев И.В.**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва,  
[indakov.gs16@physics.msu.ru](mailto:indakov.gs16@physics.msu.ru)

Проведены лабораторные эксперименты по термически стимулированному разрушению модельных образцов, представляющих собой сцементированные гипсом фракции кварцевого песка с разным размером зерен. Обнаружено, что образцы с разными фракциями наполнителя демонстрируют слабую тенденцию к уменьшению наклона графика повторяемости акустической эмиссии с ростом размера фракции заполнителя.

### **Введение**

Одним из важнейших фундаментальных направлений исследований в науках о Земле является изучение разрушения горных пород. Горные породы в земной коре подвергаются воздействию разнообразных давлений и температур. Для пород, слагающих глубинные зоны земной коры и вулканические постройки, характерно воздействие высоких температур, что приводит к термически стимулированному разрушению, а также изменению прочностных свойств. Похожая ситуация возникает при разработке полезных ископаемых, например, при термическом воздействии на пласт или подземном горении в рудниках.

В настоящее время активно развивается направление механических испытаний образцов горных пород, предварительно подвергнутых высокотемпературному воздействию (например, [Nasseri et al., 2007]). Тем не менее, в этих исследованиях практически отсутствуют данные о характере развития термически стимулированного разрушения. Вопрос о существовании взаимосвязей между особенностями разрушения, микроструктурными параметрами и петрофизическими характеристиками горных пород в данный момент остается открытым. Ответ на него важен для получения как можно более широкого спектра информации о физических свойствах горных пород в лабораторных и полевых исследованиях и прогнозировании развития разрушения горных пород при высоких температурах.

Исследование разрушения горных пород сталкивается с тем, что на характер разрушения влияет сразу множество факторов – от минерального состава до текстурных особенностей породы. Частичным решением проблемы может быть исследование

разрушения на модельных горных породах, в которых контролируемо изменяется один из параметров. С точки зрения микроструктуры одним из ключевых параметров является средний размер зерна породы.

### **Методика и экспериментальный материал**

Для экспериментов были изготовлены искусственные образы из модельной горной породы, представляющей собой фракции кварцевого песка, сцементированного гипсом. Песок отобран в карьере в Подмосковье, предварительно промыт и просеян от крупных включений (более 1.5 мм). Фракции песка получены просеиванием через последовательный ряд сит, соответственно, размер основной части зерен был между размерами ячеек последовательно использованных сит (табл. 1). Для цементирования использован гипс Movatex T39743, смешение с водой и песком осуществлялось в массовом соотношении 4 (гипс) : 4 (вода) : 3 (песок). Также были изготовлены образцы из гипса без примеси песка, выделенные в отдельную группу.

Табл. 1. Модельные образцы и соответствующие фракции песка

| Название образца | Номер фракции | Размер сит, мкм | Медианный размер зерна, мкм |
|------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|
| GS0430C0-1       | 0             | -               | -                           |
| GS0430C1-1       | 1             | < 200           | 198                         |
| GS0430C2-1       | 2             | 200-315         | 256                         |
| GS0430C3-1       | 3             | 315-400         | 376                         |
| GS0430C4-1       | 4             | 400-630         | 626                         |

Для определения распределений зерен по размерам и точных их параметров (например, медианы), полученные фракции были подвергнуты контрольному гранулометрическому анализу. Он производился лазерно-дифрактометрическим методом на анализаторе размеров частиц Malvern Mastersizer 3000 в Институте географии РАН; методика подробнее описана в [Panin et al., 2019].

В экспериментах термическое воздействие проводилось на один образец из каждой группы в виде 2 циклов нагрев-охлаждение со скоростью нагрева 3°C/мин и максимальной температурой нагрева 650°C (подробнее см. в [Казначеев и др., 2019]), на оборудовании ЦКП ИФЗ РАН [Веселовский и др., 2022].

### **Результаты**

В экспериментах регистрировалась акустическая эмиссия, для которой потом определялись статистические параметры – средние за нагрев (и охлаждение) значения активности и наклона графика



повторяемости (b-value). Сравнительный анализ результатов экспериментов показал, что наблюдается корреляция между размером частиц фракций песка и b-value для обоих циклов нагрева – с ростом размера частиц b-value уменьшается. Для первого цикла общий тренд сохраняется для фракций 0–3, для самой крупной фракции 4 наблюдается небольшое увеличение b-value (рис. 1). Диапазоны распределения зерен во фракциях перекрываются, что может объяснять близость значений b-value для соседних фракций. С другой стороны, чисто гипсовые образцы и образцы с фракцией 4 демонстрируют малое число событий, что может говорить о малой представительности оценки b-value для них. Активность при этом не показывает значимой корреляции с размером частиц примеси.

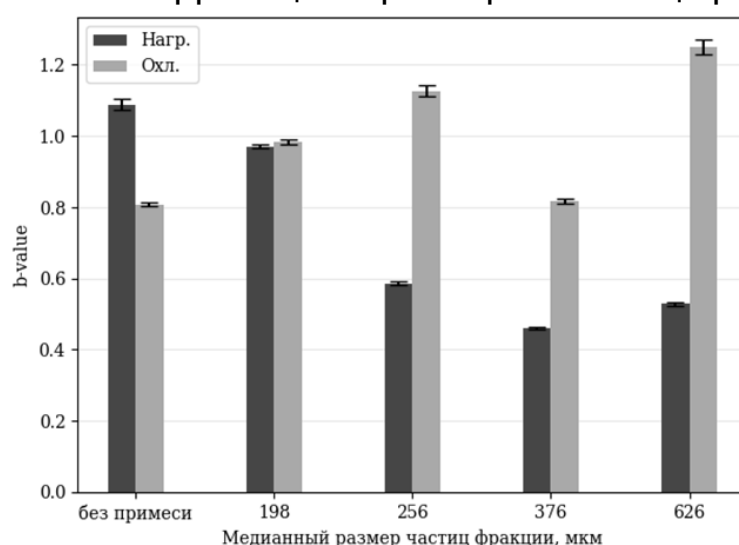


Рис. 1. Зависимость среднего значения b-value и активности для первого цикла нагрева («Нагр.») и охлаждения («Охл.») от медианного размера частиц фракции песка для гипсовых образцов.

### Обсуждение и выводы

Результаты экспериментов с образцами модельных горных пород показали зависимость наклона графика повторяемости импульсов акустической эмиссии (b-value) от медианного размера фракции песка. Это обстоятельство является довольно неожиданным с точки зрения данных по механическому разрушению, для которого такой зависимости не обнаруживается. Вероятно, наличие зависимости связано с тем, что в искусственных образцах одиночные песчинки кварца «взвешены» в гипсовом цементе. Развитие трещин около таких песчинок, вероятно, зависит от размеров самих частиц. Из-за этого в образцах с частицами большего размера с ростом термомеханических напряжений развиваются более крупные дефекты, что приводит к появлению более высокоамплитудных событий и уменьшению b-value.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН.*

### **Литература**

1. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” // Геодинам. и тектонофиз. 2022. Т. 13. № 2. ArtID 0579. С. 1-12.
2. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В. Оборудование и методика исследования термоакустоэмиссионных эффектов памяти в горных породах // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 1. С. 29-45.
3. Nasser M.H.B., Schubnel A., Young R.P. Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite // Intern. Journal of Rock Mech. and Mining Sci. 2007. Vol. 44, No. 4. P. 601–616.
4. Panin P.G., Timireva S.N., Konstantinov E.A., Kalinin P.I., Kononov Yu.M., Alekseev A.O., Semenov V.V. Plio-Pleistocene paleosols: Loess-paleosol sequence studied in the Beregovoye section, the Crimean Peninsula // Catena. 2019. Vol. 172. P. 590-618.
5. Scholz C. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3rd ed. - Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 516 p.

### **THERMAL FAILURE OF MODEL ROCK SAMPLES CONTAINING GRAINS OF DIFFERENT SIZES**

**Indakov G.S., Kaznacheev P.A., Maybuk Z.-Y.Ya., Ponomarev A.V., Sharychev I.V.**

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow,  
[indakov.gs16@physics.msu.ru](mailto:indakov.gs16@physics.msu.ru)

Laboratory experiments have been conducted on thermally stimulated destruction of artificial samples consisting of quartz sand of different fractions and cemented with gypsum. It was found that the destruction occurs with weak acoustic emission activity. Samples with different filler fractions show a weak tendency to decrease the b-value with increasing of size of the filler fraction.

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛАХ

<sup>1</sup>**Казакова (Русак) А.А.**, <sup>2</sup>**Алферьева Я.О.**, <sup>2</sup>**Щекина Т.И.**

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, Москва, [aleks7975@yandex.ru](mailto:aleks7975@yandex.ru);

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, [yanaalf@bk.ru](mailto:yanaalf@bk.ru)

Для оценки количества воды в безфтористых стеклах широко применяется метод Карла Фишера. Преимуществом метода является точность, минимальное количество вещества, большой диапазон измерений практически до 100% и экспрессность. Однако даже небольшое количество фтора в стеклах делает невозможным применение этого метода. Для количественного определения содержания воды во фторсодержащих плюмазитовых стеклах гранитного состава нами используется метод Рамановской спектроскопии и метод вторично-ионной масс-спектрометрии.

Рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния) – чувствительный и неразрушающий образец метод, требующий минимального объема образца и его подготовки. Определение количества воды во фторсодержащих стеклах производится в соответствии с методикой, описанной в работах [Thomas et al., 2000, Thomas, Davidson, 2006]. В спектрах комбинационного рассеяния стекол определяется отношение площадей полос, соответствующих валентным колебаниям растворенной в стекле воды ( $2800 - 3800 \text{ см}^{-1}$ ), к площади полос, характеризующих валентные колебания в кремнекислородных тетраэдрах с различным количеством мостиковых и немостиковых атомов кислорода. Для кварцнормативных фторсодержащих стекол эти полосы лежат в диапазоне  $700 - 1300 \text{ см}^{-1}$ . Полученные значения сопоставляются со значениями в эталонных кварцнормативных фторсодержащих стеклах с известным количеством воды.

Для синтетических эталонных стекол нами было проведено контрольное измерение содержания воды двумя независимыми методами. Во-первых, методом вторично-ионной масс-спектрометрии с использованием прибора Cameca IMS-4F в Ярославском филиале ФТИАН РАН (аналитик Симакин С.Г.). Методика измерений соответствовала методике, приведенной в работах [Smirnov et al., 1995; Nosova et al., 2002]. Во-вторых, методом Рамановской спектроскопии в центре геологических

исследований г. Потсдам (Германия) на спектрометре Jobin-YvonLabRamHR800, оснащённом оптическим микроскопом Olympus с длиннофокусным объективом LMPlanFI 100x. Сопоставление полученных значений приведено на рис. 1. Эти эталоны используются нами в качестве стандартов для определения количества растворенной воды во всех фторсодержащих кварцнормативных алюмосиликатных стеклах.

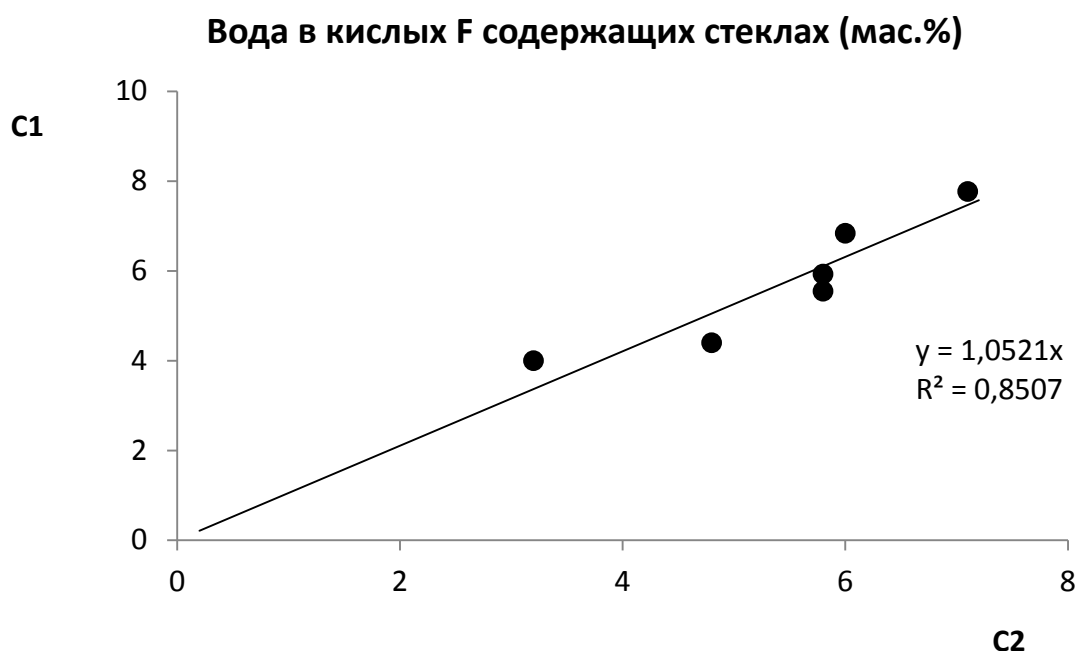


Рис. 1. Сопоставление содержания воды в эталонных стеклах, полученное методом вторично-ионной масс-спектрометрии (C1) и спектрометрии комбинационного рассеяния (C2).

Кварцнормативные стекла с содержанием воды от 2 до 10 мас. % и содержанием фтора от 0 до 8 мас. % были синтезированы при 800°C, 1 кбар на установке высокого газового давления в ИЭМ РАН (г. Черноголовка). В качестве исходных веществ для опытов использовали реактивы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{LiF}$ , гелевая смесь  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  и дистиллированная вода. Полученные образцы состоят преимущественно из алюмосиликатного стекла с продуктами закалки щелочно-алюмофторидного расплава, представленными алюмофторидами Na и Li, и кристаллами кварца.

Определение содержания воды в экспериментальных образцах производилось на автоматическом рамановском спектрометре XPloRA (Horiba Scientific), совмещенном с конфокальным микроскопом, при длине волны 532 нм на кафедре петрологии и

вулканологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

По данным КР-спектроскопии при отсутствии фтора в системе количество воды в алюмосиликатных стеклах заданного состава не превышает 2,4 мас. %. При увеличении исходного содержания фтора до 8 мас. % количество растворенной воды увеличивается до 10 мас. %. Полученные данные не противоречат предыдущим исследованиям синтетических фторсодержащих стекол [Алферьева и др., 2018, Граменицкий и др., 2005], однако возможно, что такое содержание воды не является пределом насыщения.

Информация о форме нахождения воды в стеклах была получена из анализа ИК спектров исследуемых образцов. ИК спектроскопия была выполнена на ИК Фурье-спектрометре ФТ-801 (SIMEX, Новосибирск) и установленной в него приставкой отражения ПО-45Н (PRIZE) в ГЕОХИ РАН в лаборатории геохимии углерода им. Э.М. Галимова. Разрешение спектров составляло  $4\text{см}^{-1}$  после 200 сканирований в среде инертного газа Ar. Выделяется три основные области: область  $1400\text{--}1800\text{ см}^{-1}$ , которая отвечает колебаниям связей поверхностно-адсорбированной молекулярной  $\text{H}_2\text{O}$  на поверхности алюмосиликатного стекла; область  $3450\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ , отвечающая за поверхностно-абсорбированную воду, с добавлением ассиметричных колебаний ОН-групп и область  $3200\text{--}3450\text{ см}^{-1}$ , в которой обнаружены 3 характеристических диапазона поглощения ( $3212\text{--}3275\text{ см}^{-1}$ ,  $3338\text{--}3383\text{ см}^{-1}$ ,  $3411\text{--}3438\text{ см}^{-1}$ ). Присутствие этих 3-х диапазонов, указывает на то, что гидроксильная группа была либо хемосорбирована в структуру стекла, либо она смогла занять существующую вакансию в кристаллической структуре стекла.

Таким образом, комплексное использование различных аналитических методов позволяет определить количественное содержание воды и ее форму нахождения во фтористых алюмосиликатных стеклах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ГЕОХИ РАН и по госбюджетной теме «Режимы петрогенеза внутренних геосфер Земли» геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

## **Литература**

1. Алферьева Я.О., Щекина Т.И., Граменицкий Е.Н. Предельное содержание фтора и воды в гранитных высоко

- эволюционированных расплавах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 3. С. 70-76.
2. Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И., Девятова В.Н. Фазовые отношения во фторсодержащих гранитной и нефелин-сиенитовой системах и распределение элементов между фазами. М.: ГЕОС. 2005. 186 с.
  3. Nosova A.A., Sazonova L.V., Narkisova V.V., Simakin S.G. Minor elements in clinopyroxene from paleozoic volcanics of the Tagil Island Arc in the Central Urals. // *Geochemistry*. Vol. 40. № 3. 2002. P. 219.
  4. Smirnov V.K., Sobolev A.V., Batanova V.G., Portnyagin M.V., Simakin S.G., Potapov E.V. Quantitative SIMS analysis of melt inclusions and host minerals for trace elements and H<sub>2</sub>O // *EOS Trans / Spring Meet. Suppl. AGU*. 1995. №76 (17). P. 270.
  5. Thomas R. Determination of water contents of granite melt inclusions by confocal laser Raman microprobe spectroscopy// *Amer. Mineral*. 2000. Vol. 85. P. 868–872.
  6. Thomas R., Davidson P. Progress in the determination of water in glasses and melt inclusions with Raman spectroscopy: A short review // *Z. Geol. Wiss Berlin*. 2006. Vol. 34. P. 159–163.

#### METHODS OF ANALYSIS OF WATER CONTENT IN ALUMINOSILICATE FLUORINE-CONTAINING GLASSES

<sup>1</sup>**Kazakova (Rusak) A.A.**, <sup>2</sup>**Alferyeva Ya.O.**, <sup>2</sup>**Shchekina T.I.**

<sup>1</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) of the Russian Academy of Sciences, Moscow, [aleks7975@yandex.ru](mailto:aleks7975@yandex.ru);

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, [yanaalf@bk.ru](mailto:yanaalf@bk.ru)

For quantitative determination of water content in fluorine-containing plumbite glasses of granite composition we use Raman spectrometry and secondary ion mass spectrometry. According to Raman spectrometry data, in the absence of fluorine in the system, the amount of water in aluminosilicate glasses of a given composition does not exceed 2,4 wt. %. With an increase in the initial fluorine content to 8 wt. %, the amount of dissolved water increases to 10 wt. %. The complex use of various analytical methods allows us to determine the quantitative content of water and its form of presence in fluorine-containing aluminosilicate glasses.

## АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

<sup>1</sup>Казначеев П.А., <sup>1,2</sup>Подымова Н.Б., <sup>1</sup>Индаков Г.С.,  
<sup>1</sup>Майбук З.-Ю.Я., <sup>1</sup>Шарычев И.В., <sup>1</sup>Пономарев А.В.

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

[p\\_a\\_k@mail.ru](mailto:p_a_k@mail.ru)

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова

Проведены измерения характера распространения высокочастотного ультразвука методом оптико-акустической спектроскопии через образцы модельных горных пород с разной фракцией заполнителя – кварцевого песка, сцементированного гипсом или эпоксидной смолой. Гипсово-песчаные образцы показали высокое поглощение, не позволившее получить данные. Эпоксидно-песчаные образцы продемонстрировали хорошее прохождение ультразвука до частоты около десяти мегагерц, что позволяет оценивать характерный максимальный размер зерен порядка сотен микрометров.

### Введение

Вопрос влияния микроструктуры гетерогенных материалов (композитов, горных пород) на распространение упругих волн в настоящее время активно разрабатывается исследователями. Исследования сосредоточены на оценке влияния простых количественных параметров микроструктуры, например, характерных размеров зерен, на прохождение ультразвука высоких частот [Kravcov et al., 2017; Bitta et al., 2017].

Ранее мы провели оценку характерных размеров зерен метаморфических горных пород – метапесчаников [Подымова и др., 2024]. Образцы этих пород были отобраны в Северном Приладожье, породы представляли собой зонально метаморфизованную ладожскую серию палеопротерозоя Балтийского щита, претерпевшие разную степень структурно-текстурных изменений в ходе тектоно-термального метаморфизма. В ходе него исходные осадочные породы схожего минерального состава и структуры оказались в разных рТ-условиях, что привело к изменению как состава, так и микроструктуры.

Метапесчаники, предположительно, являлись наилучшим приближением к термально преобразованным горным породам, различающимся микроструктурой при максимально похожем минеральном составе. Практически невозможно найти горные породы, различающиеся только одним параметром микроструктуры (например, средним размером зерен) при одинаковом минеральном



составе. Но возможно изготовление и исследование искусственных образцов модельной горной породы с контролируемым размером зерен.

### Методика и экспериментальный материал

Схема широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником ультразвука и методика определения частотных зависимостей коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в образцах метапесчаников подробно описаны в работе [Подымова и др., 2023].

Для экспериментов были изготовлены искусственные образцы из модельной горной породы, представляющей собой фракции кварцевого песка, цементированные либо гипсом, либо эпоксидной смолой. Песок отобран в карьере в Подмосковье, предварительно промыт и просеян от крупных включений (более 1.5 мм). Фракции песка получены просеиванием через последовательный ряд сит, соответственно, размер основной части зерен был между размерами ячеек последовательно использованных сит (табл. 1).

Табл. 1. Модельные образцы и соответствующие фракции песка

| Номер фракции | Размер сит, мкм  | Медианный размер зерна, мкм | Средний размер зерна, мкм |
|---------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 0             | (без песка)      | -                           | -                         |
| 1             | < 200            | 198                         | 194                       |
| 2             | 200-315          | 256                         | 280                       |
| 3             | 315-400          | 376                         | 402                       |
| 4             | 400-630          | 626                         | 619                       |
| 5             | (исходный песок) | 288                         | 304                       |

Для определения распределений зерен по размерам (рис. 1) и количественных параметров распределений (например, медианы), полученные фракции были подвергнуты контрольному гранулометрическому анализу лазерно-дифрактометрическим методом на анализаторе размеров частиц Malvern Mastersizer 3000 в Институте географии РАН [Panin et al., 2019].

Для цементирования гипсом использовался гипс Movatex T39743, смешение с водой и песком осуществлялось в массовом соотношении 4 (гипс) : 4 (вода) : 3 (песок).

Для цементирования эпоксидной смолой использовалась эпоксидная смола ArtЕроху, обладающая временем отверждения 48 часов. Песок в силу его большей плотности и малой вязкости смолы опускался на дно; в дальнейшем из затвердевшей цилиндрической заготовки вырезалась нижняя часть (диск), полностью заполненная песком. Поэтому соотношение замешивания не определялось.

Также были изготовлены образцы из гипса и эпоксидной смолы без примеси песка, выделенные в отдельную группу («фракцию» 0).

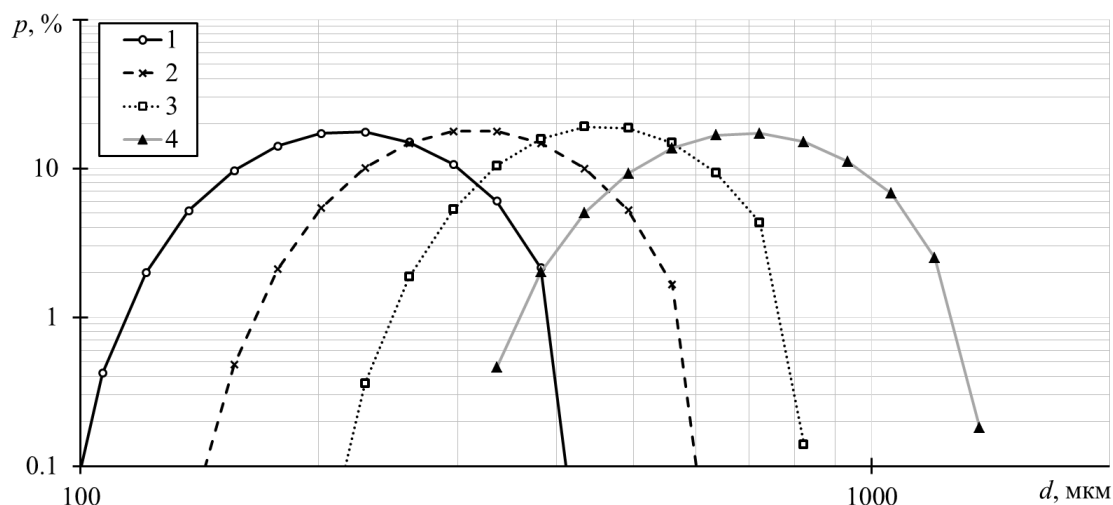


Рис. 1. Зависимость доли  $p$  частиц (зерен) песка во фракциях 1-4 (см. легенду и табл. 1) в зависимости от размера частиц фракции  $d$ .

### Результаты и выводы

Гипсово-песчаные образцы показали поглощение, не позволившее получить данные. Предположительно это связано как с большим поглощением в матрице (прежде всего, в гипсовом цементе), так и с большой пористостью образцов (до 50%). Для улучшения прохождения ультразвука образцы были пропитаны водой, но при длительном выдерживании в воде стали терять связность, что не позволило провести измерения.

Эпоксидно-песчаные образцы продемонстрировали хорошее прохождение ультразвука до частоты около десяти мегагерц. Это позволяет оценивать характерный максимальный размер зерен порядка сотен микрометров.

Отметим, что оценка размера зерен горных пород важна не только для кристаллизованных горных пород (например, магматических), но и для горных пород, представляющих сцементированные агрегаты исходно фрагментированной горной породы. Такая задача возникает в физике разрушения горных пород, в частности, в геомеханике разломных зон, когда заполнитель разлома может представлять собой фрагменты разрушенной горной породы, повторно сцементированной при минерализации глубинным флюидом [Scholz, 2002].

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН и физич. факультета МГУ, керны подготовлены в ЦКП ИФЗ РАН.*

## Литература

1. Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Казначеев П.А., Багдасарян Т.Э., Матвеев М.А., Индаков Г.С. Количественная оценка характерных размеров зерен лабораторных образцов горных пород методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии // Физика Земли. 2024. № 6. С. 93-111.
2. Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Морозов Ю.А., Матвеев М.А., Смирнов В.Б., Шарычев И.В. Исследование структуры метапесчаников методом широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука // Геофизич. процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 4. С. 13-24.
3. Kravcov A., Konvalinka A., Vinnikov V., Ertuganova E.A., Shibaev I.A., Ivanov P. On the Issue of Typical Grain Size Assessment by the Methods of Broadband Laser Opto-Acoustics // Key Engineering Materials. 2017. V. 755. P. 212 - 218.
4. Bitá H., Faiz B., Moudden A.H., Lotfi H., Ouacha E.H., Banouni H. Ultrasound monitoring of a mortar hydration using Argand Diagram: The effect of sand grain size and temperature // Construction and Building Materials. 2017. V. 155. P. 1003-1012.
5. Panin P.G., Timireva S.N., Konstantinov E.A., Kalinin P.I., Kononov Yu.M., Alekseev A.O., Semenov V.V. Plio-Pleistocene paleosols: Loess-paleosol sequence studied in the Beregovoye section, the Crimean Peninsula // Catena. 2019. Vol. 172. P. 590-618.
6. Scholz C. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3rd ed. - Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 516 p.

## ACOUSTIC SPECTROSCOPY OF MODEL ROCK SAMPLES

<sup>1</sup>Kaznacheev P.A., <sup>1,2</sup>Podymova N.B., <sup>1</sup>Indakov G.S., <sup>1</sup>Maybuk Z.-Y.Ya., <sup>1</sup>Sharychev I.V., <sup>1</sup>Ponomarev A.V.

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow [p\\_a\\_k@mail.ru](mailto:p_a_k@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow

The propagation pattern of high-frequency ultrasound has been measured by optical–acoustic spectroscopy through samples of model rocks with different fractions of filler - quartz sand cemented with gypsum or epoxy resin. Gypsum-sand samples showed high absorption. Epoxy-sand samples demonstrated good ultrasound transmission up to frequency of about ten megahertz, which makes it possible to estimate the grain size of the order of hundreds of micrometers.

## СТРУКТУРА ТРЕЩИНЫ В ГРАНИТЕ И ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

**Кочанов А.Н.**

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова (ИПКОН) РАН, Москва, [kochanov@mail.ru](mailto:kochanov@mail.ru)

Изучение особенностей развития трещин в материалах, в том числе и горных пород, является фундаментальной научной проблемой и предметом изучения механики разрушения и физики прочности. В тоже время данная проблематика имеет важное значение в науках о Земле и, как правило, связана с изучением механизма развития очага разрушения для прогнозирования природных катастрофических явлений таких как горные удары, землетрясения [Соболев, 2003; Ребицкий, 2005]. В экспериментальных исследованиях механизма развития очага разрушения и динамики формирования магистральной трещины на образцах горных пород используется методика с определением координат источников акустической эмиссии [Ботвина, 2011; Лементуева, 2014]. В тоже время представляет определенный интерес изучение структурных особенностей уже сформировавшейся магистральной трещины.

При проведении экспериментов с этой целью система трещин создавалась в объеме образце гранита с помощью взрывного воздействия, после которого не наблюдалась фрагментация образца, что позволило изготовить на следующем этапе образцы малых размеров в виде пластин для микроскопических исследований [Викторов, 2017]. При анализе этих образцов с применением методов оптической, электронной, лазерной конфокальной микроскопии получены изображения и выполнено изучение отдельных фрагментов трещин. При проведении исследований использовались оптический микроскоп Olympus с цифровой камерой DP-12, электронные микроскопы JSM 5910 – LV и JSM 6610-LV.

На рисунке 1 в качестве примера представлены изображения фрагментов трещины, полученные с применением оптической и электронной микроскопии, которые характеризуют структурные особенности развития трещины в граните при динамическом воздействии. Для изучения рельефа трещины и оценки ее третьего размера были проведены исследования с привлечением лазерной конфокальной микроскопии. На рисунке 2 в качестве примера

представлено характерное распределение значений глубины трещины для ее фрагмента шириной  $\sim 450$  мкм, которое было получено с помощью микроскопа Keyence VK-9710K. Как следует из графика имеет место разброс значений, обусловленный структурными особенностями рельефа внутри трещины, наблюдаемого по данным электронной микроскопии.

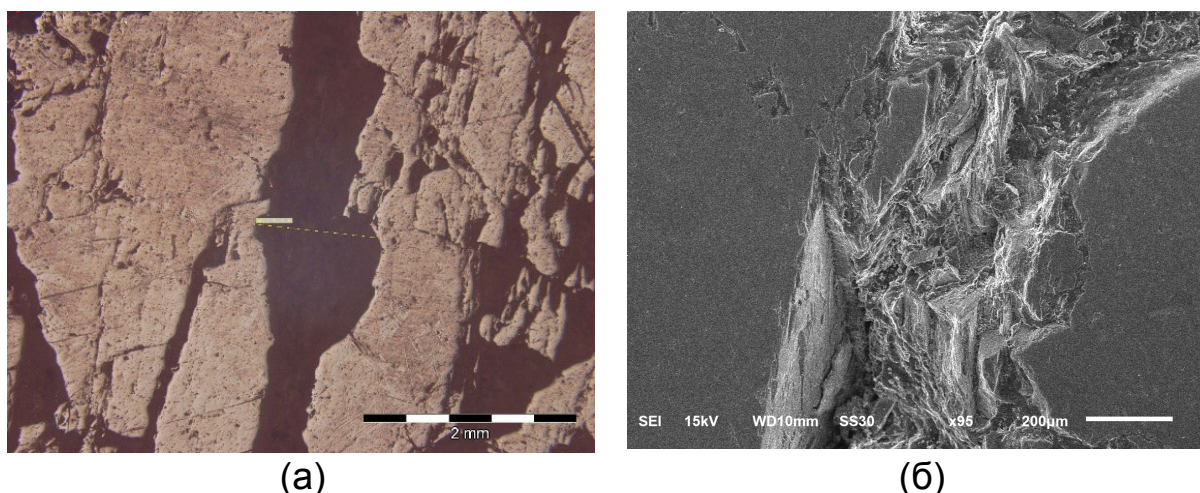


Рис. 1. Изображения фрагментов трещины по данным оптической (а) и электронной (б) микроскопии.

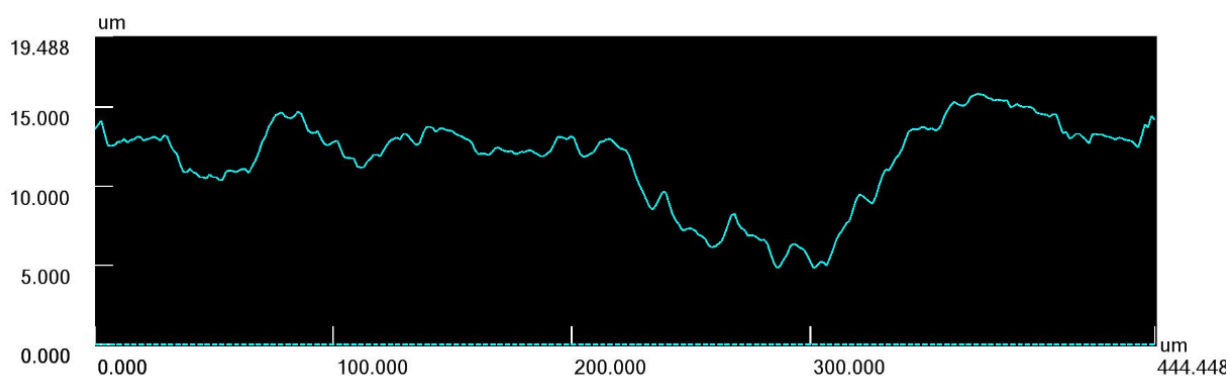


Рис. 2. Распределение значений глубины для фрагмента трещины по данным сканирующей конфокальной лазерной микроскопии.

Процесс формирования и развития трещин определяется вязкостью разрушения и зависит от шероховатости поверхности материала. В этой связи были проведены исследования морфологии поверхности образцов гранита и доломита методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). АСМ является важным методом наблюдения в микро- и наномасштабах в различных областях науки, включая биологию, материаловедение, физику и химию, а в последние годы этот метод получил широкое распространение при изучении горных пород [Таусов; 2014].

Для исследований микрорельефа использовался сканирующий зондовый СММ-2000, изготовитель АО «Завод ПРОТОН». Для характеристики микрорельефа были случайным образом выбраны две измерительных локальных области на поверхности каждого образца горной породы. По результатам исследований получены изображения микрорельефа, которые для большей иллюстративности представлены в 3D-виде (рис.3). Размер кадра 8х8 мкм. Разброс высот для гранита составляет 1,35 мкм, для доломита– 2,4 мкм. Получены следующие оценки шероховатости для гранита 99 и 141 нм, для доломита 250 и 289 нм. Результаты показывают, что морфология рельефа поверхности горных пород колеблется в пределах сотен нанометров, при этом поверхность гранита является сравнительно более гладкой, чем доломита.

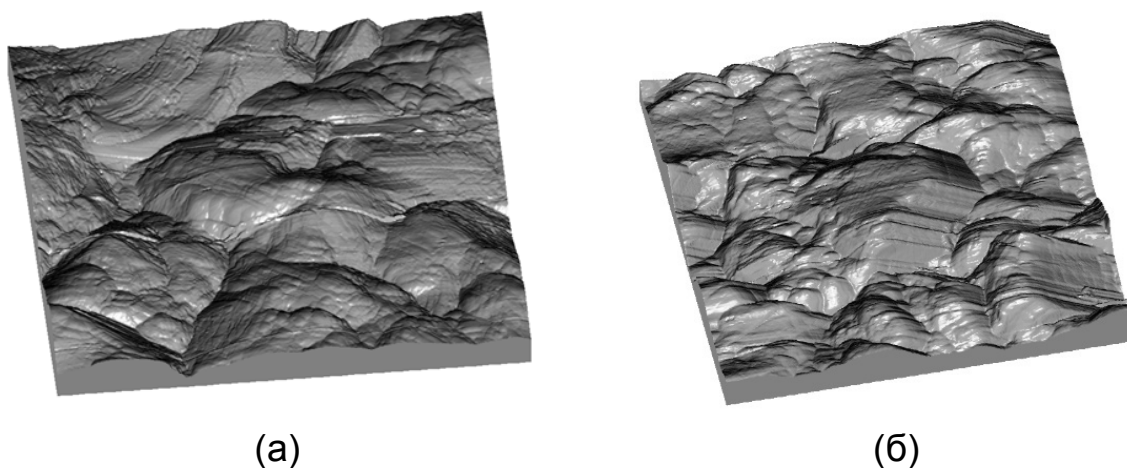


Рис. 3. Томография поверхности гранита (а) и доломита (б) по данным АСМ.

Таким образом, получены изображения с использованием современных методов микроскопии и определены геометрические и структурные параметры трещин. Отмечается изменение формы и рельефа трещины по мере ее распространения, а также ярко выраженная ее шероховатость. Неровности берегов трещины и ее профиля могут свидетельствовать об изменениях ее скорости распространения, связанных с формированием зоны локализации разрушения и последующим скачкообразным продвижением, так как развитие трещины связано с накоплением в области ее вершины различного рода повреждений. Оценка шероховатости методом АСМ представляется перспективной как нового структурного параметра горных пород, определяющего динамику развития трещин. Применение АСМ не только открывает новые возможности для изучения структуры горных пород, но и обеспечивает



инновационные концептуальные основы для изучения механизмов разрушения горных пород.

### Литература

1. Ботвина Л.Р. Эволюция поврежденности на различных масштабах // Физика Земли. 2011. № 10. С. 5–18.
2. Викторов С.Д., Кочанов А.Н. Исследование трещин в природных материалах на примере гранита в условиях взрывного воздействия // Известия РАН. Серия физическая, 2017. Т. 81. №5. С.669-671.
3. Лементуева Р. А., Бубнова Н.Я., Треусов А.В. Особенности динамики формирования магистральной трещины // Физика Земли, 2014. №1. С. 33-39.
4. Ребецкий Ю.Л., Лементуева Р. А., Дьяур Н.И, Михайлова А.В. Соподчиненность микроструктурных деформаций и хрупкого макроразрушения // Доклады Академии наук, 2005, т.403, №2, С.253-257.
5. Соболев В.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
6. Таусов В. Л., Липко С.В., Смагунов Н.В. и др. Влияние поверхностных нанофаз на процессы образования кристаллов в многофазных минеральных системах // Доклады академии наук, 2014. т. 455. №2. С.210–215.

### FRACTURE STRUCTURE IN GRANITE AND ASSESSMENT OF SURFACE RADIUS OF ROCKS BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY **Kochanov A.N.**

Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral (IPKON)  
RAS, Moscow, [kochanov@mail.ru](mailto:kochanov@mail.ru)

The results of experimental study of structural features of cracks in granite formed by dynamic action were analyzed. The experiments were carried out using optical, electronic and laser confocal microscopy methods. Obtained images of fragments of cracks allow to clarify the mechanisms and dynamics of their development. It is noted that the roughness of the surface of mountain rocks affects the features of crack development. This parameter is evaluated using atomic force microscopy.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ УЛЬТРАКАЛИЕВЫХ РАСПЛАВОВ НА ПРИМЕРЕ ЛАМПРОИТОВ ВУЛКАНА ГАУССБЕРГ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

**Кошлякова А.Н., Шишкина Т.А., Лоренц К.А.**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
(ГЕОХИ) РАН, Москва, [a.koshliakova@gmail.com](mailto:a.koshliakova@gmail.com),  
[t.shishkina@geokhi.ru](mailto:t.shishkina@geokhi.ru)

Ультракалиевые вулканические породы, характеризующиеся высоким содержанием  $K_2O$  ( $>3$  мас. %),  $K_2O/Na_2O > 1$  и присутствием экзотических для типичных базальтовых серий минералов, таких как флогопит, рихтерит, лейцит, кальсилит, являются малораспространенными природными объектами, однако исследование условий формирования и кристаллизации их родоначальных расплавов дает важную информацию о процессах, протекающих в недрах Земли. Одними из представителей ультракалиевых пород являются лампроиты – группа ультращелочных пород с повышенной магнезиальностью, высокими отношениями  $K_2O/Al_2O_3$  и  $K_2O/Na_2O$  и обогащенные редкими литофильными элементами. Проявления лампроитов встречены во многих регионах мира, в том числе, к ним относятся алмазоносные лампроиты Западной Австралии [Foley et al., 1987]. Несмотря на достаточно широкое изучение проблемы образования лампроитов, однозначного взгляда на их происхождение не существует [Gupta, 2015].

Большой интерес для исследования представляют собой лампроиты вулкана Гауссберг (Восточная Антарктида) – самое молодое (около 56000 лет) проявление лампроитового вулканизма, произошедшее в подледных условиях, сформировавшееся на стабильной континентальной окраине [Суцевская и др., 2014]. Лампроиты (по старой терминологии - оливиновые лейцититы) Гауссберга представлены пиллоу-лавами и туфобрекчиями, валовый состав которых варьирует в достаточно узком диапазоне: 51.5–53.5 мас. %  $SiO_2$ , 7.5–8.3 мас. %  $MgO$  при существенном обогащении  $K_2O$  до 11–12 мас. %.

Несмотря на то, что существует большое количество экспериментальных работ, посвященных изучению фазовых равновесий в ультракалиевых магматических системах, данные, непосредственно соответствующие составу лампроитовых магм Гауссберга (ассоциация вкрапленников оливин – лейцит - клинопироксен), достаточно ограничены [Gupta, 2015]. В опубликованных работах продемонстрированы порядок кристаллизации и фазовые равновесия в ультракалиевом расплаве

при давлениях 1 атм, 100 МПа и 2.3 ГПа, однако отсутствуют данные о составах кристаллизующихся фаз и равновесного расплава [Gupta, 2015; Gupta, 1972; Foley, 1985; Nag et al., 2007].

Целью данной работы было экспериментальное определение последовательности и условий кристаллизации ультракалиевых расплавов Гауссберга, а также состава фаз в продуктах экспериментов, и сравнение полученных результатов с петрографическими и минералогическими особенностями природных образцов.

Экспериментальное исследование кристаллизации расплава Гауссберга проводилось в ГЕОХИ РАН с использованием высокотемпературной вертикальной трубчатой печи Nabertherm RHTV-1700 при атмосферном давлении и контролируемой фугитивности кислорода, что обеспечивалось задаваемыми пропорциями смеси газов  $H_2$  и  $CO_2$ . Была проведена серия экспериментов методом петли в тигле в диапазоне температур 1100 - 1300°C при окислительно-восстановительных условиях, соответствующих буферу NNO. В качестве стартового состава использовался порошок природного образца лампроита вулкана Гауссберг (обр.476). Для избежания потерь K из расплава в ходе эксперимента образцы закреплялись внутри кварцевого контейнера, на дне которого располагался источник K: K-Si смесь [Koshlyakova et al., 2022]. Длительность эксперимента при заданной температуре составляла 2-5 суток, с последующей закалкой образца в воду. Состав фаз в продуктах экспериментов определялся в ГЕОХИ РАН на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 (ЭДС детектор ULTIM MAX 100).

Изученные природные образцы лампроитов Гауссберга (16 образцов) были отобраны в ходе 2-ой Советской Антарктической экспедиции 1956-1958 годов, их подробное описание приведено в работах [Сущевская и др., 2014; Мигдисова и др., 2023].

Лампроитовые лавы Гауссберга сложены вкрапленниками высокомагнезиального оливина (Fo89–91, 10 об.%), клинопироксена (Mg#79-92, 5 об.%), лейцита (20–40 об.%), а также стекловатой или афанитовой основной массой (30–60 об.%), которая состоит из микролитов лейцита, клинопироксена, апатита, флогопита и закалочного стекла. Вкрапленники минералов размером до 1 мм встречаются как в виде отдельных идиоморфных и субидиоморфных зерен, так и в виде гломеропорфировых сростков. Отсутствие характерных петрографических свидетельств не позволяет надежно восстановить порядок кристаллизации минералов-вкрапленников на основании изучения природных образцов.

Для восстановления последовательности и условий кристаллизации высококалийевого расплава были использованы эксперименты, проводимые при контролируемых  $P$ - $T$ - $fO_2$  условиях. В проведенной нами серии экспериментов при 1 атм,  $NaNO_3$  и в температурном диапазоне 1100 - 1300°C, удалось определить порядок кристаллизации главных породообразующих минералов лампроитов Гауссберга: лейцит  $\rightarrow$  оливин+лейцит  $\rightarrow$  оливин+лейцит+клинопироксен. При температуре 1300°C лампроитовый расплав находится выше ликвидуса. При температуре 1290°C единственной кристаллизующейся фазой является лейцит. В экспериментах, проведенных при температурах 1190 – 1280°C, минеральная ассоциация представлена оливином и лейцитом. При температурах 1100 - 1170°C наблюдается кристаллизация трех фаз: оливин, лейцит и клинопироксен. Важно отметить, что в наших экспериментах впервые показано, что при данных условиях из ультракалийевого расплава (около 11%  $K_2O$ ) первой кристаллизующейся силикатной фазой является лейцит, а не оливин, как было описано в предыдущих исследованиях [Gupta, 2015; Gupta, 1972; Foley, 1985; Nag et al., 2007].

Составы экспериментальных стекол соответствуют составам природных лав Гауссберга, свидетельствуя о том, что удалось избежать потерь  $K_2O$  при нагреве. При этом наблюдаются закономерные вариации изменения состава стекла с понижением температуры: снижение  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ , повышение  $FeO$ ,  $TiO_2$ ,  $Na_2O$ , что отражает ход кристаллизации минеральных фаз, по аналогии с природными образцами. Составы минеральных фаз в продуктах экспериментов также закономерно изменяются с температурой: снижается магнезиальность оливина ( $Fe_{95-90}$ ) и клинопироксена ( $Mg_{93.7-90.0}$ ), увеличивается содержание  $Fe$  в лейците (0.84 – 1.19 мас.%  $FeO$ ). В целом составы минералов в продуктах экспериментов очень близки к природной ассоциации минералов-вкрапленников в лампроитах Гауссберга.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования по кристаллизации ультракалийевого расплава, соответствующего составу лампроитов Гауссберга, позволили воспроизвести порядок и условия кристаллизации ассоциации минералов-вкрапленников (лейцит – оливин+лейцит – оливин+лейцит+клинопироксен) и получить информацию о возможных температурных и окислительно-восстановительных условиях в магматической системе вулкана Гауссберг.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).*

## Литература

1. Мигдисова Н. А., Суцевская Н. М., и др. Особенности состава породообразующих минералов лампроитовых лав вулкана Гауссберг, Восточная Антарктида // Геохимия. 2023. Т.68. No. 9, С. 897–925.
2. Суцевская Н.М., Мигдисова Н.А., и др. Геохимические особенности лампроитовых лав четвертичного вулкана Гауссберг (Восточная Антарктида) – результат влияния мантийного плюма Кергелен // Геохимия. 2014. No.12. С.1079-1098.
3. Foley S.F. The oxidation state of lamproitic magmas // Min.Petr.Mitt. 1985. V. 34. P.217-238.
4. Foley S.F., Venturelli G., Green D.H., Toscani L. The ultrapotassic Rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models// Earth Sci. Rev., 1987. V. 24. P.81–134.
5. Gupta A.K. (1972). The system forsterite–diopside–akermanite–leucite and its significance in the origin of potassium-rich mafic and ultramafic rocks. Am. Min. 57, 1242–1259.
6. Gupta A.K. Origin of Potassium-rich Silica-deficient Igneous Rocks. Springer Geology (2015), Springer India, 529 p.
7. Koshlyakova A. et al. Ni partitioning between olivine and highly alkaline melts: An experimental study//Chem. Geol., 2022, T. 587. C.120615
8. Nag K., Arima M., Gupta A.K. Experimental study of the join forsterite–diopside–leucite and forsterite–leucite–akermanite up to 2.3 GPa [ $P(H_2O) = P(\text{total})$ ] and variable temperatures; its petrological significance // Lithos. 2007. 98 (1-4). P. 177–194.

## EXPERIMENTAL STUDY OF CRYSTALLIZATION OF ULTRAPOTASSIUM MELTS IN APPLICATION TO LAMPROITES OF THE GAUSSBERG VOLCANO (EAST ANTARCTICA)

**Koshlyakova A.N., Shishkina T.A., Lorentz K.A.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) RAS, Moscow, [a.koshliakova@gmail.com](mailto:a.koshliakova@gmail.com), [t.shishkina@geokhi.ru](mailto:t.shishkina@geokhi.ru)

Experimental study of crystallization of ultrapotassic melt (10-12 mas.%  $K_2O$ ), conducted at 1 atm, redox conditions at the level of NNO buffer and a temperature range of 1100 - 1300°C allowed to reliably reconstruct the crystallization order of Gaussberg lamproites minerals: leucite → olivine + leucite → olivine + leucite + clinopyroxene. The phase compositions of glass, high-magnesium olivine, clinopyroxene and leucite in experimental products correspond to the compositions of phenocrysts from natural samples.

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

**Краснова М.А., Белобородов Д.Е.**

Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), Москва

[mkrasnova@ifz.ru](mailto:mkrasnova@ifz.ru), [beloborodov@ifz.ru](mailto:beloborodov@ifz.ru)

Одним из важных вопросов в ультразвуковых исследованиях является проблема точности определения времен пробега и скоростей упругих волн в исследуемой среде. Точность определения времен пробега определяется особенностями используемого оборудования, правильностью интерпретации волновых форм, но также и геометрией и размерами исследуемых образцов. В связи со сложностью строения исследуемого объекта правильная интерпретация волновых форм является трудной задачей. Неверная интерпретация волновых форм приводит к неконтролируемым ошибкам, в то время как аппаратную точность можно определить и проконтролировать.

Экспериментальная ультразвуковая установка включает два пьезоэлектрических датчика, используемые как источник и приемник волн, генератор сигнала, передаваемого на пьезоэлектрический датчик-источник и возбуждающего упругую волну, усилителя принимаемого сигнала и цифрового осциллографа [Петров, Насимов, 2012; Дубиня и др., 2023]. Для улучшения поверхностного контакта между датчиками и образцом используется специальный гель полисахаридов. Начало регистрации сигнала совпадает с началом сигнала генератора. Эта система имеет конечное время реакции на сигнал генератора, которое необходимо учитывать при обработке. Эту поправку, как правило, определяют по сигналу датчик-датчик, либо по сигналам, прошедшим через эталонный образец с точно известными скоростями и размерами. Однако остается открытым вопрос о точном определении момента вступления сигнала датчик-датчик, а также о точности значений скоростей в эталоне, поскольку опыт показывает, что скорости в реальном эталонном образце алюминия могут отличаться от табличного значения на десятки метров в секунду.

В связи с этим нами было проведено методическое ультразвуковое исследование времен пробега и скоростей упругих волн на эталонных образцах металлов и сплавов. Для работы было изготовлено девять серий цилиндрических образцов из алюминия трех марок, стали двух марок, титана, бронзы, латуни и меди. Каждая серия включает 7 цилиндров с равным диаметром 30 мм но различной высоты: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 мм. Проверка однородности заготовок проводилась с помощью радиального зондирования с шагом 5 мм. Для всех использованных заготовок

разброс значений времен вступлений не превышал 0.02 мкс (одного шага дискретизации), то есть их можно считать однородными.

Исследования проводились разными типами пьезоэлектрических датчиков. В качестве источника и приемника использовались датчики с вариациями различных типов.

На эталонных образцах определялись времена пробега и скорости продольной волны вдоль оси образца. Анализировались значения скоростей продольных волн, полученных на цилиндрах каждой серии разной высоты. Полученные зависимости скорости от высоты цилиндра позволили уточнить поправки на время реакции системы для всех типов использованных датчиков. Полученные результаты показали, что ошибки определения временной поправки наиболее сильно сказываются на полученных скоростях при работе с образцами высотой менее 15 мм особенно для материалов с высокими скоростями, то есть при работе с образцами горных пород предпочтительно использовать образцы с длиной пробега равными или более 30 мм.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

## **Литература**

1. Дубиня Н.В., Краснова М.А., Белобородов Д.Е. и др. Изучение изменения внутреннего строения при квазипластическом деформировании горных пород в лабораторных условиях // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59. № 3. С. 32–57.
2. Способ определения неоднородностей упругих и фильтрационных свойств горных пород: Патент Российской Федерации RU 2515332 С1. Дата регистрации: 18.09.2012 г. Петров В.А., Насимов Р.М.

## **THE INFLUENCE OF ULTRASONIC EXPERIMENTAL CONDITIONS ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE VELOCITIES OF ELASTIC WAVES IN SAMPLES**

**Krasnova M.A., Beloborodov D.E.**

Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow,  
[mkrasnova@ifz.ru](mailto:mkrasnova@ifz.ru), [beloborodov@ifz.ru](mailto:beloborodov@ifz.ru)

Reference samples for nine different metals and alloys were made for study, subject of research being the travel times and velocities of longitudinal waves along the axis of samples. The latter were made of the same material, but having different heights. The obtained dependences of the speed on the cylinder height show that the errors in determining the time correction increase at the obtained speeds when working with samples less than 15 mm high, especially for materials with high longitudinal wave velocities. This also allows us to refine the corrections for the system response time for all types of sensors used.



## ПОДХОДЫ К АГРЕГИРОВАНИЮ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

<sup>1</sup>Краюшкин Д.В., <sup>1</sup>Казначеев П.А., <sup>1</sup>Мигунов И.В., <sup>1</sup>Индаков Г.С.,  
<sup>1</sup>Строганова С.М., <sup>2</sup>Патонин А.В., <sup>1</sup>Закржевская Н.А.,  
<sup>1</sup>Пономарев А.В.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН, Москва,  
[KrayushkinDenV@yandex.ru](mailto:KrayushkinDenV@yandex.ru);

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория «Борок», филиал ИФЗ РАН, пос.  
Борок, Ярославская область, Россия

Проанализированы подходы к агрегации больших объемов данных геофизических лабораторных высокочастотных экспериментов (с частотами регистрации порядка мегагерц и объемами порядка терабайт) в системе управления научным экспериментом. Предложена концепция архитектуры эффективной работы с данными, включающая модель данных, первичную подготовку данных, просмотр данных и вторичную обработку. Рассмотрены различные форматы хранения данных на различных этапах работы системы.

### **Введение**

Современный подход к исследованию физических процессов в науках о Земле требуют проведения экспериментов с использованием многоканальных систем регистраций, генерирующих данные в высокочастотном режиме (от кГц до МГц) на протяжении длительного интервала времени. За один цикл испытаний научная группа может получить массивы данных объемом в десятки терабайт, например [Казначеев и др., 2024а и 2024б].

Правильно спроектированная архитектура цифровой системы для хранения и обработки таких объемов становится важной частью для запуска исследовательских работ. Ключевая задача заключается не только в хранении данных, но и в обеспечении эффективного конвейера (pipeline) для их приема, первичной обработки, обогащения метаданными, анализа и предоставления результатов широкому кругу исследователей. Таким образом, проектирование масштабируемой, производительной и отказоустойчивой архитектуры цифровой системы становится критически важным этапом организации научных экспериментов, влияющим на скорость и качество научных открытий.

В работе рассматриваются подходы к проектированию архитектуры высокопроизводительной системы для хранения и обработки временных рядов с высокой частотой и длительным временем регистрации.



### **Этапы обработки данных**

Проектирование системы представляет собой создание сквозного конвейера данных (data pipeline), который включает следующие ключевые этапы:

1. *Прием и регистрация сигнала в реальном времени.* Высокоскоростной прием данных с измерительных устройств по множеству каналов.

2. *Первичная обработка и преобразование в реальном времени (Stream Processing).* Первичные действия системы регистрации: фильтрация, прореживание, обнаружение аномалий, первичная агрегация сырых сигналов.

3. *Преобразование первично обработанных данных в заданный формат хранения и их временное локальное размещение.*

4. *Обогащение метаданными и индексация.* Присоединение к каждой единице данных структурированных метаданных об эксперименте (источник, временные метки, параметры оборудования, геокоординаты и т.д.).

5. *Запись в долговременное хранилище.* Размещение первичных данных и метаданных в надежное, масштабируемое и экономически эффективное хранилище.

6. *Вычислительная обработка и анализ.*

7. *Сохранение результатов обработки.* Создание механизма хранения различных типов результатов обработки (метрики, модели, отчеты, параметры) с возможностью их последующего поиска, анализа и агрегации в рамках серий экспериментов.

8. *Визуализация результатов обработки и предоставления доступа к результатам обработки данных.*

### **Обзор подходов к хранению данных**

В основное тело сохраняемых исходных данных (raw data) входят значения амплитуд и временные отсчеты (timestamps). Сохраняемые данные также должны содержать основные (служебные) параметры сигналов: частоты дискретизации, единицы измерения и т.д. Дополнительно к сохраняемым данным могут прилагаться метаданные, которые содержат вспомогательную информацию о проведенном эксперименте (уникальные идентификаторы эксперимента, объектов исследования, используемых датчиков и их краткую характеристику). Учет всего комплекса данных является обязательным условием для обеспечения целостности и воспроизводимости результатов экспериментов, а также для их дальнейшей корректной обработки.

Хранение данных может быть осуществлено двумя способами: хранение всей информации в файле с заданным форматом и раздельное хранение исходных данных и метаданных, с включением в метаданные служебной информации. Второй способ предполагает хранение исходных данных в файле с заданным форматом, а метаданные и служебную информацию в реляционной СУБД с указанием доступа к файлу (сетевой или локальный).

Дополнительно в исходный файл включаются уникальный идентификатор записи в БД, а в записи БД включена служебная информация о сигнале. Такой подход обеспечивает гибкость при масштабировании и быстрый поиск средствами СУБД по метаданным и служебной информации без необходимости обращения к файлу исходных данных.

В рамках построения архитектуры цифровой системы наиболее частым и популярным является гибридный подход, когда система регистрации сохраняет исходные данные во временном хранилище, а конвейер обрабатывает временное хранилище, преобразуя «сырые данные» в заданный формат и создавая записи в БД с атрибутами сигнала (служебные параметры и метаданные). Такой подход позволяет разделить регистрацию данных с их обработкой и хранением. Преимуществом является независимые друг от друга возможности подсоединения к общей цифровой системе различных систем регистраций с собственными проприетарными форматами хранения данных и добавления в цифровую систему новых модулей обработки и общих форматов хранения данных.

В рамках работы были рассмотрены следующие подходы к организации хранения данных: Apache Parquet, Time Series Data Base (TSDB), хранение сырой информации в бинарном формате совместно с хранением служебной и вспомогательной информации в XML/JSON/YAML, Hierarchical Data Format (HDF5), Technical Data Management Streaming (TDMS) от National Instruments. На основании анализа предложены рекомендации использования форматов для системы регистрации, конвейера упаковки данных, а также подсистемы обработки и визуализации данных:

*Система регистрации* осуществляет захват данных и формирует файловую систему одну из трех видов: HDF5, TDMS или связка бинарный файл (.bin) с метаданными в XML/JSON/YAML. Эти форматы обеспечивают цельное сохранение сырых данных, служебной информации и метаданных, а, главное, способны поддерживать высокочастотную регистрацию временных рядов в режиме реального времени (Real-Time) без существенных вычислительных затрат.

*Конвейер упаковки данных* выполняет извлечение и структурирование служебной информации и метаданных. Рекомендуется использовать один из следующих сценариев работы: сохранение данных в исходном формате с регистрацией метаданных в реляционной базе данных для навигации по архиву, либо преобразование в облачно-ориентированные форматы (Apache Parquet или TSDB) с последующей загрузкой в облачное хранилище.

Для *подсистемы постобработки и визуализации* рекомендуется использовать форматы TSDB или Apache Parquet как наиболее совместимые с современными аналитическими инструментами и системами визуализации.

С учётом требований к долговечности хранения, большим объёмам данных и эффективному сжатию, рекомендуется следующий сценарий: исходные данные сохраняются в формате подобно HDF5, как открытым, кроссплатформенным и высокопроизводительным с широкими возможностями сжатия. Метаданные и служебная информация регистрируются в реляционной СУБД, что обеспечивает удобную навигацию по архиву и поиск данных, при этом ссылка на путь к соответствующему файлу данных также сохраняется в базе. Для передачи, обработки, аналитики и визуализации вспомогательный цифровой сервис (подсистемы постобработки и визуализации) преобразуют данные в Apache Parquet или загружают в TSDB, что обеспечивает максимальную совместимость с облачными хранилищами, инструментами обработки и платформ визуализации.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН.*

### **Литература**

1. Казначеев П. А., Майбук, З.-Ю. Я., Пономарев, А. В., Патонин, А. В., Соболев, Г. А., Краюшкин, Д. В., Кох, В. В. Лабораторное моделирование смещений блоков горных пород: малоамплитудные быстрые движения в экспериментах на слайдер-модели разлома // Вестник Санкт-Петерб. унив. Науки о Земле. 2024а. Т. 69(2). С. 216–236.

2. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А.В., Соболев Г.А., Патонин А.В., Кох В.В., Краюшкин Д.В., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н. Эксперименты на слайдер-модели разлома: влияние увлажнения зоны разлома на параметры модельных землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах : тез. докл. конф., Долгопрудный, 02–05 июля 2024 года. – М.: ИДГ РАН, 2024б. – С. 52.

### **APPROACHES TO AGGREGATING TIME SERIES AND METADATA IN GEOPHYSICAL EXPERIMENTATION**

<sup>1</sup>**Krayushkin D.V., <sup>1</sup>Kaznacheev P.A., <sup>1</sup>Migunov I.V., <sup>1</sup>Indakov G.S.,**

<sup>1</sup>**Stroganova S.M., <sup>2</sup>Patonin A.V., <sup>1</sup>Zakrzhevskaya N.A.,**

<sup>1</sup>**Ponomarev A.V.**

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow,

[KrayushkinDenV@yandex.ru](mailto:KrayushkinDenV@yandex.ru);

<sup>2</sup>Geographical Observatory “Borok” of the IPE of the RAS, Borok, Yaroslavskaia obl., Russia

Approaches to aggregating large volumes of data from geophysical laboratory high-frequency experiments (TB and MHz) within a Scientific Experiment Management System (SEMS) have been analyzed. A concept for an efficient data handling architecture has been proposed, which includes a data model, primary data preparation, data visualization, and secondary data processing. Various data storage formats at different stages of the system have been considered.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СКОРОСТЯМ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫХ ПРОСЛОЕВ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ИНДИКАТОРНЫМ (ТРАССЕРНЫМ) МЕТОДОМ

<sup>2</sup>**Кузнецова К.И., <sup>1</sup>Хозяинов М.С.**

<sup>1</sup>Государственный университет "Дубна", Дубна, [mkhoz@mail.ru](mailto:mkhoz@mail.ru)

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна

Исследованием строения и происхождения высокопроницаемых прослоев (суперколлекторов) в нефтяных пластах занимались разные специалисты в области геологии нефти и газа. Происхождение этих прослоев является предметом дискуссий. Одним из методов выявления таких высокопроницаемых прослоев является индикаторный (трассерный) метод. Основные параметры высокопроницаемых прослоев, полученные при помощи индикаторного метода, это масса индикатора и скорость фильтрации. Авторами были обработаны результаты индикаторных исследований и получены распределения скоростей фильтрации меченой воды по высокопроницаемым прослоям для месторождений Арман, Узень, Каракудук с продуктивными пластами Ю. Построено также суммарное распределение по этим месторождениям. *Месторождение Арман.* Трассерные исследования и интерпретация результатов проводились на участках 6 нагнетательных скважин месторождения, отбор проб производился с устьев 12 скважин, а количество не нулевых проб составило 477 точек, 3 нагнетательные скважины вскрывали пласт Ю7, 3 других нагнетательных работали на пласт Ю12. Добывающие скважины работали на пластах Ю3, Ю7, Ю8 и Ю12. На гистограмме (рис.1) показано распределения переноса меченого вещества с разными скоростями по высокопроницаемым прослоям для всех 6 участков суммарно. Для полученного распределения скоростей была получена аппроксимирующая кривая, которая описывается сверткой двух функций – функцией Гаусса и функцией экспоненты. Как видно из графика среднее значение скорости по Гауссу составляет 6м в сутки. Пласты Ю3, Ю7, Ю8 и Ю12 в месторождении Арман состоят преимущественно из песчаников с переменными включениями алевролитов, глин и карбонатных пород. Каждый пласт имеет свои особенности в коллекторских свойствах и герметичности. Рассмотрим каждый пласт по отдельности. Пласт Ю3 сложен преимущественно песчаниками и алевролитами, с прослоями глин. Песчаники характеризуются хорошей пористостью и проницаемостью, что делает их отличными коллекторами. Песчаники в основном кварцевые, с примесью глинистого материала. Пористость песчаников может варьироваться в

пределах 18-25%. Пласт Ю7 сложен преимущественно песчаниками, реже алевролитами, с включениями глинистых и карбонатных прослоев. Песчаники этого пласта имеют более высокое содержание кварца, а также наблюдаются глинистые включения, что может снижать проницаемость в некоторых зонах. Пористость песчаников в Ю7 находится на уровне 15-22%, проницаемость несколько ниже по сравнению с пластом Ю3.

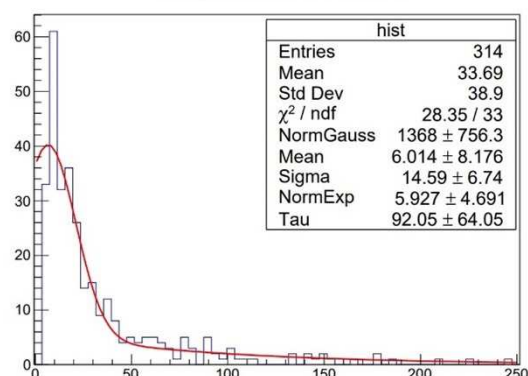


Рис.1 Гистограмма (синяя линия) и аппроксимирующая кривая (красная линия) для месторождения Арман.

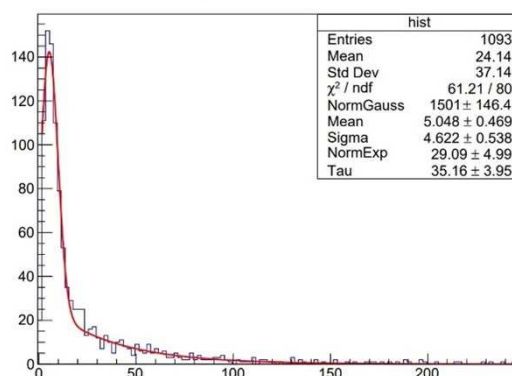


Рис.2 Гистограмма распределения и аппроксимирующая кривая для месторождения Узень.

Пласт Ю8 сложен песчаниками и алевролитами, с выраженными прослоями глин и известняков. Песчаники здесь менее пористы по сравнению с Ю3 и Ю7, но обладают хорошей коллекторской способностью. Пористость песчаников в этом пласте ниже, около 14-20%. Пласт Ю12 сложен в основном песчаниками и алевролитами, но больше карбонатных пород, известняков и доломитов. Наблюдаются также глинистые прослои, которые могут ухудшать условия фильтрации. Пласт Ю12 обладает меньшей пористостью по сравнению с верхними пластами, около 12-18%. Проницаемость по пластам Ю3, Ю7, Ю8 и Ю12 варьируется от 0,013 до 0,138 мкм<sup>2</sup>. На *месторождении Узень* трассерные исследования и интерпретация результатов были проведены на 11 участках нагнетательных скважин и их добывающего окружения, горизонтов 13,14,15, 16 и 17. Количество не нулевых проб составило 1094 точки. Горизонты 13-17 месторождения Узень сложены преимущественно песчаниками, алевролитами и глинами, что связано с осадочными условиями прибрежно-морских и дельтовых систем юрского периода. Горизонт 13 сложен песчаниками с прослоями алевролитов и глин. Основной состав представлен кварцевыми песчаниками с хорошими коллекторскими свойствами.

Горизонт 14 – в основном песчаники и алевролиты с примесью глинистых пород. Горизонт 15 - песчаники с высокой долей глинистого цемента. Алевролиты и глины играют роль покрышек. В горизонте 16 преобладают песчаники, слабо цементированные глинами и карбонатными отложениями. Горизонт 17 сложен песчаниками и алевролитами с примесью глин, иногда с присутствием карбонатов. Продуктивные горизонты сложены осадочными породами с пористостью 23–30% и проницаемостью в диапазоне от 0,013 до 0,138 мкм<sup>2</sup>. Среднее по Гауссу составляет 5 м в сутки.

Для месторождение *Каракудук* было построено распределение скоростей для 5 участков нагнетательных скважин и 35 добывающих скважин, число не нулевых проб составило 839 (рис.3). Продуктивные пласты Ю1 и Ю2 месторождения *Каракудук* сложены преимущественно песчаниками с прослоями глин и алевролитов. Пласт Ю1 отличается более высокой пористостью и проницаемостью благодаря слабому цементированию песчаников. Пласт Ю2 имеет больше глинистых включений, что снижает его проницаемость. Пласт Ю1 характеризуются высокой пористостью, достигающей 20-25%. Проницаемость варьируется от 150 до 250 мД. Пористость песчаников пластов Ю2 несколько ниже и составляет 15-20%. Проницаемость варьируется в пределах 100-150 мД. Среднее значение скорости по Гауссу составила 8,5 метров в сутки.

Аппроксимирующая кривая для каждого из распределений представляет из себя сумму двух функций – функцию Гаусса и функцию экспоненты. Для каждого месторождения подбирались свои параметры, тем не менее вид кривой всегда описывал любое из распределений скоростей одной и той же функцией, представленной ниже. Для определения начальной скорости по высокопроницаемым прослоям предлагается считать среднее значение по Гауссу, так как при нормальных условиях распределения скоростей было бы описано именно этой функцией.

$$NormGaus * \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{\left(-\frac{(x-mean)^2}{2\sigma^2}\right)} + \frac{1}{2}(1 + Erf\left[\frac{(x - mean)}{\sqrt{2} \sigma}\right]) \\ * Norm \exp * e^{\left(-\frac{x-mean}{\tau}\right)}$$

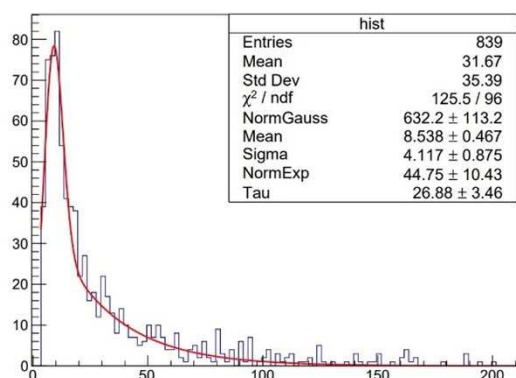


Рис.3. Гистограмма распределения скоростей фильтрации и аппроксимирующая кривая для и аппроксимирующая кривая для. Обозначения на рис.1.

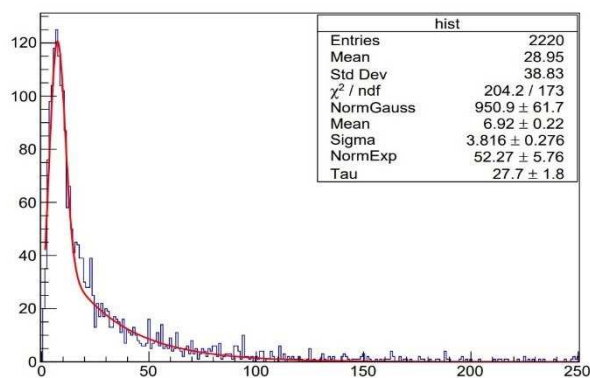


Рис.4. Обобщенные гистограмма распределения скоростей фильтрации и аппроксимирующая кривая для трех месторождений. Обозначения на рис.1.

Был построен обобщенный график всех 3-х месторождений для продуктивных пластов Ю (рис.4). Обобщенный график распределения скоростей, также как и трех месторождений по отдельности описывается сверткой двух функций Гаусса и экспоненты. Из гистограммы распределения скоростей по высокопроницаемым прослоям для месторождений по пластам Ю видно, что средняя скорость по Гауссу составляет 6,9 метров в сутки, а стандартное отклонение составляет 3,8. Из этого можно предположить, что начальные скорости для высокопроницаемых прослоев варьируются от 3-4 м до 10-11 метров в сутки.

## FEATURES OF DISTRIBUTION BY VELOCITIES OF HIGH-PERMEABLE LAYERS IN THE OIL RESERVOIR DETERMINED BY THE TRACER METHOD

<sup>2</sup>Kuznetsova K.I., <sup>1</sup>Khozyaiov M.S.

<sup>1</sup>State University "Dubna", Dubna, [mkhoz@mail.ru](mailto:mkhoz@mail.ru)

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna

The results of processing tracer studies on three oil fields are presented. It is shown that the distribution of high-permeability layers by velocity is described by a convolution of two functions – Gaussian and exponential. Histograms of distributions and approximating functions are given.



## ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

**Кузьмина Т.Г., Хохлова И.В., Ромашова Т.В., Тронева М.А.**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН,

Москва, ул. Косыгина д.19, [kuzminatg@inbox.ru](mailto:kuzminatg@inbox.ru)

Необходимость получения сведений о химическом составе геологических образцов требует привлечения различных методов анализа. Современные тенденции их развития обусловлены потребностями исследования все большего количества образцов с одновременным увеличением номенклатуры определяемых элементов. Одним из наиболее эффективных методов является рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Хорошо известны его преимущества: возможность определения из одной навески элементов от фтора до урана в диапазоне содержаний  $10^{-4}$ -100%, высокая точность определений, экспрессность и производительность, достаточно простые способы подготовки проб к анализу.

В ГЕОХИ РАН на протяжении 20 лет используется рентгенофлуоресцентный спектрометр AXIOS Advanced (фирма "PANalytical", Голландия), оснащенный рентгеновской трубкой с родиевым анодом мощностью 4 кВт и волновым сканирующим каналом по Соллеру с набором кристаллов-анализаторов.

Для количественного определения содержания элементов в горных породах рентгенофлуоресцентным методом разработано три методики с использованием различных способов пробоподготовки: прессование порошковых проб; сплавление в золото-платиновых тиглях с получением стеклянных дисков; сплавление на графитовых подложках с последующим растиранием плава и прессованием таблетки.

Прессование порошковых проб в таблетки является наиболее экспрессным, простым и дешевым способом. Прессовать излучатели можно со связующим веществом (раствор желатина, крахмал, целлюлоза, борная кислота, полистирол, поливиниловый спирт, пр.) и без связующего вещества в виде двухслойных таблеток на борной кислоте. Использование практически неразбавленного материала позволяет получить максимальную интенсивность флуоресценции элементов и минимальные пределы обнаружения, что дает возможность применять этот способ для определения содержания как макро так и микроэлементов. Недостаток способа прессования заключается в том, что в этом случае интенсивность

аналитической линии зависит от минерального состава образца, качества облучаемой поверхности и микроабсорбционной (МАН) неоднородности, включающей в себя зависимость интенсивности анализируемого элемента от размера частиц и эффекта обволакивания.

Сплавление пробы с флюсом как в золото-платиновых, так и в графитовых тиглях является универсальным способом для силикатного анализа, позволяющим исключить влияние минерального состава и эффекта МАН на интенсивность флуоресценции. Однако эти процедуры более трудоемкие (особенно сплавление на графитовых подложках) и требуют высокой квалификации специалистов.

Расчет количественного содержания элементов в этих методиках проводится по регрессионным уравнениям, связывающим искомую концентрацию  $C_i$  элемента  $i$  с интенсивностью его аналитической линии и химическим составом анализируемой пробы. Для получения уравнений применены способы фундаментальных параметров и теоретических поправок, а также полуэмпирические и эмпирические уравнения связи, коэффициенты которых рассчитываются с использованием стандартных образцов состава (СОС) горных пород. Наиболее точные результаты получаются в тех случаях, когда содержания элементов в анализируемых пробах находятся в диапазонах концентраций этих элементов в применяемых СОС.

Значительно сложнее решать аналитические задачи, когда нельзя соблюсти эти условия: отсутствуют соответствующие образцы сравнения, а состав исследуемой пробы неизвестен или не имеет аналогов. К таким объектам относятся, например, продукты экспериментальных исследований, образцы внеземного происхождения, археологические находки и т.п. Однако, современная рентгенофлуоресцентная аппаратура (в том числе, и используемый нами спектрометр) снабжена, как правило, мощным программным обеспечением, которое позволяет решать такие сложные задачи. В этом случае используется программа сканирования рентгеновского спектра характеристического излучения атомов всех элементов от О до U. После расшифровки спектра и идентификации аналитических линий элементов, входящих в состав исследуемой пробы, производится полуколичественное определение ее химического состава. Расчет проводится способом фундаментальных параметров, который опирается на измерения интенсивностей 15 синтетических СОС с набором элементов от О до U известной концентрации. Эта программа позволяет определять содержания элементов с

пределом обнаружения  $n \cdot 10^{-3}\%$ . В расчетах учитывается выход флуоресценции атомов, присутствующих в пробе, поглощение характеристического излучения элементов, дополнительное возбуждение, эффекты взаимного влияния элементов, наложение аналитических линий и некоторые другие параметры. Для этого анализа используются, как правило, таблетки, спрессованные из исходного материала с добавлением полистирола в качестве связующего вещества.

В том случае, когда материал уникален и его надо сохранить для проведения последующих исследований, обзорный анализ может быть выполнен без разрушения пробы. Такой вариант анализа был нами неоднократно применен для изучения метеоритного вещества, в том числе Челябинского метеорита, экспериментальных проб, полученных при моделировании процессов образования горных пород, различных объектов (в том числе артефактов) неизвестного состава, и пр.

#### APPLICATION OF X-RAY FLUORESCENT ANALYSIS TO DETERMINE THE CHEMICAL COMPOSITION OF GEOLOGICAL AND EXPERIMENTAL SAMPLES

**Kuzmina T.G., Khokhlova I.V., Romashova T.V., Troneva M.A.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) of the Russian Academy of Sciences,

Moscow, Kosygina St., 19, [kuzminatg@inbox.ru](mailto:kuzminatg@inbox.ru)

Three approaches have been developed to determine the content of elements in rocks using the X-ray fluorescence method, using various methods of sample preparation: pressing of powder samples; fusion in gold-platinum crucibles to obtain glass disks; fusion on graphite substrates with subsequent grinding of the melt and pressing of the tablet. The calculation of the quantitative content of elements is carried out using multiple regression equations, the coefficients of which are obtained using standard samples of composition (SSC). To determine the chemical composition of samples of unknown origin, a program for scanning the X-ray spectrum of the characteristic radiation of atoms of all elements from O to U is used. After identifying the analytical lines of the elements included in the sample being studied, a semi-quantitative determination of its chemical composition is performed.

## ВЛИЯНИЕ ГЛУБИННЫХ ФЛЮИДОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ НЕФТЕЙ В ЖЕСТКИХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ГЛУБИН ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ

**Левшунова С.П., Карташов А.А., Роот Д.В., Иванова С.Р.**

Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ФГБУ «ВНИГНИ»), Москва, [lev@vnigni.ru](mailto:lev@vnigni.ru)

Успехи мирового опыта в поисках месторождений углеводородов на больших глубинах (Венесуэла, Бразилия, Мексиканский залив, Таримский бассейн и др.) обусловили возникновение интереса к поискам таких залежей и в Прикаспийском нефтегазоносном бассейне. В связи с этим, были рассмотрены результаты изучения нефтей в палеозойских отложениях в жестких термобарических условиях больших глубин в Прикаспийской впадине и обоснован возможный механизм их формирования.

В скв. 2 Володарская на глубине 5961 м во франских отложениях обнаружены признаки нефтегазоносности. Изучены литологический состав пород, геохимические характеристики ОВ и сорбированных породами газов. Известняки содержат битуминозные вещества, включая темный битум вдоль стилолитовых зубцов (в интервалах 5542,46-5548,26 м). В верхнедевонских интервалах выявлены твердые асфальтоподобные битумы (кериты). Проведенное изучение сорбированных породами газов, извлеченных из пород методом химдегазации соляной кислотой в вакууме с последующим поглощением образовавшейся  $\text{CO}_2$  35% раствором КОН, показало наличие очень высоких концентраций ( $34,92\text{--}104,80 \text{ см}^3/\text{кг}$ ) сухих УВГ ( $\text{CH}_4=98,80\text{--}99,98\%$ ) [Соловьев, 1999], что подтверждает газоматеринский потенциал верхнедевонских отложений.

На Астраханском своде ниже 5500 м температура достигает  $170\text{--}200^\circ\text{C}$ , давление — 120 МПа. В скв. 2 Володарская на глубине 5817-5961 м зафиксированы нефтепроявления (плотность  $0,871 \text{ г/см}^3$ ). В Каракульско-Смушковской зоне условия жестче (до  $300^\circ\text{C}$ ), но здесь также обнаружены значительные нефтепроявления (скв. 1 Ашунская, скв. 1 Краснохудукская). В связи с этим было обращено особое внимание на способность твердых битумов растворяться в сжатых газах.

Исследования растворимости УВ в  $\text{CO}_2$  [Жузе, 1981; Price, 1980] показали, что при  $T > 100^\circ\text{C}$  и  $P > 80 \text{ МПа}$  нефть полностью растворяется в смеси  $\text{CO}_2$  с метаном. Присутствие воды усиливает процесс [Petrenko, 1997]. В Астраханском разрезе содержание  $\text{CO}_2$  растет с глубиной (12-27%), а в Каракульско-Смушковской зоне

достигает 84-97%. Гидролиз карбонатов и глубинный  $\text{CO}_2$  объясняют высокие концентрации гелия (0,13%).

На юго-западе минерализация вод снижается до 50 г/л, тип меняется на гидрокарбонатно-натриевый, что связано с конденсацией глубинных паров. Таким образом, в Прикаспийской впадине на глубинах >5 км наблюдается парагенез  $\text{CO}_2$ , низкоминерализованных вод и высоких термобарических условий.

Таким образом, создается следующая генетическая цепочка генерации вторичных нефтей в карбонатных породах на больших глубинах (порядка 5 км и больше) в Прикаспийской впадине. Первичные нефти, генерированные сапропелевым ОВ девон-каменноугольных отложений, в жестких термобарических условиях зоны апокатагенеза, превращаются в твердые битумы. Начавшаяся генерация  $\text{CO}_2$  в результате гидролиза карбонатных минералов при температурах выше  $80^\circ\text{C}$  ведет к началу растворения в ней смол, асфальтенов и углеводородов этих твердых битумов, а поднимающиеся массы глубинного углекислого газа усиливают этот процесс растворения, делая его перманентным вплоть до сегодняшнего дня, генерируя в конечном итоге вторичные нефти повышенной плотности.

Проведенный анализ распределения температур на срезе 4500м показал наличие самых высоких значений в юго-западной и южной частях Прикаспийской впадины, однако обнаруженная в Каратон-Тенгизской зоне в месторождении Тенгиз в раннекаменноугольно-девонских отложениях на глубине 5415 м нефть совсем другая: она легкая –  $0,789 \text{ г/см}^3$ . Для создания геолого-геохимической модели месторождения Тенгиз были разработаны критерии прогноза фазового состояния УВ по информации о сорбированных газах, дополненные анализом удельной гамма-активности пород [Левшунова, 1996]. Современное пластовое давление составляет 84,4 МПа, температура  $105^\circ\text{C}$ . Отражательная способность витринита ( $R_o=0,97\%$ , палеотемпература -  $175^\circ\text{C}$ ) ОВ раннекаменноугольно-девонских отложений в совокупности с установленным «сухим» составом сорбированных УВГ свидетельствуют о пребывании в Главной зоне газообразования. Кроме того, в зонах разломов нами установлены аномально высокие концентрации сорбированного водорода – до  $530 \text{ см}^3/\text{кг}$  (скв.10), практически не встреченные ни в одном из проанализированных регионов. Этому сопутствует аномально высокие значения радиоактивности, причем связанной не с глинистостью, а с радиоактивностью твердой фазы пород [Клещев, 1998]. Возникновение зоны аномальной радиоактивности связано с накоплением радиоактивных изотопов, прежде всего уранового, а

также ториевого ряда, в том числе радия, в процессе изоморфного замещения радием кальция в карбонатных минералах. В результате воздействия на воду  $\alpha$ -лучей происходит высвобождение водорода, который воздействует на палеобитумы, приводя к генерации вторичных лёгких нефтей [Levshounova, 1991]. Работами [Клещев, 1998] спрогнозировано распространение океанического типа фундамента, сложенного базальтами, в центральной части Прикаспийской впадины. Серпентинизация базальтов сопровождается выделением свободного водорода, который также реагируя с палеобитумами на больших глубинах, ведет к генерации вторичной легкой нефти. Тенгизская структура находится в зоне влияния обширного трансконтинентального глубинного разлома, проникающего до границы Мохоровичича, по которому понимался водород.

Итак, установлено влияние глубинных флюидов на особенности формирования нефтей на больших глубинах в жестких термобарических условиях в Прикаспийской впадине. В таких условиях содержащиеся в карбонатных толщах залежи палеобитумов будут растворяться в смеси паров воды и углекислоты, как глубинной, так и выделяющейся при термолизе карбонатных минералов с образованием вторичных тяжелых нефтей. Зона таких нефтей прогнозируется в карбонатных палеозойских отложениях на юго-западе Прикаспийской впадины. К центральной части Прикаспийской впадины прогнозируется смена карбонатного осадконакопления терригенным с ростом глинистой составляющей. Взаимодействие выделившегося при серпентинизации базальтов водорода с находящимися на больших глубинах залежами палеобитумов может приводить (как в месторождении Тенгиз) к генерации вторичной легкой нефти.

По оценкам большинства исследователей, пик открытия традиционных залежей нефти и газа пройден. Дальнейшее развитие нефтегазопроисловых работ все больше связывается с нетрадиционными залежами, к которым относятся залежи нефти и газа на больших глубинах (глубже 15 000 футов или 4,5 км).

*Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Госзадания Федерального агентства по недропользованию ФГБУ «ВНИГНИ» № 049 – 00001- 25 – 00 от 25.12.2024 г.*

### **Литература**

1. Геохимические особенности нефтегазоносности Прикаспийской впадины//Труды ВНИГНИ, М., Вып.251, Недра, М., с.265.

2. Жузе Т.П. Роль сжатых газов как растворителей, М., Недра, 1981, с.165.
3. Клещев К.А., Петров А.И., Шеин В.С. Геодинамика и новые типы природных резервуаров нефти и газа. М., Недра, 1998, с.190.
4. Левшунова С.П. Использование информации по сорбированным газам для создания геолого-геохимической модели месторождения Тенгиз//Геология нефти и газа. 1996, №8, с.37-44.
5. Соловьев Б.А., Левшунова С.П. Новый взгляд на геологическую модель и генезис углеводородных флюидов глубоких горизонтов Астраханского свода Прикаспийской впадины //Новые идеи в геологии и геохимии Нефти и газа.Сборник тезисов. М., МГУ, 1999, с.254-256.
6. Levshounova S.P. Hydrogen in petroleum geochemistry // Terra Nova ,1991, T.3, p. 579.
7. Petrenko V.I., Schugorev V. D., N. V. Petrenko, S.N. Beletskaya . Mechanism of liquid hydrocarbon gas- phase transfer // 18<sup>th</sup> International meeting on Organic Geochemistry. Abstracts. Maastricht. 1997, p. P. 169-170.
8. Price 1. Shelf and shallow basin oil as related to hot deep origin of petroleum // Journal of Petroleum Geology, 1980, vol. 3, no. 1, p. p. 91- 116.

#### THE INFLUENCE OF DEEP FLUIDS ON THE FORMATION OF SECONDARY OILS UNDER RIGOROUS THERMOBARIC CONDITIONS AT GREAT DEPTHS IN THE PRECASPIAN DEPRESSION

**Levshunova S.P., Kartashov A.A., Root D.V., Ivanova S.R.**

All-Russian Research Geological Oil Institute (FSBI "VNIGNI"), Moscow,  
[lev@vnigni.ru](mailto:lev@vnigni.ru)

By synthesizing published data on oil compositions at great depths (approximately 5 km) in the PreCaspian Depression and conducting original studies of sorbed gases in rocks, it has been established that deep fluids with elevated CO<sub>2</sub> concentrations lead to the dissolution of paleobitumens followed by the generation of heavy secondary oils. In contrast, the dissolution of paleobitumens in deep fluids with high hydrogen content under the rigorous thermobaric conditions of great depths results in the formation of secondary light oils. The deep origin of these CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> has been proven.



# ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОНЫ РУДОНОСНОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА В РАЗРЕЗЕ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ

<sup>1</sup>Лобанов К.В., <sup>1</sup>Чичеров М.В., Горностаева Т.А., <sup>2</sup>Жиров Д.В.,  
 Мохов А.В., <sup>1</sup>Карташов П.М., <sup>1</sup>Прокофьев В.Ю.

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
 минералогии и геохимии РАН, Москва, [lobanov@igem.ru](mailto:lobanov@igem.ru),

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) дала много информации в различных областях геологии, в том числе в познании процессов рудообразования. По рудной минерализации одним из наиболее интересных участков является интервал 9500-11000 м. Здесь на глубине 9500-9700 м СГ-3 пересекла зону глубинного разлома в породах кольской серии. Зона фиксируется по резкому изменению залегания пород и дайкообразному телу среднепротерозойских (1.8 млрд. лет) порфиroidных гранитов. Зона разлома отчетливо выделяется по изменениям петрофизических свойств пород (рис.1, 2).

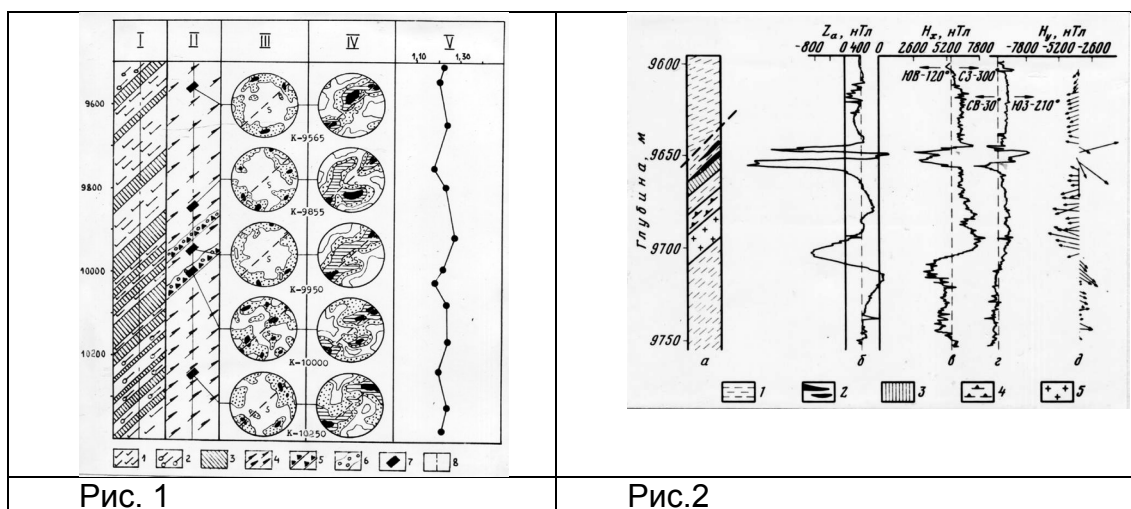


Рис. 1. Схема зоны разлома в архейском комплексе с зонами регрессивного метаморфизма. I – геологический разрез, II – текстуры и места отбора ориентированных образцов; III – микроструктурные диаграммы; IV – петрофизические диаграммы  $V_p$ ; V – коэффициент анизотропии  $AV_p$ . Изолинии  $V_p$  на диаграмме проведены через 0,25 км/с. Диаграммы даны в проекции на вертикальную плоскость.

Рис.2. Строение разлома в кольской серии в интервале 9600 - 9750 м: а – разрез скважины, б-г – результаты измерений вертикальной и двух горизонтальных составляющих магнитного поля, д – построение векторов поля  $H_a$  в плане.

Для пород этой зоны характерны минерало-структурные и петрофизические диаграммы (рис.1), на которых отсутствуют четкая ориентировка зерен кварца, так и полос  $V_p$ , для пород из зон разлома. Это обусловлено развитием здесь процессов регрессивного метаморфизма, при котором вновь образованные минералы влияют на анизотропию породы. Значение  $AV_p$  для всего этого интервала 1,18-1,28. Зона разлома с её сложным внутренним строением также хорошо выделяется при каротажных магнитометрических исследованиях (рис. 2).

В этой зоне впервые в разрезе СГ-3 были обнаружены минеральные формы золото-серебряной, палладиевой минерализации и выделения самородного кобальта (рис.3).

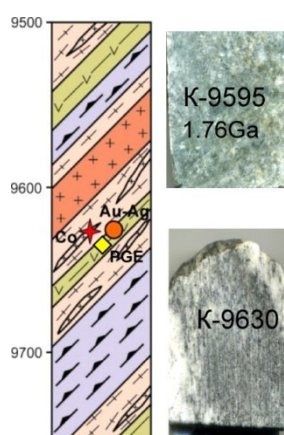


Рис. 3. Фрагмент разреза СГ-3 с зоной глубинного рудоносного разлома в архейских породах кольской серии; образец керна СГ-3 К-9695 лицевских протерозойских гранитов; образец керна СГ-3 К-9630, в котором была обнаружена золото-серебряная, палладиевая и самородная кобальтовая минерализация.

На расстоянии 410 м содержания золота превышают 0,1 г/т, а местами достигают 1 - 6,7 г/т. В шлифах из керна обнаружены мельчайшие выделения самородного золота в биотите, роговой обманке, плагиоклазе. Золото не образует сростаний с другими рудными минералами и содержит до 26 % серебра [Лобанов и др., 2018]. Золотая минерализация пространственно совпадает с зонами регрессивных изменений, что говорит о ее структурном контроле. Впервые установлено наличие золота в сульфидах.

При изучении флюидных включений (ФВ) в кварце жил и прожилков из золотоносного интервала были обнаружены четыре типа флюидов, содержащие высокие концентрации золота в виде наночастиц [Прокофьев и др., 2019].

Впервые в образцах из зоны разлома (около 10 км) выявлена палладиевая минерализация [Лобанов и др., 2021]. Диагностирован собственный палладиевый минерал – меренскиит (рис. 4), что подтверждает наличие палладиевой минерализации на глубоких горизонтах СГ-3 в виде самостоятельной минеральной формы. Таким образом, обнаружен новый для СГ-3 тип оруденения – благороднометалльно (Au-Ag-Pd) редкоэлементный (Bi-Te).

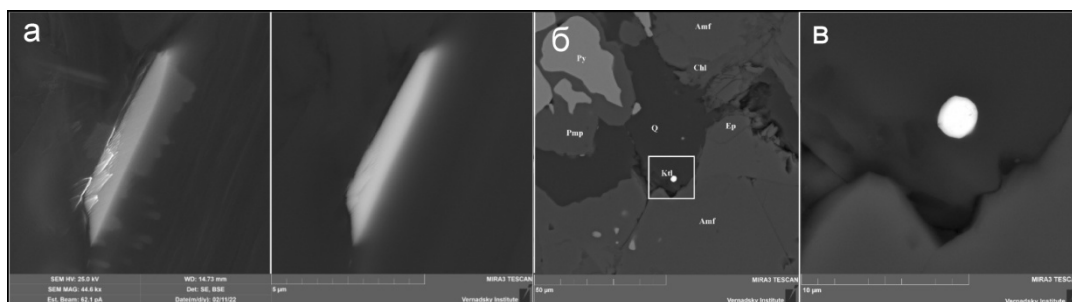


Рис. 4. Кристалл меренскиита после травления ионами галлия глубина 10 км (а), изображение кристалла котульскита в кварце с глубины 10097 м в отражённых электронах (BSE) (б, в).

Существование палладиевой минерализации в разрезе СГ-3 является дополнительным аргументом в пользу формирования аналогичной рудной минерализации в породах массива Горы Генеральской.

Частицы самородного кобальта были вскрыты при детальном изучении зерен палладиевого минерала меренскиита [Лобанов и др., 2023]. В составе самой крупной частицы (15x8 мкм), кроме самородного кобальта, была зафиксирована примесь марганца с содержанием 0.2 мас. % (рис. 5).

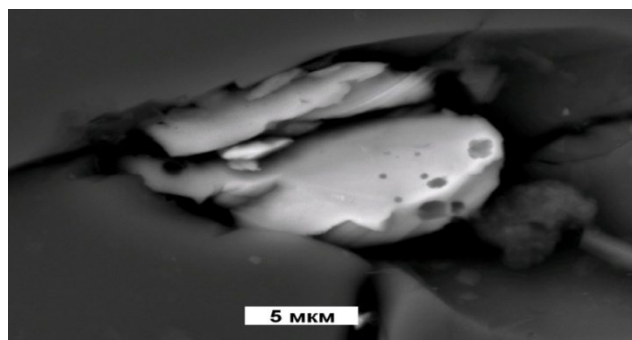


Рис. 5. Одна из частиц самородного кобальта. СЭМ, отражённые электроны.

В настоящее время в природе известно всего две фазы на основе кобальта - самородный Co и вайраут CoFe. Большинство достоверных находок самородного Co на Земле связано с гидротермальными процессами в ходе серпентинизации гипербазитовых массивов. Нами самородный кобальт был впервые обнаружен в высокотемпературных метаморфитах на глубинных горизонтах СГ-3, где этот минерал образовался на высокотемпературном этапе, до их гидротермальной переработки.

## Литература

1. Горностаева Т. А., Мохов А. В., Карташов П. М., Лобанов К. В. Самородный кобальт на глубинных горизонтах Кольской

сверхглубокой скважины / Записки российского минералогического общества. 2023, Ч. CLII, № 1, с. 37-49

2. Лобанов К.В., Чичеров М.В. Горностаева Т.А. Корреляция зон разрывных нарушений и золотой минерализации в разрезе Кольской сверхглубокой скважины // Девятнадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". Москва, 24-26, Борок, 28 сентября 2018 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 208-211.
3. Лобанов К. В., Горностаева Т. А., Карташов П. М., Мохов А. В., Чичеров М. В. Проявление палладиевой минерализации на глубинных горизонтах кольской сверхглубокой скважины / Доклады российской академии наук. Науки о земле, 2021, том 499, № 2, с. 26–31
4. Прокофьев В. Ю., Лобанов К. В., Пэк А. А., Чичеров М. В., Боровиков А. А. Минералообразующие флюиды золотоносного интервала Кольской сверхглубокой скважины / Доклады академии наук. Геохимия, 2019, том 485, № 6, с. 736–740

#### PETROPHYSICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ORE-BEARING DEEP FAULT ZONE IN THE SECTION OF THE KOLA SUPERDEEP BOREHOLE

**<sup>1</sup>Lobanov K.V., <sup>1</sup>Chicherov M.V., Gornostaeva T.A., <sup>2</sup>Zhirov D.V., Mokhov A.V., <sup>1</sup>Kartashov P.M., <sup>1</sup>Prokofiev V.Yu.**

<sup>1</sup>Institute of geology of ore deposits (IGEM) RAS, Moscow.

[lobanov@igem.ru](mailto:lobanov@igem.ru)

<sup>2</sup>Geological Institute KSC RAS, Apatity

The Kola superdeep borehole has provided a lot of important information in various fields of geological science, including knowledge of ore formation processes. From the point of view of ore mineralization, one of the most interesting sites is the interval of 9500-11000 meters. In this interval, at a depth of 9500-9700 meters, the well crossed a deep fault zone in rocks of the Archean Kola series. This zone is fixed by a sharp change in the occurrence of rocks and a dike-like body of Middle Proterozoic (1.8 billion years old) porphyritic granites. The fault zone is clearly distinguished by changes in the petrophysical properties of rocks. The manifestation of gold-silver, cobalt and palladium mineralization is associated with this zone.

# РЕДОКС СОСТОЯНИЕ АЛМАЗОНОСНЫХ ЭКЛОГИТОВЫХ КСЕНОЛИТОВ В КИМБЕРЛИТАХ КРАТОНА КАССАИ (ЗАПАДНАЯ АФРИКА) ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОБСТВЕННОЙ ЛЕТУЧЕСТИ КИСЛОРОДА ГРАНАТОВ И КЛИНОПИРОКСЕНОВ

**Луканин О.А., Жаркова Е.В.**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского (ГЕОХИ РАН), [lukanin@geokhi.ru](mailto:lukanin@geokhi.ru); [zharkova@geokhi.ru](mailto:zharkova@geokhi.ru)

Летучесть кислорода ( $fO_2$ ) - важный термодинамический параметр, характеризующий редокс состояние мантии, который влияет на состав и соотношения минеральных фаз, а также на поведение поливалентных и летучих элементов при формировании и эволюции мантийных магм и флюидов. Оценки  $fO_2$  минеральных ассоциаций глубинных ксенолитов из кимберлитов и базальтовых магм, выполненные с применением минеральных оксидометров и электрохимических измерений, демонстрируют широкие вариации летучести кислорода в пределах литосферной мантии как по глубине, так и по латерали [Кадик и др., 1988; Goncharov et al., 2012; Yaxley et al., 2017; Woodland et al., 2021; Жаркова, Луканин, 2023 и др.].

В данной работе представлены результаты электрохимического определения собственной  $fO_2$  для клинопироксен-гранатовых ассоциаций эклогитовых ксенолитов из кимберлитов трубки Катока (кратон Кассай, Зап. Африка) - редкой разновидности алмазоносных кимберлитовых трубок с преобладанием мантийных ксенолитов эклогитового, а не ультрабазитового (гранатовых перидотитов, дунитов) состава. Среди эклогитов трубки Катока выделяются три разновидности: высокомагнезиальные, низкомагнезиальные и высокоглиноземистые [Nikitina et al., 2013; Korolev et al., 2021]. Для определения собственной летучести кислорода были взяты клинопироксены (Cpx) и гранаты (Gr) из 3-х образцов низкомагнезиальных (L-Mg) и 2-х образцов высокомагнезиальных (H-Mg) эклогитов. L-Mg эклогиты сложены гранатом пироп-альмандинового ряда (42-52 об.%) и низкомагнезиальным омфацитом (57- 48%). В H-Mg эклогитах гранат представлен пиропом (34-63%), а клинопироксен высокомагнезиальным омфацитом (66-37%). Кроме того, в качестве акцессорного минерала присутствует ильмено-рутил (0.1-0.9%).

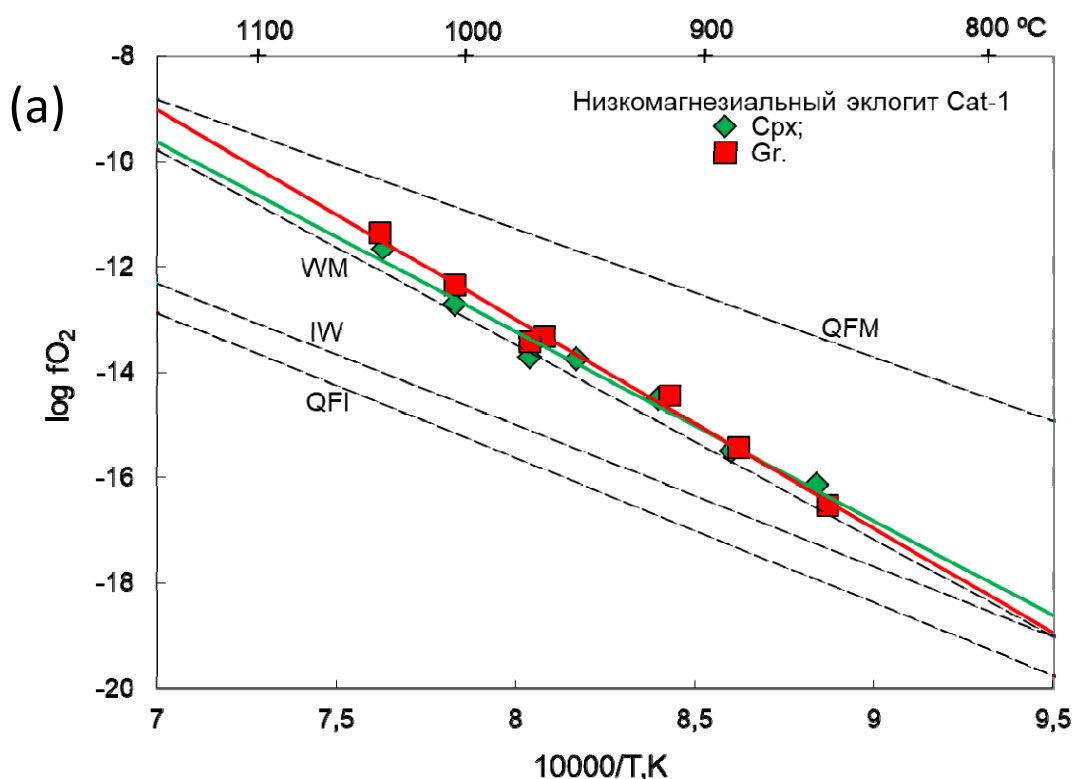
Определения собственной  $fO_2$  проводились для тщательно отобранных зерен Cpx и Gr (не содержащих включений) на установке с двумя твердыми электролитами, изготовленными из окиси циркония стабилизированной окисью иттрия, при 1 атм в



интервале температур от 800 до 1150 °С. Навеска каждого минерала (кусочки размером 1-3 мм) в опытах составляла 60-80 мг. Измерения осуществлялись при циклическом повышении и понижении температуры с шагом 30-50 °С. Погрешность измерения  $fO_2$  составляла  $\pm 0.1-0.2$  лог. единицы (более подробно о методике см. [Кадик и др., 1988]).

Результаты измерений собственной  $fO_2$  для *Cpx* и *Gr* каждого образца в зависимости от температуры описываются линейным уравнением вида:  $\log fO_2 = A - B/T, K$  (рис. 1, 2). Значения коэффициентов уравнения «А» и «В» для образцов представлены в табл. 2.

Величина  $fO_2$  и соответственно зависимость  $\log fO_2 - 10^4/T, K$  для кристаллов *Cpx* и *Gr* отражают специфику химического состава каждого из них, концентрации элементов переменной валентности и дефектов в кристаллической структуре минералов. Измеренные значения собственной летучести кислорода при данной температуре для *Cpx* и *Gr* эцлогитов как L-Mg, так и H-Mg состава в координатах  $\log fO_2 - 10^4/T, K$  близки друг к другу. В изученном интервале температур они располагаются между  $fO_2$  буферных равновесий железо-вюстит (IW) и кварц-фаялит-магнетит (QFM) (рис. 1 и 2).



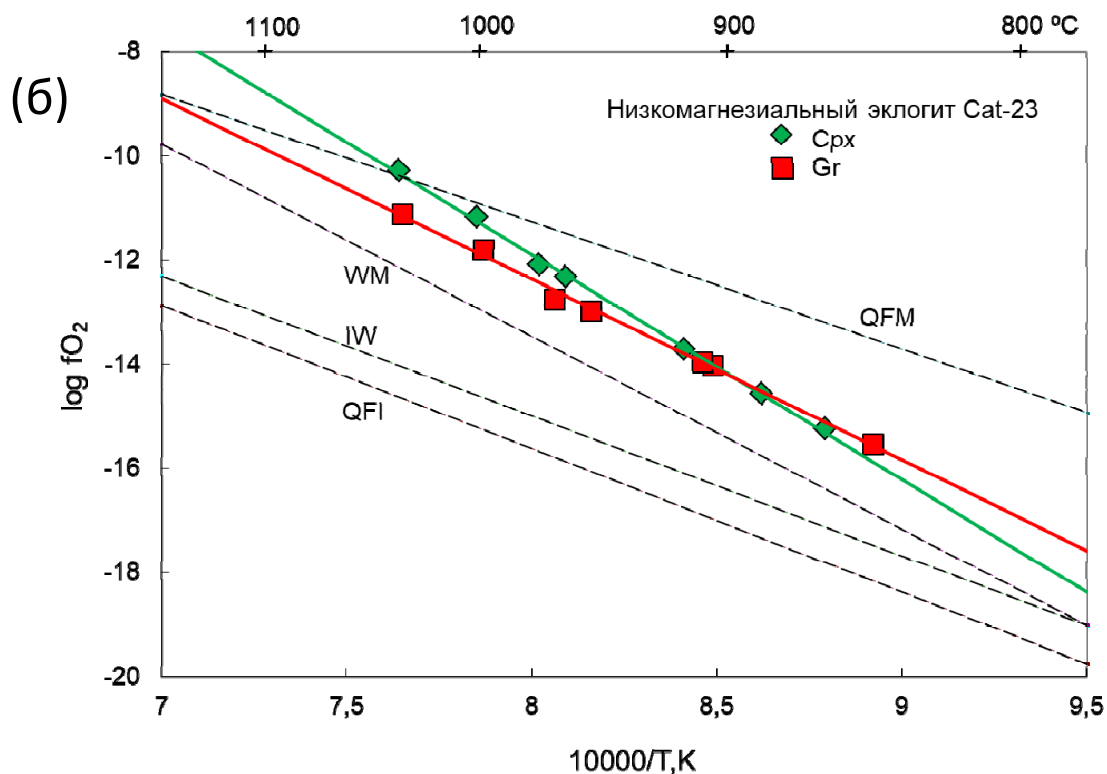
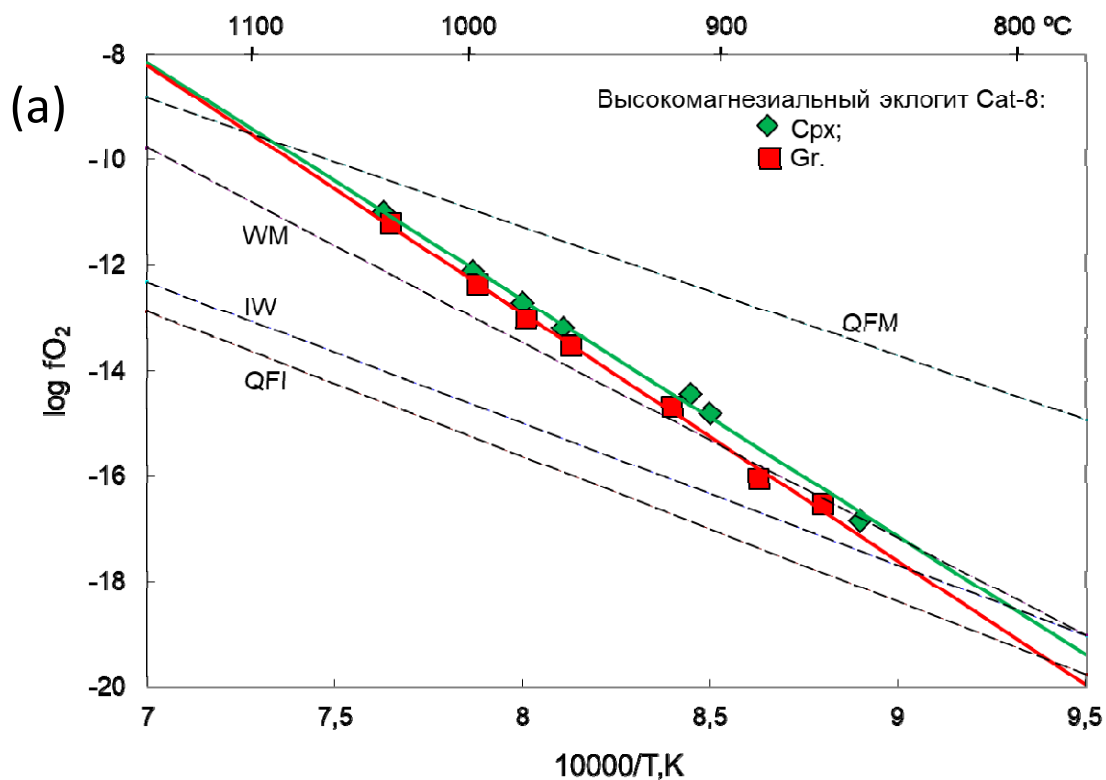


Рис.1. Зависимость  $\log fO_2 - 10^4/T, K$  для Cpx и Gr из образцов низкомагнезиальных эклогитов Cat-1 (а) и Cat-23 (б). Штриховые линии – буферные равновесия: кварц-фаялит-железо (QFI), кварц-фаялит-магнетит (QFM), вюстит-магнетит (WM), железо-вюстит (IW).





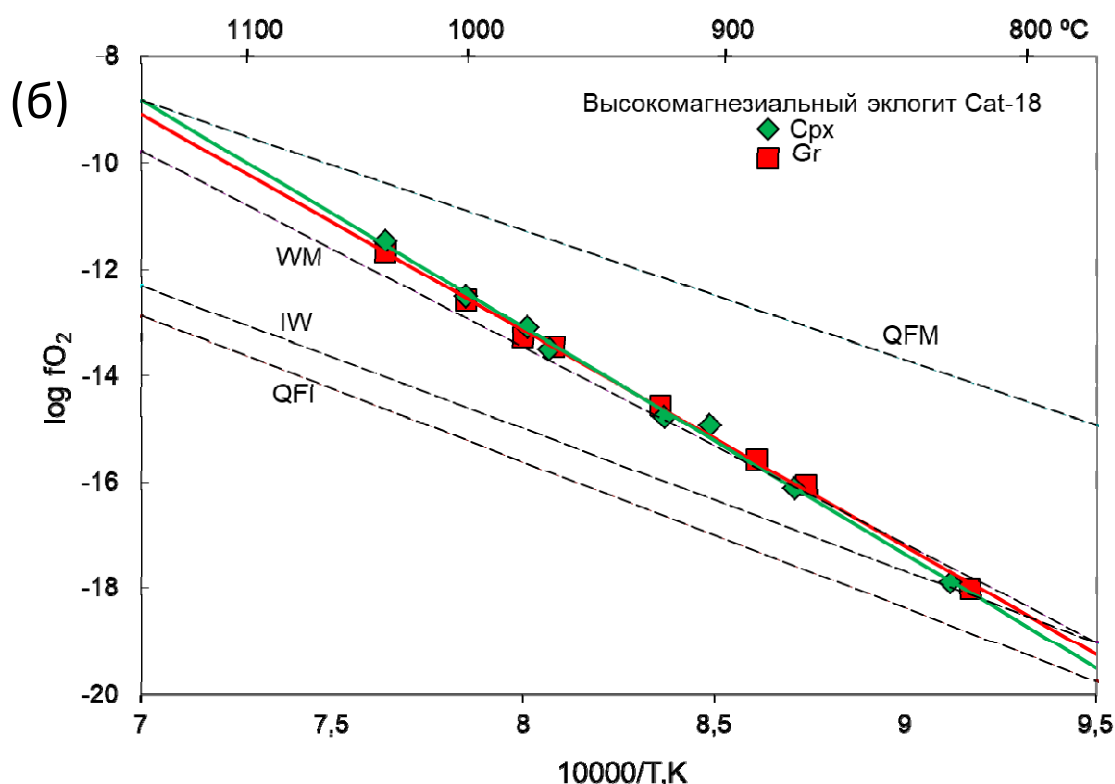


Рис.2. Зависимость  $\log fO_2 - 10^4/T, K$  для Cpx и Gr из образцов высокомагнезиальных эклогитов Cat-8 (а) и Cat-18 (б).

**Таблица 1.** Значения коэффициентов «А» и «В» в эмпирической зависимости  $\log fO_2 = A - B/T, K$  для клинопироксенов и гранатов из эклогитов алмазоносной кимберлитовой трубки Катока

| Образец                             | Минерал | A      | B     | R <sup>2</sup> | n |
|-------------------------------------|---------|--------|-------|----------------|---|
| <i>Низкомагнезиальные эклогиты</i>  |         |        |       |                |   |
| Cat-1                               | Cpx     | 15,573 | 35987 | 0,983          | 7 |
|                                     | Gr      | 18,811 | 39744 | 0,991          | 7 |
| Cat-3                               | Cpx     | 20,222 | 40951 | 0,999          | 7 |
|                                     | Gr      | 20,820 | 41707 | 0,996          | 7 |
| Cat 23                              | Cpx     | 22,688 | 43225 | 0,999          | 7 |
|                                     | Gr      | 15,414 | 34732 | 0,996          | 7 |
| <i>Высокомагнезиальные эклогиты</i> |         |        |       |                |   |
| Cat-8                               | Cpx     | 23,255 | 44882 | 0,996          | 7 |
|                                     | Gr      | 24,677 | 46972 | 0,997          | 7 |
| Cat-18                              | Cpx     | 21,126 | 42759 | 0,997          | 8 |
|                                     | Gr      | 19,377 | 40664 | 0,999          | 8 |

Примечание: R<sup>2</sup> – величина достоверности аппроксимации;  
n – количество экспериментальных точек.

Расчетные оценки  $T$ - $P$  параметров образования эклогитовых ксенолитов трубки Катока, сделанные с использованием минеральных Gr-Cpx геотермометров, дают значения равновесных температур для L-Mg эклогитов 950-1090 °C (8 определений) и для

Н-Mg эклогитов 880-1100°C (5 определений). При этом давления, рассчитанные по геотерме с мощностью теплового потока 40 мВт/м<sup>2</sup>, для этих температур должны соответствовать 39-47 и 35-48 кбар [Korolev et al., 2021]. Следует отметить, что близкие *T-P* условия формирования определены по минеральным геотермобарометрам и для перцолитовых ксенолитов в кимберлитах трубки Катока - 900 -940°C и 38 – 42 кбар [Nikitina et al., 2013]. Расчетные *T-P* параметры формирования конкретно для исследуемых образцов эклогитов представлены в табл. 2.

Экспериментальные электрохимические определения  $fO_2$  для Gr-Cpx пар в образцах могут служить в качестве геотермометра, используя предложенный М.Сато [Sato, 1972] подход, который основан на том, что при температурах равновесия кристаллов в них должно соблюдаться равенство химического потенциала кислорода. Таким образом, точка пересечения линий Gr и Cpx на диаграммах  $\log fO_2-10^4/T, K$  должна отражать температуру равновесного состояния этих минералов. Определенные этим путем равновесные температуры для исследуемых L-Mg эклогитов (887-991°C) в целом хорошо согласуются с расчетными (990-1020°C), учитывая возможные погрешности, связанные с измерением  $fO_2$  (~20-40°C), а также точностью геотермометров (40-50°C) (табл. 2). Наблюдаемые более значительные расхождения в оценках температур для Н-Mg эклогитов, возможно, обусловлены отсутствием полного равновесия из-за метасоматических изменений, которые фиксируются в этой разновидности эклогитов по структурным особенностям и содержанию редких элементов [Korolev et al., 2021].

**Таблица 2.** Экспериментальные равновесные значения собственной летучести кислорода и температуры для ассоциаций клинопироксенов и гранатов в эклогитах кимберлитовой трубки Катока (данные авторов), а также расчетные равновесные *T-P* параметры их формирования по [Korolev et al., 2021].

| Образец                             | $t$ °C, эксп.<br>(Cpx/Gr) | $\log fO_2$ | $\Delta \log fO_2(QFM)^*$ | $t$ °C,<br>расч. | $P$ , кбар<br>расч. |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|------------------|---------------------|
| <i>Низкомагнезиальные эклогиты</i>  |                           |             |                           |                  |                     |
| Cat-1                               | 887                       | -15,4       | -2,7                      | 1020             | 43                  |
| Cat-3                               | 991                       | -12,2       | -1,1                      | 1020             | 43                  |
| Cat-23                              | 895                       | -14,3       | -1,7                      | 990              | 41                  |
| <i>Высокомагнезиальные эклогиты</i> |                           |             |                           |                  |                     |
| Cat-8                               | 1197                      | -7,3        | +1,1                      | 1050             | 45                  |
| Cat-18                              | 925                       | -14,6       | -2,5                      | 1100             | 48                  |

Примечание: \*  $\Delta \log fO_2(QFM) = \log fO_2(обр.) - \log fO_2(QFM)$

Предполагая, что влияние давления на собственную  $fO_2$  минералов такое же, как на  $fO_2$  твердофазовых буферных равновесий (QFM и др.), положение измеренных величин  $fO_2$  в координатах  $fO_2$ - $T$  существенно не изменится по отношению к этим буферным равновесиям при высоких давлениях. Таким образом, редокс состояние L-Mg эклогитов при  $T$ - $P$  параметрах их формирования характеризуется значениями  $fO_2$  на 1,1 - 2,7 лог. единицы ниже буфера QFM (QFM-1.1 ÷ -2.7). H-Mg эклогиты демонстрируют более широкие вариации  $fO_2$ : от QFM-2.5 до QFM+1.1, что может отражать влияние метасоматических преобразований в этих породах.

*Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН*

## Литература

1. Кадик А.А., Жаркова Е.В., Коваленко В.И., Ионов Д.А. (1988) Окислительно-восстановительные условия в верхней мантии: Экспериментальное определение летучести кислорода минералов перидотитовых ксенолитов вулкана Шаварым-Царам (Монголия). *Геохимия*. №6. С.783-793.
2. Жаркова Е.В., Луканин О.А. (2023). Электрохимическое определение собственной летучести кислорода оливинов перидотитовых ксенолитов из кимберлитов Якутии (трубка «Удачная-Восточная»). Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. *Материалы XXIV Международной конференции*, Москва 25-27 сентября, Борок 29 сентября 2023 г. М.: ИГЕМ РАН. С. 91-97.
3. Goncharov, A. G., Ionov, D. A., Doucet, L. S., Pokhilenko, L. N. (2012) Thermal state, oxygen fugacity and C-O-H fluid speciation in cratonic lithospheric mantle: New data on peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite, Siberia. *Earth Planet. Sci. Lett.* No 357–358. P. 99–110.
4. Korolev N., Nikitina L.P., Goncharov A., Dubinina E.O., Melnik A., Müller D., Chen Y.-X., Zinchenko V.N. (2021) Three Types of Mantle Eclogite from Two Layers of Oceanic Crust: A Key Case of Metasomatically-Aided Transformation of Low-to-High-Magnesian Eclogite. *J. Petrol.* V. 62. № 11. P. 1-38.
5. Nikitina L.P., Korolev N.M., Zinchenko V.N., Joao Tunga Felix (2014) Eclogites from upper mantle beneath the Kasai Craton (Western Africa): Petrography, whole-rock geochemistry and U-Pb zircon age. *Precambrian Research*. V. 249. P. 13-32.

6. Sato M. (1972) Intrinsic oxygen fugacity of iron bearing oxide and silicate minerals under low pressure. *Geol. Soc. Am. Mem.* V. 135. P. 289-307.
7. Woodland A.B., Gräf C., Sandner T., Höfer H.E., Seitz H.-M., Pearson D. G., Kjarsgaard B.A. (2021) Oxidation state and metasomatism of the lithospheric mantle beneath the Rae Craton, Canada: strong gradients reflect craton formation and evolution. *Scientific Reports*. No 11. P.3684.
8. Yaxley G.M., Berry A.J., Rosenthal A., Woodland A.B., Paterson D. (2017) Redox preconditioning deep cratonic lithosphere for kimberlite genesis – evidence from the central Slave Craton. *Scientific Reports*. No 7. P. 30.

# REDOX STATE OF DIAMOND-BEARING ECLOGITE XENOLITHS IN KIMBERLITES OF THE KASSAI CRATON (WEST AFRICA) BASED ON ELECTROCHEMICAL MEASUREMENTS OF OXYGEN VOLATILITY IN GARNETS AND CLINOPYROXENES

**Lukanin O.A., Zharkova E.V.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI RAS), [lukanin@geokhi.ru](mailto:lukanin@geokhi.ru); [zharkova@geokhi.ru](mailto:zharkova@geokhi.ru)

The paper presents the results of electrochemical determination of intrinsic  $fO_2$  for clinopyroxene-garnet associations of eclogite xenoliths from the Catoka pipe kimberlites (Kassai craton, West Africa), a rare variety of diamondiferous kimberlite pipes with a predominance of eclogite mantle xenoliths. The measurements were carried out for two types of eclogites: low-magnesian (L-Mg) and high-magnesian (H-Mg) composition. The redox state of L-Mg eclogites at  $TP$  parameters of their formation is characterized by  $fO_2$  values 1.1 - 2.7 log units below the QFM buffer (QFM-1.1 ÷ -2.7). H-Mg eclogites demonstrate wider variations of  $fO_2$  from QFM-2.5 to QFM+1.1, which may reflect the influence of metasomatic transformations of these rocks.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ЗАДЕРЖКА РАДИОКОЛЛОИДА ПОРОДАМИ  
УЧАСТКА ЕНИСЕЙСКИЙ НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА,  
КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ

**Мальковский В.И., Жариков А.В.**

Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, [malk@igem.ru](mailto:malk@igem.ru)

Уровень безопасности подземного хранилища высокорadioактивных отходов (ВАО), которое предполагается создать на участке Енисейский Нижнеканского массива (Красноярский край), определяется максимальной концентрацией радионуклидов, поступающих с подземными водами из хранилища на поверхность Земли [Кочкин и др., 2017].

Проницаемость пород для течения подземных вод в значительной степени определяется наличием трещин, которые фокусируют течение даже в тех случаях, когда они разделены промежутками существенно менее проницаемой пористой матрицей ненарушенных пород [Malkovsky et al., 2023]. Коллоидные частицы в подземных водах, содержащие радионуклиды, получили название радиоколлоида. Они имеют небольшие размеры (1–1000 нм) и слабо сорбируются на породах по сравнению с радионуклидами в ионной форме. Поэтому частицы радиоколлоида относительно свободно переносятся подземными водами по трещинам, апертура которых превышает размеры частиц. Однако при наличии промежутков ненарушенных пород между отдельными трещинами частицы могут механически задерживаться за счет того, что поперечные размеры поровых каналов в матрице пород могут оказаться меньше размеров этих частиц [Malkovsky et al., 2024].

Функцию распределения поперечных размеров поровых каналов матрицы пород можно определить по зависимости проницаемости образцов пород для газа [Malkovsky et al., 2024] от его давления. Эта зависимость имеет вид  $k(p) = k_w(1 + b/p)$ , где  $k$  – проницаемость пород для газа при его давлении, равном  $p$ ,  $k_w$  – проницаемость пород для воды,  $b$  – константа.

Метод определения проницаемости образцов пород для газа описан в работе [Zharikov et al., 2005] и схематически изображен на рис. 1. Одно из сечений образца соединяется с замкнутым объемом, другое сечение свободно связано с атмосферой. В начальный момент времени в объем подается газ, в результате чего давление в объеме увеличивается на  $\Delta p$ . За счет фильтрации газа через образец в атмосферу, давление в замкнутом объеме  $p_{in}(t)$  постепенно снижается от  $p_{in}(t) + \Delta p$  до атмосферного  $p_{atm}$ . Проводится расчет зависимости  $p_{in}(t)$  в этом процессе при

некоторых заданных  $k_w$  и  $b$  и выбираются такие значения этих параметров, при которых функция

$$F = \sum_{n=1}^N [p_{in}^{calc}(t_n; k_w, b)/p_{in}^{meas}(t_n) - 1]^2$$

имеет минимум. Здесь  $t_n$  – моменты времени, в которые проводились измерения  $p_{in}(t)$ ,  $p_{in}^{calc}$  – вычисленные, а  $p_{in}^{meas}$  – измеренные значения  $p_{in}$ .

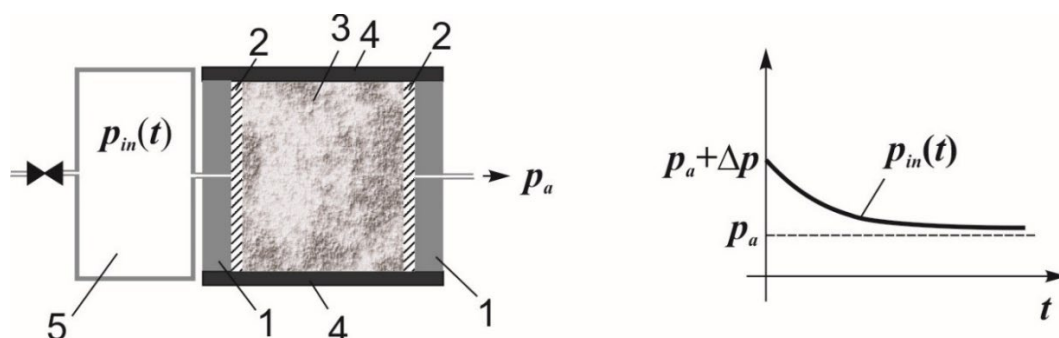


Рис. 1. Опыт по определению проницаемости образца для газа.

1 – металлические фиксаторы образца, 2 – высокопроницаемые прокладки для равномерного распределения потока газа в поперечном сечении образца, 3 – образец породы, 4 – изоляция боковых стенок образца, 5 – замкнутый объем, соединенный со входным сечением образца.

С помощью такого метода были определены значения  $k_w$  и  $b$  для образцов пород, полученных на участке Енисейский с глубины 486 м (скважина Р12, ее положение на участке показано в [Кочкин и др. 2017]). Сопоставление расчетных и измеренных зависимостей  $p_{in}(t)$  приведено на рис. 2. Можно отметить вполне удовлетворительное соответствие.

В зависимости от механизма образования радиоколлоид принято подразделять на три группы: истинный, первичный и псевдоколлоид. Частицы истинного коллоида состоят в значительной степени из окси-гидроксидов радионуклидов, первичный коллоид формируется из продуктов выщелачивания остеклованных ВАО, а псевдоколлоид состоит из частиц естественного происхождения, присоединивших радионуклиды в результате контакта с загрязненными подземными водами. Стабильность истинного коллоида в подземных водах невелика, и его частицы сравнительно быстро разрушаются в ближнем поле источника радиоактивного загрязнения [Мальковский, 2020]. Накопленные в РФ ВАО, которые предполагается размещать в хранилище на участке Енисейский, представляют собой

преимущественно продукты радиохимической переработки облученного ядерного топлива, переведенные в твердые формы путем включения в матрицу из алюмофосфатного стекла. В [Malkovsky et al., 2018] показано, что при растворении остеклованных ВАО актиниды, представляющие наибольшую опасность, переходят в подземные воды преимущественно в форме первичного коллоида, состоящего из частиц со структурой монацита, который при температурах до 150 °С устойчив к взаимодействию с водой. Таким образом, содержание радионуклидов в растворенной форме в продуктах выщелачивания ВАО невелико, а поступление радионуклидов из частиц первичного коллоида незначительно. Следовательно, можно ожидать, что вынос радионуклидов из хранилища на участке Енисейский будет осуществляться преимущественно в форме стабильного первичного радиоколлоида. Опыты по фильтрации продуктов выщелачивания алюмофосфатного стекла с имитаторами радионуклидов через мембраны с разными диаметрами пор позволили оценить распределение частиц первичного коллоида по размерам [Malkovsky et al., 2018].

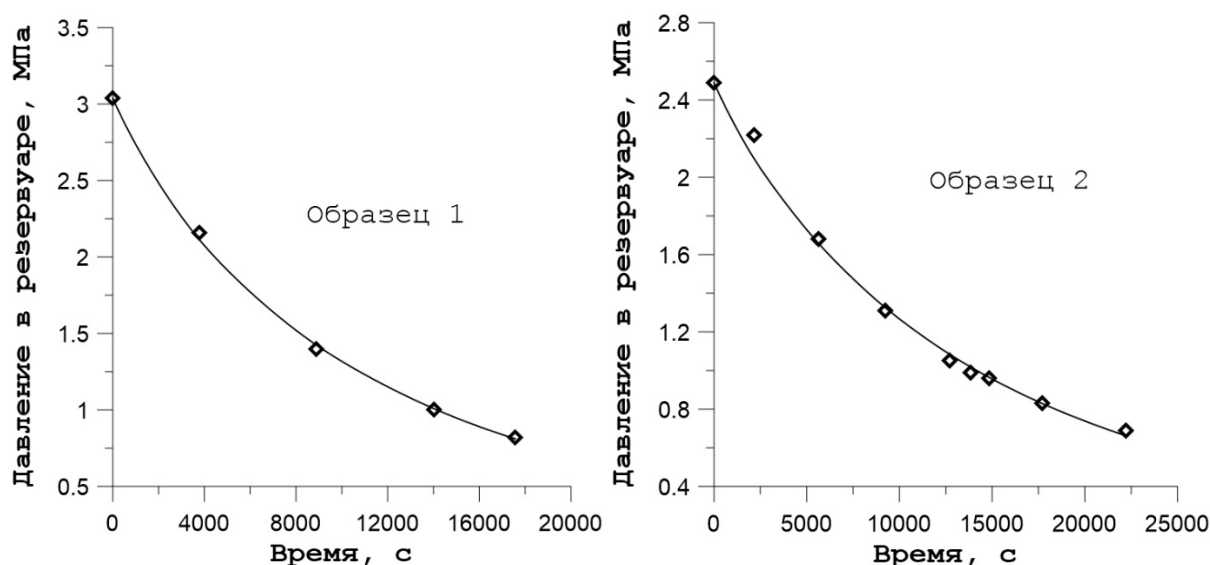


Рис. 2. Сопоставление расчетных и измеренных зависимостей  $p_{in}(t)$  при определении проницаемости образцов пород с участка Енисейский для газа.

Расчет по формулам, приведенным в [Malkovsky et al., 2024], показал, что в обоих образцах пород с участка Енисейский доля частиц радиоколлоида, механически задерживаемая породами, составляет 99.5%.



## Литература

1. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН. 2017. 384 с.
2. Malkovsky, V.I.; Petrov, V.A.; Yudintsev et al. Influence of Rock Structure on Migration of Radioactive Colloids from an Underground Repository of High-Level Radioactive Waste // *Sustainability* **2023**, V. 15, 882.
3. Malkovsky V., Zharikov A., Yudintsev S. Mechanical retardation of actinide-bearing colloid migration from an underground repository: Theory and experiment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024. V. 280. #107559.
4. Zharikov A.V., Malkovsky V.I., Shmonov V.M., Vitovtova V.M. Permeability of rock samples from the Kola and KTB boreholes at high P-T parameters as related to the problem of underground disposal of radioactive waste // *Petrophysical properties of crystalline rocks* /Ed. by Harvey P.K., Brewer T.S., Pezard P.A., Petrov V.A. 2005. London: Geological Society of London. P.153-164.
5. Мальковский В.И. Перенос техногенных радионуклидов в земной коре. М.: «СамПолиграфист», 2020. 190 с.
6. Malkovsky V.I., Yudintsev S.V., Aleksandrova E.V. Influence of Na-Al-Fe-P glass alteration in hot non-saturated vapor on leaching of vitrified radioactive wastes in water // *Journal of Nuclear Materials*. 2018. V. 508. P. 212–218.

## MECHANICAL RETARDATION OF RADIOCOLLOID IN ROCKS AT THE YENISSEISKIY SITE OF THE NIZHNEKANSKIY MASSIF, KRASNOYARSK REGION

**Malkovsky V.I., Zharikov A.V.**

Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry, RAS, Moscow, [malk@igem.ru](mailto:malk@igem.ru)

The colloidal form of radionuclides, or radiocolloid, is prevalent in the products of high-level waste (HLW) leaching. Radiocolloid can be mechanically retained in rocks if the diameter of the groundwater flow channels is smaller than the size of the radiocolloid particles. The size distribution of pore channels in rocks was determined by measuring the permeability of rock samples to gas at different gas pressures. It was shown that 99.5% of the radiocolloids can be mechanically retained in the Yenisseiskiy site's rocks, which were selected for the development of an underground repository for HLW.

## ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ РУДОНОСНЫМИ ФЛЮИДАМИ НА УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА ПРИ НАЛИЧИИ РАЗЛОМОВ В ПОРОДАХ ФУНДАМЕНТА

**Мальковский В.И., Пэк А.А., Петров В.А.**

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, [malk@igem.ru](mailto:malk@igem.ru)

Месторождения урана песчаникового типа являются одним из наиболее распространённых типов урановых месторождений в мире [Cuney et al., 2022]. На их долю приходится до 63% мировой добычи урана [Lin et al., 2025]. При этом механизмы осаждения и накопления урана из рудоносных флюидов отличаются большим разнообразием [Cuney et al., 2022]. Наиболее изучены, по-видимому, случаи осаждения и накопления урана на локальных геохимических барьерах, обусловленных неоднородностью состава пород пласта, по которому движутся рудоносные флюиды [Penney, 2012]. В [Мальковский, Пэк, 2024] рассмотрена математическая модель формирования урановых месторождений за счет взаимодействия инфильтрационных ураноносных вод, движущихся по пласту песчаников, и эксфильтрационных восстановительных растворов, поступающих в пласт через разлом, пересекающих подстилающие слабопроницаемые породы фундамента. Для образования таких месторождений необходимо появление одновременно двух источников флюидов разного состава: окислительного и восстановительного. Возникновение таких условий возможно, когда урановорудные и нефтегазоносные объекты сближены в пространстве. Наряду с этим существует вероятность образования уранового месторождения песчаникового типа за счет смешения флюидов из одного и того же источника, часть которых движутся по пласту в окислительных условиях, а часть проникает в породы фундамента, где сложились восстановительные условия, а затем с измененным в результате взаимодействия с флюидами фундамента составом возвращается снова в песчаниковый пласт. Такая система может контролироваться высокопроницаемыми разломами, по одному из которых ураноносные флюиды проникают в фундамент, а по другому – возвращаются в пласт. Для изменения состава флюидов их путь должен проходить по породам фундамента. Однако поскольку подстилающие породы фундамента менее проницаемы, чем песчаники пласта, такие пути фильтрации флюидов реальны только в том случае, если разломы сближены.

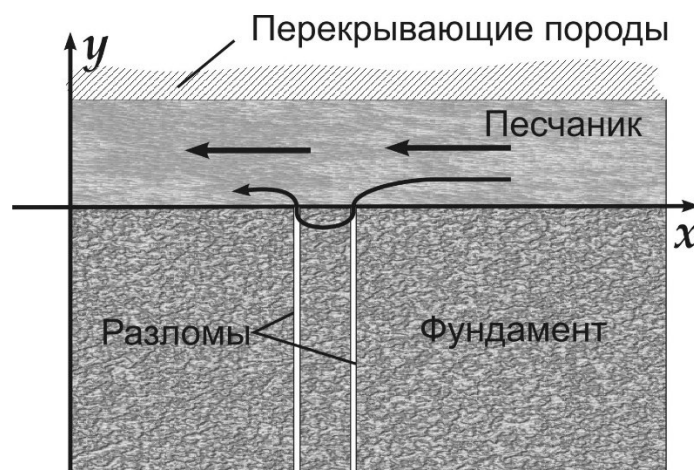


Рис. 1. Схема рудообразующей системы

В рассматриваемой системе рудная компонента и окислитель поступают в пласт с потоком рудоносных флюидов. Восстановитель изначально содержится только во флюидах, насыщающих породы фундамента. С течением времени рудная компонента и окислитель проникают с флюидами в фундамент, где вступают во взаимодействие с восстановителем, вследствие чего уран частично осаждается. Восстановитель выносится течением из фундамента в пласт песчаника, где в результате взаимодействия с окислителем и рудной компонентой осаждает часть урана из потока флюидов в пласте.

Рассмотрим математическую модель рудообразующей системы, схематически изображенной на рис. 1.

В наиболее общем представлении рудная минерализация формируется за счет взаимодействия веществ 3 типов: рудная компонента ( $U_F$  – во флюиде,  $U_S$  – в твердой фазе), окислитель ( $X$ ) и восстановитель ( $R$ ). Рудная компонента поступает в зону рудоотложения по пласту вместе с окислителем, который обеспечивает подвижность рудной компоненты (см. рис. 1).

Взаимодействие компонентов  $U_F, U_S, R$  и  $X$  описывается реакциями вида:  $nX + mR \rightarrow S$ , (1);  $U_F \leftrightarrow U_S$  (2), где  $S$  – продукт необратимой реакции окислителя и восстановителя,  $n$  и  $m$  – стехиометрические коэффициенты реакции (1).

В соответствии с законом действующих масс интенсивность реакции (1) характеризуется массами компонентов  $X$  и  $R$ , вступающими в реакцию в единицу времени в единичном объеме:  $\Omega_X = [f/(f + 1)]\kappa_1\rho C_X C_R$  для компонента  $X$  и  $\Omega_R = [1/(f + 1)]\kappa_1\rho C_X C_R$  для компонента  $R$ , где  $\rho$  – плотность флюида,  $C_X, C_R$  – массовые концентрации окислителя и восстановителя во флюиде,  $f$  – отношение молей компонентов  $X$  и  $R$ , помноженных на их

стехиометрические коэффициенты в реакции (1). Интенсивность обратимой реакции осаждения/экстракции урана описывалось массой осаждения в единицу времени в единичном объеме:  $\Omega_U = \kappa_2 \rho [\exp(AC_X - BC_R) - C_U]$ , где  $A$  и  $B$  – безразмерные числовые коэффициенты,  $C_U$  – массовая концентрация урана во флюиде. Здесь  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  – кинетические константы реакций (1) и (2), соответственно. Очевидно, что величина  $\Omega_U$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения, что соответствует осаждению или экстракции урана в зависимости от соотношения концентраций окислителя, восстановителя и урана во флюиде.



Рис. 2. Зоны минерализации при различной проницаемости пород фундамента вблизи зон разломов.

(а) постоянная повышенная проницаемость пород между разломами, (б) проницаемость пород вблизи зон разломов непрерывно уменьшается с ростом расстояния до разлома с максимумами в самих разломах.

Предполагалось, что течение флюидов удовлетворяет закону Дарси, а перенос компонентов  $X, R$  и  $U_F$  удовлетворяет уравнениям переноса в приближении адвекционно-дисперсионной модели.

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial C_U}{\partial t} + V_x \frac{\partial C_U}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_U}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha V \frac{\partial C_U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha V \frac{\partial C_U}{\partial y} \right) + \Omega_U, \\ \rho \left( \frac{\partial C_X}{\partial t} + V_x \frac{\partial C_X}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_X}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha V \frac{\partial C_X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha V \frac{\partial C_X}{\partial y} \right) + \Omega_X, \\ \rho \left( \frac{\partial C_R}{\partial t} + V_x \frac{\partial C_R}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_R}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha V \frac{\partial C_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha V \frac{\partial C_R}{\partial y} \right) + \Omega_R. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  – плотность флюида,  $V_x, V_y$  – компоненты поля скоростей течения флюида,  $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ ,  $\alpha$  – коэффициент дисперсии.

Проницаемость пород пласта полагалась однородной.

Уравнения переноса компонентов  $X, R$  и  $U_F$  интегрировалось

методом переменных направлений.

Очевидно, что наличие разломов приводит к повышению проницаемости пород фундамента вблизи зон разломов. На рис. 2 показаны зоны минерализации при различной повышенной проницаемости пород вблизи зон разломов.

*Работа выполнена по теме госзадания ИГЕМ РАН.*

## Литература

1. Cuney M., Mercadier J., Bonnetti Ch. Classification of Sandstone-Related Uranium Deposits // Journal of Earth Science. 2022. V. 33. No. 2. P. 236-256. doi.org/10.1007/s12583-021-1532-x
2. Lin Y.-H., Fan M.-S., Ni P. et al. New insights into uranium source and mineralization process of the world-class Jingchuan sandstone-hosted uranium deposit, Ordos basin, China: Evidence from geology, carbonate textures and geochemistry // Ore Geology Reviews. 2025. V. 185. No. 106795. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106795.
3. Penney R. Australian sandstone-hosted uranium deposits // Applied Earth Science (Trans. of the Institute of Mining and Metallurgy). 2012. V. 121. No. 2. P. 65-75. doi 10.1179/1743275812Y.0000000018.
4. Мальковский В.И., Пэк А.А. Модель формирования урановых месторождений песчаникового типа в результате смешения флюидов разного состава // Матер. XXV междунар. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИГЕМ РАН, 2024. С. 167–170.

## MODEL OF THE FORMATION OF GEOCHEMICAL BARRIERS BY ORE BEARING FLUIDS AT SANDSTONE-HOSTED URANIUM DEPOSITS IN PRESENCE OF FAULTS IN THE BASEMENT ROCKS

**Malkovsky V.I., Pek A.A., Petrov V.A.**

Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry, RAS, Moscow, [malk@igem.ru](mailto:malk@igem.ru)

A numerical model of a sandstone-hosted uranium deposit is considered in presence of neighboring faults in the bedrock. Uranium precipitates on a geochemical barrier which is formed by fluids penetrating to reducing badrocks and exfiltrating back to the sandstone through the neighboring faults in the basement.

## ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА БЕЗОПАСНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГРУППЕ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

**Мальковский В.И., Юдинцев С.В.**

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, [malk@igem.ru](mailto:malk@igem.ru)

Размещение отвержденных высокоактивных отходов (ВАО) в подземных хранилищах на глубине сотни метров считается наиболее эффективным способом их изоляции от биосферы [Ewing et al., 2016]. В основном рассматриваются проекты подземных хранилищ шахтного типа, в которых контейнеры с ВАО будут размещены в коротких скважинах в подошве подземных галерей на глубине несколько сотен метров. Как альтернатива предложены хранилища скважинного типа, где контейнеры с ВАО размещены в нижней части горизонтальных или вертикальных скважин диаметром до 0.5 м [Malkovsky, Yuditsev, 2022, 2024]. Преимущества хранилищ скважинного типа [Chapman, 2019]: (1) долговременная безопасность, обусловленная глубиной захоронения ВАО; (2) экономичность; (3) низкие требования к инфраструктуре и небольшая площадь наземных сооружений; (4) меньшее время его сооружения, загрузки ВАО и закрытия; (5) создание поблизости от мест генерации ВАО; (6) низкая вероятность несанкционированного доступа; (7) минимальный контроль после загрузки отходов.

Показано [Malkovsky, Yuditsev, 2024], что восходящее термоконвективное течение подземных вод от горизонтальных скважин слабее, чем от вертикальных. Схема размещения контейнеров с ВАО в хранилище в виде системы горизонтальных скважин показано на рис. 1а.

Безопасность подземного хранилища ВАО увеличит наличие над скважинами слабопроницаемого пласта [Malkovsky et al., 2023]. Сейсмическая активность, напротив, может снизить его безопасность из-за возникновения разломов, по которым воды с радионуклидами могут продвигаться от хранилища к поверхности. Для создания подземных хранилищ ВАО районы с высокой сейсмической активностью не рекомендуются. Сейсмические возмущения в районах с умеренной активностью с большей вероятностью приводят не к формированию новых, а к обновлению древних разломов [Мальковский и др., 2023]. Если положение и ориентация таких разломов на участке хранилища установлены, то естественно ориентировать горизонтальные скважины параллельно разлому. В противном случае разлом может пересечь все скважины, что интенсифицирует вынос радионуклидов из хранилища. Если скважины ориентированы параллельно древнему разлому, то при



его активации процессы термоконвективной циркуляции вод, распространения тепла и переноса радионуклидов слабо зависят от сдвига вдоль скважин, и эти процессы допустимо рассматривать в двумерном приближении в плоскости, показанной на рис. 1б.

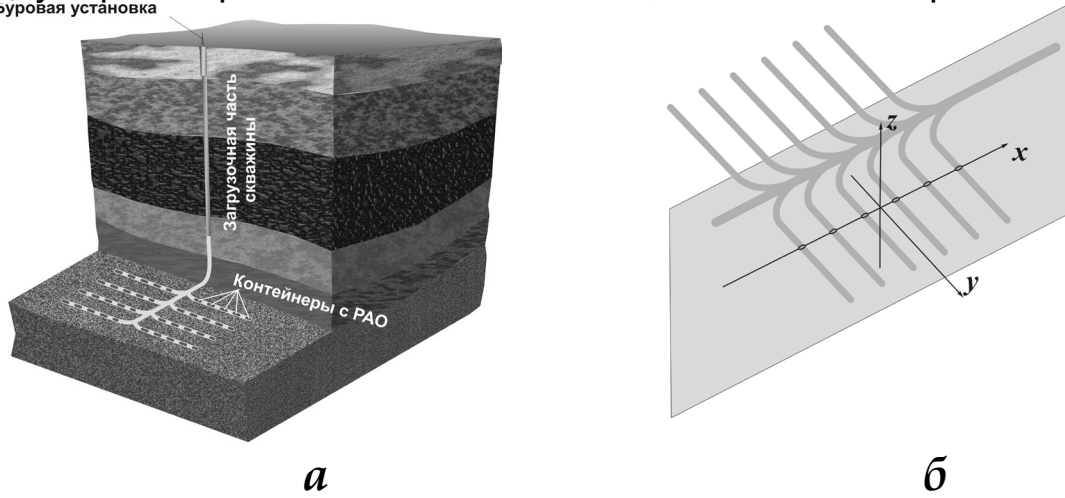


Рис. 1. Схема размещения РАО в группе горизонтальных скважин (а) схема хранилища, (б) двумерная область моделирования.

Уравнения, определяющие течение, тепло- и массоперенос в этом случае, и соответствующие граничные и начальные условия приведены в [Malkovsky, Yuditsev, 2024].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(x, z) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(x, z) \frac{\partial p}{\partial x} \right] &= -g \frac{\partial}{\partial z} [\rho k(x, z)], \\ \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \omega, \\ \left[ 1 + \frac{\rho_s K_d (1 - \varphi)}{\varphi} \right] \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{v_x}{\varphi} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{v_z}{\varphi} \frac{\partial C}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha v}{\varphi} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\alpha v}{\varphi} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \chi C + \frac{\vartheta}{\rho}, \\ x = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0; x \rightarrow \infty, \frac{\partial p}{\partial x} = 0, T = T_{\text{surf}} + \Gamma(z_{\text{surf}} - z), C &= 0; \\ z = 0, \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = -\Gamma, \frac{\partial C}{\partial z} = 0; z = z_{\text{surf}}, p = p_{\text{atm}}, T = T_{\text{atm}}, \frac{\partial C}{\partial z} = 0; & \\ t = 0, T = T_{\text{atm}} + \Gamma(z_{\text{surf}} - z), C = 0. & \end{aligned}$$

Здесь  $x, z$  – декартовы координаты, показанные на рис. 1б;  $t$  – время;  $k$  – проницаемость пород;  $\varphi$  – пористость пород;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho, c$  – плотность и удельная теплоемкость подземных вод;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $C$  – массовая концентрация радионуклида;  $\rho_s, c_s, \lambda_s$  – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность пород;  $v_x, v_z$  – составляющие скорости фильтрации;  $\omega$  – плотность тепловыделения, равная нулю вне скважин;  $K_d$  – коэффициент распределения радионуклида;  $\vartheta$  –



удельная интенсивность выщелачивания радионуклида, равная нулю вне скважин;  $\chi$  – константа радиоактивного распада;  $z_{\text{surf}}$  – уровень земной поверхности;  $p_{\text{atm}}, T_{\text{atm}}$  – атмосферные давление и температура;  $\Gamma$  – геотермический градиент.

Важной характеристикой надежной изоляции радионуклида в хранилище в момент времени  $t$  является величина максимальной концентрации этого радионуклида в подземных водах у земной поверхности в этот момент времени. Обозначим эту величину  $C_{\text{max}}(t)$ .

На рис. 2 приведены зависимости  $C_{\text{max}}(t)$  для  $^{241}\text{Am}$ . Этот радионуклид выбран, поскольку он обладает относительно высокой удельной активностью в составе ВАО и имеет сравнительно большой период полураспада. Расчеты проводились в однородных породах, при наличии разлома, слабопроницаемого перекрывающего пласта и при наличии слабопроницаемого пласта и разлома одновременно.

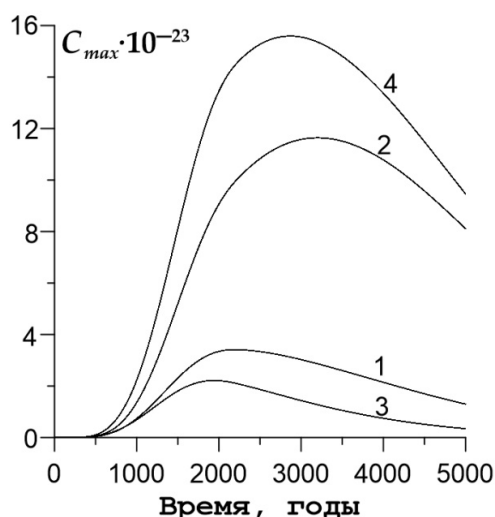


Рис. 2. Изменение максимальной концентрации  $^{241}\text{Am}$  в водах у земной поверхности над хранилищем ВАО в зависимости от времени.

(1) Есть слабопроницаемый пласт и разлом; (2) пласт без разлома; (3) разлом без пласта; (4) однородный массив пород. Группа из 6 скважин на глубине 1000 м с интервалом 250 м. Проницаемость пород принята как  $5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ , перекрывающего пласта в 500 м выше скважин  $10^{-16} \text{ м}^2$ , мощность 50 м, разлом в 2 км от середины группы скважин, его проницаемость составляет  $5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ , а мощность 50 м.

Наличие слабопроницаемого пласта приводит (рис. 2) к снижению  $C_{\text{max}}(t)$ . Неожиданным результатом является то, что активизация разлома приводит не к увеличению, а к уменьшению  $C_{\text{max}}(t)$ . Вероятная причина этого заключается в том, что разлом фокусирует нисходящий поток подземных вод и направляет его в

глубь массива. Из-за этого увеличивается длина пути циркулирующих подземных вод и уменьшается скорость их течения по восходящим ветвям термоконвективной циркуляции.

## Литература

1. Ewing R.C., Whittleston R.A., Yardley B.W.D. Geological disposal of nuclear waste: a primer // *Elements*. 2016. Vol. 12. P. 233–238.
2. Malkovsky V., Yudintsev S. Analysis of safety of a borehole repository for vitrified high-level nuclear waste // *Progress in Nuclear Energy*. 2022. Vol. 144. 104075. doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104075.
3. Malkovsky V.I., Yudintsev S.V. Radionuclide migration from horizontal boreholes loaded with vitrified high-level radioactive waste // *Doklady Earth Sciences*. 2025. Vol. 520:38. doi: 10.1134/S1028334X24605212.
4. Chapman N.A. Who might be interested in a deep borehole disposal facility for their radioactive waste // *Energies*. 2019. Vol. 12. 1542.
5. Malkovsky V., Yudintsev S., Ojovan M. Forecast of  $^{241}\text{Am}$  migration from a system of deep horizontal boreholes // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. 15134. doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104075.
6. Мальковский В.И., Петров В.А., Минаев В.А. Влияние ориентации активизирующихся тектонических разломов на безопасность системы изоляции радиоактивных отходов // *Доклады академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 508. № 1. С. 144–150.

## INFLUENCE OF SEISMIC ACTIVITY ON SAFETY OF SOLID HIGH-LEVEL WASTE DISPOSAL IN A GROUP OF DEEP-SEATED HORIZONTAL BOREHOLES

**Malkovsky V.I., Yudintsev S.V.**

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow. [malk@igem.ru](mailto:malk@igem.ru)

The influence of ancient fault reactivation on the migration of  $^{241}\text{Am}$  from a group of horizontal boreholes with solid high-level radioactive waste is analyzed, taking into account the actual composition of the waste and the time-dependent rate of waste form leaching. A 2D model of groundwater flow and heat and mass transfer is considered when the fault plane is approximately parallel to the horizontal boreholes. An original computer code was developed to simulate the transport of radionuclides by groundwater. The results showed that activating an ancient fault can increase the safety of high-level waste disposal.

# КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕГИДРОКСИЛИЗАЦИИ ГИББСИТА В БОКСИТАХ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА

**Мельников Ф.П., Боева Н.М., Макарова М.А., Шипилова Е.С., Внучков Д.А.**

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, [boeva@igem.ru](mailto:boeva@igem.ru)

Гиббсит ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) – основной рудный минерал бокситов. Кинетика его термической дегидроксилизации, имеющая важное значение для оптимизации переработки алюминиевых руд, сложна и зависит от морфологии кристаллов и генезиса сырья [Lapin, Tolstov, 2011; Боева и др., 2022].

Цель работы – сравнительный анализ кинетических параметров разложения гиббсита в бокситах осадочного (месторождение Мейнпат, Индия) и латеритного (Сангареди, Гвинея) типов.

Месторождение Сангареди находится в северо-западной части Гвинейской Республики. Бокситы располагаются в платформенном чехле вблизи оси крупной синклинальной структуры Бове. В эти породы внедрились силлы и дайки основных пород мезозойской трапповой формации. Продолжительное латеритное выветривание, начавшееся в миоцене, привело к образованию мощного латеритного покрова. Минеральный состав пород: гиббсит, бёмит, гётит, гематит, анатаз, рутил, кварц.

Месторождения бокситов плато Мейнпат расположены в округе Сургуджа (Центральная Индия). Плато представляет собой возвышенность с отметками около 1060 м над уровнем моря. Оно сложено разновозрастными горными породами. Бокситы и ассоциированные с ними месторождения каолина приурочены к базальтам, образованным в период от раннего мела до позднего палеоцена.

Исследованы образцы с максимальным содержанием гиббсита. Для анализа фазовых превращений применен синхронный термический анализ (СТА). Кинетические параметры (энергия активации  $E_a$  и предэкспоненциальный фактор  $A$ ) рассчитаны по методу Аррениуса с использованием авторского программного кода для обработки данных СТА при скоростях нагрева 2–20 К/мин.

Для осадочного боксита месторождения Мейнпат свойственны кристаллы гиббсита очень маленьких размеров. На кривых дифференциальной сканирующей калориметрии, в диапазоне температур 220–450 °С, эндотермический эффект, связанный с выделением основной массы воды гиббсита, не имеет осложнений.

Для термических кривых, отображающих превращения латеритного боксита месторождения Сангареди Гвинеи с крупными кристаллами гиббсита, этот эффект имеет 3 максимума.

Результат предварительной подготовки и визуализации совмещенной базы данных термогравиметрии и калориметрии на одном графике приведен на рисунке 1, на котором выделен интервал температур, при котором зафиксирован термический эффект, интерпретированный как фазовое превращение.

К выделенному интервалу применялась линейная регрессия, в рамках которой получилось добиться высоких показателей качества моделирования, как показано на рисунке 2. Полученная прямая дает возможность рассчитать энергию активации и предэкспоненциальный фактор для дальнейших сравнений.

Таким образом расчетная программа позволяет получить энергии активации для каждой скорости нагрева, предусмотренной условиями эксперимента (табл. 1, 2).

Таблица 1. Сравнение энергий активации  $E_a$ , кДж/моль в зависимости от скорости нагрева, полученных методом Аррениуса.

| Скорость нагрева, °С/мин  | 2          | 5      | 10         | 15     | 20     |
|---------------------------|------------|--------|------------|--------|--------|
| $E_a$ , кДж/моль (Гвинея) | 85.19      | 85.77  | 80.50      | 79.85  | 78.40  |
| $E_a$ , кДж/моль (Индия)  | 120.9<br>2 | 119.37 | 109.6<br>7 | 114.38 | 109.86 |

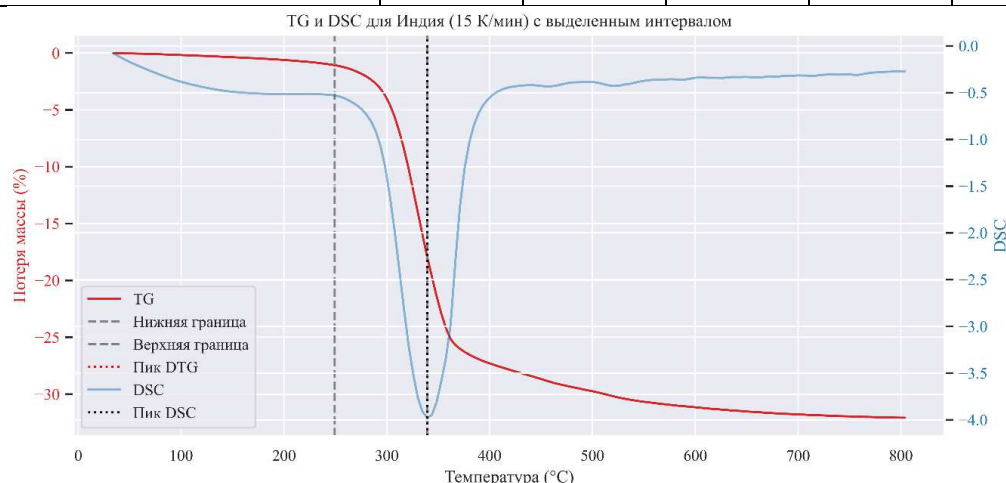


Рис. 1. ТГ и ДСК-кривые в исследуемом интервале температур.

Таблица 2. Сравнение предэкспоненциальных факторов в зависимости от скорости нагрева, полученных методом Аррениуса.

| Скорость нагрева, °С/мин | 2                     | 5                     | 10                 | 15                 | 20                 |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $A$ , $s^{-1}$ (Гвинея)  | $1.92 \times 10^7$    | $4.78 \times 10^6$    | $2.34 \times 10^6$ | $1.15 \times 10^6$ | $1.10 \times 10^6$ |
| $A$ , $s^{-1}$ (Индия)   | $5.25 \times 10^{10}$ | $1.61 \times 10^{10}$ | $1.51 \times 10^9$ | $3.60 \times 10^9$ | $1.05 \times 10^9$ |

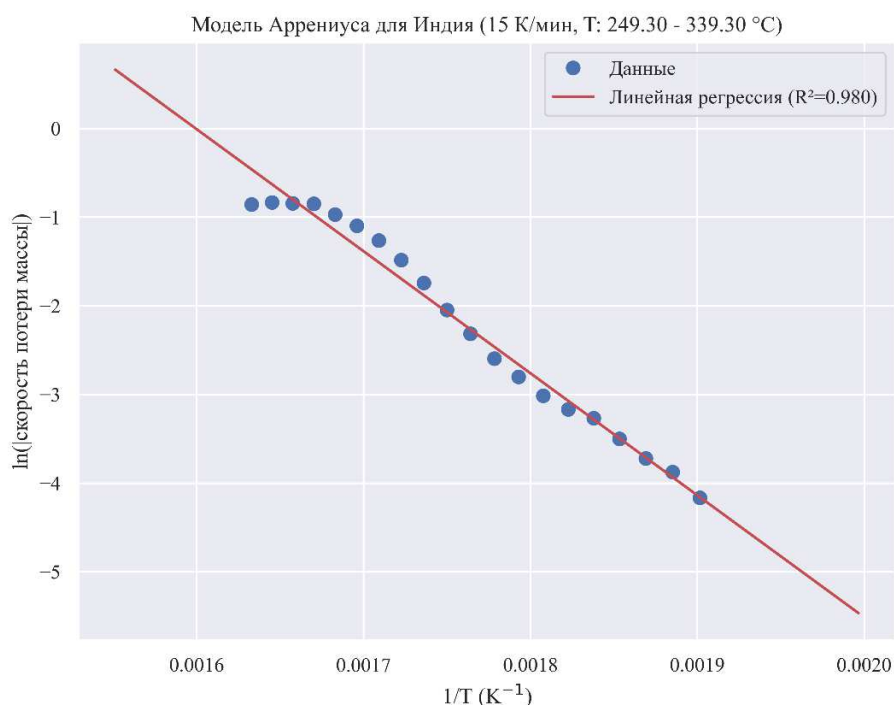


Рис. 2. Линейная регрессия сигнала.

Основываясь на таблице кинетических параметров, полученных методом Аррениуса для различных скоростей нагрева, можно сделать следующие выводы о связи кинетики разложения гиббсита со скоростью нагрева:

*Зависимость  $E_a$  от скорости нагрева:*

*Индия:* Значения  $E_a$  для образца из Индии по методу Аррениуса варьируются от 109.67 кДж/моль (при 10 К/мин) до 120.90 кДж/моль (при 2 К/мин).

*Гвинея:* Значения  $E_a$  для образца из Гвинеи по методу Аррениуса варьируются от 78.40 кДж/моль (при 20 К/мин) до 85.19 кДж/моль (при 2 К/мин).

*Зависимость  $A$  от скорости нагрева:*

*Индия:* Значения  $A$  для образца из Индии варьируются от  $1.05 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$  (при 20 К/мин) до  $5.25 \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$  (при 2 К/мин).

*Гвинея:* Значения  $A$  для образца из Гвинеи варьируются от  $1.10 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$  (при 20 К/мин) до  $1.92 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$  (при 2 К/мин).

Наблюдается небольшое снижение  $E_a$  с увеличением скорости нагрева. Это может указывать на то, что при более высоких скоростях нагрева процесс разложения происходит при более высоких температурах, где, возможно, активируются дополнительные реакционные пути или уменьшаются диффузионные ограничения, что приводит к незначительному снижению эффективной энергии активации.

Для обоих образцов также наблюдается снижение предэкспоненциального фактора  $A$  с увеличением скорости нагрева. Это согласуется с эффектом кинетической компенсации.

#### **Выводы:**

1. Установлены статистически значимые различия в кинетических параметрах разложения гиббсита из бокситов разного генезиса.

2. Более высокие значения  $E_a$  и  $A$  для мелкокристаллического гиббсита (Индия) указывают на его большую термическую стабильность и более сложный механизм разложения по сравнению с крупнокристаллическим (Гвинея).

3. Выявленная зависимость параметров от скорости нагрева подтверждает необходимость учета теплового режима при моделировании технологических процессов переработки бокситов.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН № 124022400142-2.*

#### **Литература**

1. Lapin A.V., Tolstov A.V. Minerageny of weathering crusts of carbonatites. Russian, Moscow, 2011, 308 p.
2. Боева Н.М., Макарова М.А., Шпилова Е.С., Слукин А.Д., Мельников Ф.П., Каримова О.В., Бортников Н.С. Два генетических типа бокситов Центрального месторождения и их редкометальная минерализация (Сибирская платформа) // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 23-34. DOI: 10.31857/S2686739722601648.

#### **KINETIC PARAMETERS OF THERMAL DEHYDROXYLIZATION OF GIBBSITE IN BAUXITES OF DIFFERENT GENESIS**

**Melnikov F.P., Boeva N.M., L.V., Makarova M.A., Shipilova E.S., Vnuchkov D.A.**

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM), RAS, [boeva@igem.ru](mailto:boeva@igem.ru)

Statistically significant differences in the kinetic parameters of gibbsite decomposition from bauxites of different genesis were established. Higher values of  $E_a$  and  $A$  for fine-crystalline gibbsite (India) indicate its greater thermal stability and a more complex decomposition mechanism compared to coarse-crystalline gibbsite (Guinea). The revealed dependence of the parameters on the heating rate confirms the need to take into account the thermal regime when modeling technological processes for bauxite processing.



## РАЗЛОМНАЯ ТЕКТОНИКА И РУДООБРАЗОВАНИЕ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ ОБЛАСТИ: АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**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, Москва, [minaev2403@mail.ru](mailto:minaev2403@mail.ru)

Восточная Якутия в настоящее время считается высокоперспективным регионом для открытия новых месторождений золота, включая крупные и уникальные по своим запасам объекты [Антонов, Гамянин, 2021; Волков, 2016]. Основная часть уже разведанных крупных месторождений сосредоточена в юго-восточных районах Верхояно-Черского (Дора-Пиль, Таллалах, Малотарынское) и Южно-Верхоянского (Нежданинский рудный район, Дыбинский рудный узел, Задержнинское) орогенных поясов. Однако на северном продолжении этих же металлогенических зон в пределах Яно-Колымской области картина иная. Для северного сегмента Верхояно-Черского пояса известно лишь одно крупное месторождение — Кючус, а на северо-западе Верхоянского пояса обнаружены только немногочисленные рудопроявления, среди которых наиболее значимым считается Дьянди. Подобная диспропорция в степени изученности отчасти объясняется сложными природно-климатическими условиями, затрудняющими организацию полевых работ в этих районах.

Вопросы, связанные с изучением структурного каркаса из разрывных нарушений Верхояно-Колымской орогенной области, остаются слабо изученными. Детальный анализ разломов и складчатых структур мезозоид этой системы был проведен Г.С. Гусевым [Гусев, 1979], установившим, что большая часть наблюдаемых сегодня разломов обрела свои основные черты в поздне меловую эпоху.

Согласно существующим представлениям [Прокопьев и др., 2018], формирование благороднометалльного оруденения в регионе обусловлено аккреционно-коллизийными процессами, которые привели к образованию Южно-Ануйской сутуры и Новосибирско-Чукотского орогенного пояса в апт-альбское время. Поскольку локализация рудных тел контролируется разрывными нарушениями, можно заключить, что свою окончательную морфологию эти разломы сформировали к концу раннего мела (125–105 млн лет назад).

В работе применялся комплекс современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли и тектонофизических



реконструкций. Подробно методика исследований изложена в работах [Минаев и др., 2024, Минаев и др., 2024<sub>2</sub>], поэтому ниже отмечены только основные наиболее важные этапы. На основе цифровой модели рельефа выделены линеаменты ручным и автоматическим способами. Выполнен анализ существующих картографических материалов и проведены работы по дополнению откартированного каркаса разрывных нарушений с использованием результатов линеаментного анализа (по методике [Сивков и др., 2020]).

На основе полученных и литературных данных были выполнены тектонофизические реконструкции по модели П.Л. Хэнкока [Hancock, 1985] для ключевых разломов восточного и западного секторов региона. Во всех случаях анализ показал единую ориентацию оси регионального сжатия — восток-северо-восток (азимут  $\approx 65^\circ$ ). Это свидетельствует о единых условиях формирования данных разломных структур и согласуется с гипотезой об их связи с орогенными и аккреционно-коллизийными процессами, сформировавшими Южно-Аннуйскую структуру и Новосибирско-Чукотский орогенный пояс.

На основе реконструкции ориентации оси главных сжимающих напряжений для зон влияния разломов в рудообразующий период были выделены сегменты структур с различной склонностью к сдвиговым деформациям, а следовательно и гидравлической активностью. Дополнительное численное моделирование было проведено на основе оценки действующих напряжений по нормированной диаграмме Мора [Rebetsky et al., 2022] с учетом порового давления и корректировкой глубины расчетного напряженного состояния.

Таким образом, сегменты структур были ранжированы от непроницаемых до высокопроницаемых. Все известные гидротермальные золоторудные объекты, за исключением нескольких залегающих в низменностях (где дешифрирование линеаментов ненадежно), пространственно совпадают с зонами влияния проницаемых и высокопроницаемых структур апт-альбского возраста, что подтверждает наши предположения.

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для территории северо-западной части Верхояно-Колымской орогенной области проведен 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 ее 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, 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 позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые отвечают север-северо-восточным, северо-восточным, субширотным и запад-северо-западным ориентировкам.

4. В аспекте 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.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.*

### **Литература**

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/](https://zolteh.ru/regions/sverkhkrupnye_mestorozhdeniya_zolota_rossii_i_uzbekistana_perspektivy_novykh_otkryti/)).
2. Волков А.В. Золотое сердце Сибири // Золото и технологии. 2016. № 2 (32). С. 42–48.
3. Гусев Г.С. Складчатые структуры и разломы верхояно-колымской системы мезозойд. Наука, 1979. 208 с.
4. 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.

5. Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О. Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Кольского полуострова и ее роли в рудообразовании // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. ES3010. DOI: 10.2205/2024es000918.
6. 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.
7. 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.
8. Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. V. 12, № 7. P. 437–457.
9. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. Algorithm for calculating neotectonic stresses in platform areas by the structural-geomorphological method. Geodynamics & Tectonophysics 13 (1). 2022. 0577. DOI:10.5800/GT-2022-13-1-0577

#### FAULT TECTONICS AND ORE FORMATION IN THE NORTHWEST OF THE VERKHOYANO-KOLYMA REGION: ANALYSIS BASED ON REMOTE SENSING DATA

**Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevsky A.D., Nafigin I.O.**  
 Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, [minaev2403@mail.ru](mailto:minaev2403@mail.ru)

This report details the findings of a comprehensive investigation into the fault tectonic framework of the northwestern Verkhoyan-Kolyma orogenic region. Conducted on a regional scale, the study employed both manual and automated techniques to identify lineaments from a digital elevation model. Synthesizing these new data with existing literature enabled tectonophysical reconstructions based on the model of P.L. Hancock (1985). These reconstructions pinpoint prospective zones within tectonic structures that exhibited peak hydraulic conductivity during collisional events, which are interpreted as controlling gold mineralization and ore occurrences in Eastern Yakutia. Consequently, areas with high potential for discovering new mineralized systems were delineated.

## КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

**Муравина О.М., Сотников А.А.**

Воронежский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВГУ»),  
Воронеж, [muravina@geol.vsu.ru](mailto:muravina@geol.vsu.ru)

Представление обобщенных петрофизических данных в виде карт распределения физических параметров позволяет в полной мере использовать априорную информацию о физических свойствах горных пород и при выполнении инверсии поля формировать корректные референтные модели с минимаксными ограничениями, что обеспечивает геологическую содержательность интерпретации геофизических данных [Воронова и др., 2021, Глазнев и др., 2016, Муравина О.М., Лошаков, 2015, Glaznev et al, 2015]. На протяжении последнего десятилетия на кафедре геофизики Воронежского государственного университета выполняются систематические исследования петрофизических свойств кристаллических и осадочных пород региона. Созданная усилиями сотрудников кафедры сводная цифровая пространственная база петрофизических данных объединяет фондовые и современные инструментальные данные о лабораторных измерениях физических свойств горных пород. Петрофизическая база данных стала фактической основой для создания петрофизических карт. Так в 2020 г была представлена Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива масштаба 1 : 1 000 000 и объяснительная записка к ней [Глазнев и др., 2020]. В настоящее время разработаны карты петромагнитных параметров (магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности). Формирование петрофизических карт базируются на пространственной привязке петрофизических данных в среде ГИС ArcView и на геологическую карту ВКМ масштаба 1 : 500 000 [Муравина, 2016; Глазнев и др., 2020; Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2016]. Для петромагнитных карт были обобщены 55000 значений магнитной восприимчивости и 46000 значений остаточной намагниченности, представляющие результаты масштабных петрофизических измерений образцов керна около 5000 скважин.

Методические приемы, которые были использованы при создании петромагнитной карты учитывали такие особенности петромагнитных данных, как широкий диапазон изменения петромагнитных характеристик, степень контрастности магнитных свойств пород различных литологических типов в пределах одного и того же структурно-вещественного комплекса (СВК). В качестве обобщенного

значения петрофизического параметра было принята статистическая оценка медианы [Муравина, Долганова, 2019; Муравина и др., 2023; Муравина и др., 2024].

В случае высокой контрастности различных пород, входящих в состав отдельного СВК привлекалась информация о количественном соотношении пород с целью расчета соответствующих весовых коэффициентов.

На рисунке представлены фрагменты геологической карты и карт петромагнитных параметров Белгородской структуры Курского блока ВКМ.

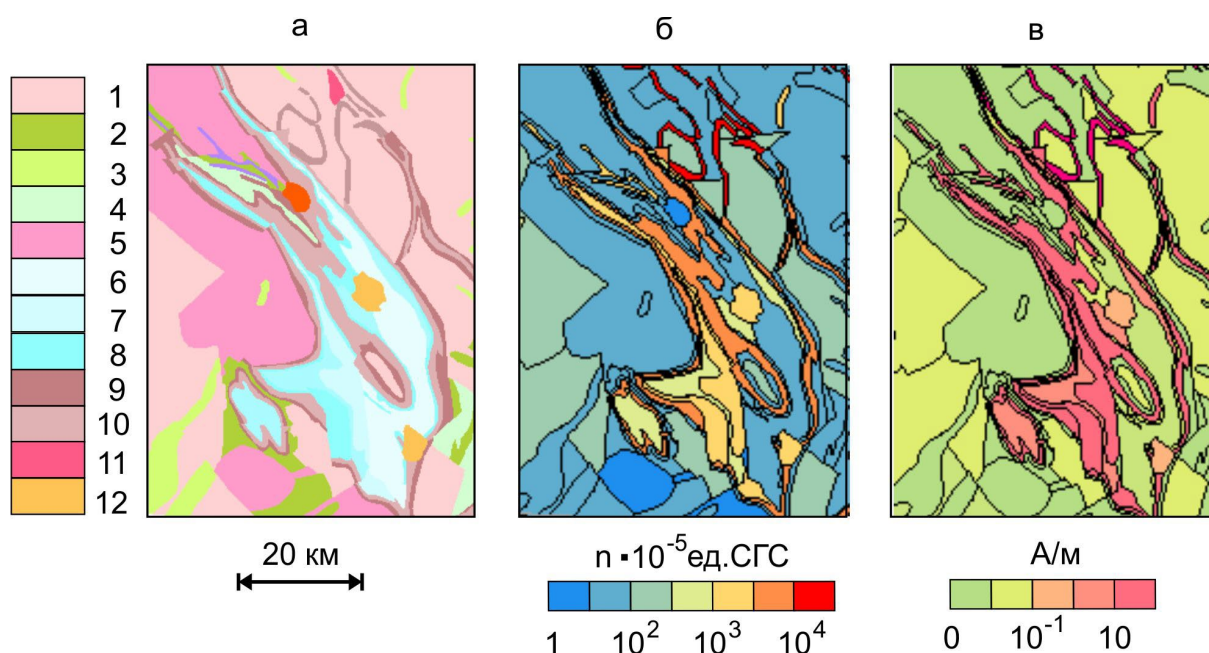


Рис. Геологическая схема (а), карты распределения магнитной восприимчивости (б) и остаточной намагниченности (в) Белгородской железорудной структуры Курского блока ВКМ: 1 – обоянский плутоно-метаморфический комплекс ( $Ar_{1ob}$ ), 2 – породы михайловской серии ( $Ar_{2mh}$ ); 3 – александровская свита ( $Ar_{2al}$ ); 4 – вулканогенно-осадочные образования лебединской свиты ( $Ar_{2lb}$ ); 5 – плагиограниты и плагиомигматиты салтыковского комплекса ( $Ar_{2sl}$ ); 6 – метаосадки яковлевской свиты ( $Pr_{1ja}$ ) и щелоковской толщи ( $Pr_{1sc}$ ); 7 – кварциты белгородской свиты ( $Pr_{1bl}$ ); 8 – сланцы висловской свиты ( $Pr_{1vs}$ ); 9 – железистые кварциты курской серии ( $Pr_{1kr}$ ); 10 – сланцы стойленской свиты ( $Pr_{1st}$ ); 11 – гранитоиды малиновского комплекса ( $Pr_{1ml}$ ); 12 – граносиениты шебекинского интрузивного комплекса ( $Pr_{1s}$ ).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 25-27-00209).*

### **Литература**

1. Воронова Т.А., Муравина О.М., Глазнев В.Н., Березнева С.И. Трёхмерная плотностная модель верхней коры в области сочленения Лосевского и Донского террейнов (Воронежский кристаллический массив // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. Вып. 49. С. 24-35.
2. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива // Воронеж: Научная книга, 2020. 101 с.
3. Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. Вып. 29. С. 53-63.
4. Муравина О.М., Давудова Э.И., Пономаренко И.А. Формирование петрофизических моделей и их использование при интерпретации геофизических полей // Материалы IXX Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2018. С. 242-245.
5. Муравина О.М., Долганова М.В. Методика формирования петромагнитной модели Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива // Материалы XX Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2019. С. 252-254.
6. Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Пространственный анализ распределения плотности докембрийских образований Воронежского кристаллического массива // Материалы XV Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2014. С. 171-173.
7. Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Корреляционный анализ цифровой основы карты изоденс Воронежского кристаллического массива и гравитационного поля // Материалы XVI Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2015. С. 201-203.

8. Муравина О.М., Овечкина А. С., Сотников А. А. Оценка достоверности петроплотностной и петромагнитных карт воронцовского терррейна Воронежского кристаллического массива // Материалы XXIII Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2022. С. 212-215.
9. Муравина О.М., Жидких О.С., Сотников А.А. Опыт обобщения петрофизических данных при создании петромагнитной карты воронежского кристаллического массива // Материалы XXIV Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2023. С. 199-202.
10. Муравина О.М., Ильин В.В., Жидких О.С., Сотников А.А. Оценка петромагнитных параметров железистых кварцитов Курского блока Воронежского кристаллического массива // Материалы XXV Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2024. С. 181-184.
11. Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M., Raevsky A.B, Osipenko L.G. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and the crust–mantle boundary // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6. P.133–170.

## MAPS OF THE DISTRIBUTION OF PETROMAGNETIC PARAMETERS OF THE VORONEZH CRYSTAL MASSIF

**Muravina O.M., Sotnikov A.A.**

Voronezh state university (VSU), Voronezh, [muravina@geol.vsu.ru](mailto:muravina@geol.vsu.ru)

Maps of petromagnetic parameters (magnetic susceptibility and remanence) have been developed for the territory of the Voronezh crystalline massif. The formation of geophysical maps is based on the spatial reference of petrophysical data in the ArcView GIS environment and on the geological map of the region at a scale of 1:500,000. To create petromagnetic maps, 55,000 values of magnetic susceptibility and 46,000 values of remanence were compiled from large-scale petrophysical measurements of core samples from approximately 5,000 wells.



# МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ: АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

<sup>1,2</sup>Патонин А.В., <sup>2,3</sup>Смирнов В.Б., <sup>2</sup>Пономарев А.В., <sup>1,2</sup>Шихова Н.М.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук (ГО «Борок» ИФЗ РАН), пос. Борок, Ярославская обл., Россия, [patonin\\_borok@mail.ru](mailto:patonin_borok@mail.ru)

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе представлен модернизированный лабораторный испытательный комплекс на базе электрогидравлического пресса ИНОВА, предназначенный для проведения комплексных петрофизических исследований горных пород в условиях трехосного напряжённого состояния. Комплекс обеспечивает программно управляемое нагружение с синхронной регистрацией акустической эмиссии (АЭ), ультразвукового прозвучивания, а также параметров порового и всестороннего давления. Управление сервогидравлическими системами пресса и насосными модулями осуществляется с помощью микроконтроллерной платформы на базе Arduino, что обеспечивает высокую точность, гибкость и воспроизводимость задаваемых режимов деформирования.

Данный аппаратно-программный комплекс представляет собой интегрированную систему, предназначенную для моделирования сложных термомеханических и гидрогеомеханических условий, характерных для реальных геотехнологических процессов (включая разработку месторождений полезных ископаемых, строительство подземных сооружений и управление геомеханической устойчивостью массива). Комплекс позволяет проводить испытания геоматериалов в условиях преобладающего осевого нагружения при контролируемом всестороннем и поровом давлении с одновременным сбором мультифизических данных и последующей обработкой результатов в автоматизированном режиме.

Аппаратная архитектура комплекса (рис. 1) включает в себя модернизированную систему управления положением поршня пресса, в которой традиционные аналоговые компоненты заменены на современную цифровую элементную базу. При этом сохранена высокая точность позиционирования поршня равная  $\pm 0,1$  мкм, что обеспечивает стабильное поддержание заданной скорости

деформации в широком диапазоне нагрузок. Для имитации пластовых условий в камере высокого давления используются специализированные плунжерные насосы российского производства (фирма «Геологика»), предназначенные для создания и регулирования всестороннего и порового давления. Точность стабилизации давления составляет  $\pm 0,1$  МПа в диапазоне до 140 МПа. Наличие независимых контуров давления позволяет реализовывать сложные программы нагружения, включая модуляцию порового и всестороннего давления по заданному алгоритму, что расширяет функциональные возможности комплекса и приближает условия лабораторных испытаний к реальным геологическим режимам.



Рис.1 Общая блок схема аппаратно-программного испытательного комплекса на базе пресса ИНОВА.

Система регистрации физических параметров интегрирована в единый синхронизированный измерительный контур,

обеспечивающий одновременную запись следующих данных с привязкой ко времени:

- сигналов акустической эмиссии (включая волновые формы и параметры отдельных событий);
- данные ультразвукового исследования (время прихода, амплитуда, затухание волн);
- показания тензометрических датчиков и LVDT-датчиков линейных перемещений (осевая деформация, перемещение поршня насоса порового давления);
- значения осевой нагрузки, порового и всестороннего давления.

Для повышения достоверности и надёжности измерений критически важные параметры (например, давление и перемещение) регистрируются параллельно несколькими независимыми каналами с последующим сопоставлением данных. Синхронизация всех измерительных каналов осуществляется в единой временной шкале с точностью 25 микросекунд, что обеспечивает корректную корреляцию между различными физическими процессами, происходящими в образце.

Программное обеспечение комплекса позволяет задавать произвольные протоколы нагружения, включая режимы постоянной скорости деформации, контролируемого напряжения, ступенчатого нагружения, а также циклических и релаксационных испытаний. Все этапы эксперимента выполняются в полностью автоматизированном режиме с возможностью оперативного мониторинга текущих параметров и динамического внесения корректировок в программу испытаний. Введён специальный режим контроля потока акустической эмиссии, позволяющий осуществлять управляемое нагружение с целью «мягкого» формирования магистрального разлома в хрупких породах (гранит, базальт), что особенно важно при исследовании процессов разрушения и предразрушения.

Полученные в ходе испытаний данные архивируются на нескольких независимых носителях в режиме реального времени, что исключает потерю информации при возможных сбоях оборудования или аварийных остановках. Созданная база данных включает в себя:

- каталог акустических событий с привязкой по времени, координатной локализацией источников акустической эмиссии в трёхмерном пространстве, амплитудами сигналов по каждому из датчиков и классификацией событий по полярности вступления волнового фронта;
- массивы волновых форм сигналов акустической эмиссии и ультразвукового зондирования;

- бюллетени по непрерывной интегральной акустике;
- временные ряды показаний датчиков давления, деформаций и перемещений;
- данные о скоростях распространения упругих волн по 16 фиксированным направлениям в объеме образца.

База данных формируется в стандартизированном формате, совместимом с общедоступными программными средствами обработки и визуализации (например, Octave, Python), что обеспечивает открытый доступ к первичным данным и способствует их последующему анализу с применением методов машинного обучения, статистической обработки и моделирования.

Таким образом, представленный лабораторный комплекс обеспечивает высокий уровень автоматизации, точности и информативности при проведении петрофизических исследований, открывая широкие возможности для изучения механических, гидравлических и акустических свойств геоматериалов в условиях, максимально приближенных к естественным геологическим условиям.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.*

#### AN UPGRADED COMPLEX FOR PETROPHYSICAL RESEARCH: AUTOMATION AND INTEGRATION OF MONITORING SYSTEMS

<sup>1,2</sup>**Patonin A.V.**, <sup>2,3</sup>**Smirnov V.B.**, <sup>2</sup>**Ponomarev A.V.**, <sup>1,2</sup>**Shikhova N.M.**

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (GO Borok IPE RAS), Moscow, Russia, [patonin\\_borok@mail.ru](mailto:patonin_borok@mail.ru)

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper presents an upgraded laboratory complex based on an Inova electrohydraulic press, which allows for complex petrophysical tests with programmable control of the loading process and synchronous recording of acoustic emission, ultrasonic sounding, pore and all-round pressure.

# ОЦЕНКА ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗРУШЕНИЯ

<sup>1,2</sup>**Пашенко Р.А.**, <sup>1,2</sup>**Смирнов В.Б.**, <sup>2,3</sup>**Шихова Н.М.**, <sup>2,3</sup>**Патонин А.В.**,  
<sup>2</sup>**Пономарев А.В.**, <sup>2</sup>**Строганова С.М.**

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, г. Москва, [r.pashhenko@mail.ru](mailto:r.pashhenko@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, поселок Борок

С использованием метода ультразвукового зондирования и методики спектральных отношений [Toksöz et al., 1979] проведены лабораторные исследования частотной зависимости коэффициента затухания упругих волн в образцах песчаника и гранита в процессе их нагружения и разрушения. Эксперименты выполнены на гидравлическом прессе, позволяющем создавать независимые осевую нагрузку и давление всестороннего сжатия [Патонин и др., 2013]. Установлено, что коэффициент затухания является чувствительным индикатором изменения напряженного состояния и структурных преобразований в материале. Показано, что увеличение всестороннего давления приводит к снижению затухания за счет закрытия пор и микротрещин, в то время как осевое нагружение, вызывающее развитие разрушения, сопровождается его резким ростом, особенно выраженным на высоких частотах. Эксперименты с насыщением образцов водой подтвердили значительное влияние флюида на затухание и применимость степенной аппроксимации для описания его частотной зависимости [Biot, 1956; Kenneth, 1983]. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования анализа частотной зависимости коэффициента затухания для диагностики процессов подготовки разрушения горных пород.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.*

## Литература

1. Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34.

2. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, II. High frequency range // J. Acoust. Soc. Am. 1956. Vol. 28. P. 179-191.
3. Kenneth W. Winkler. Frequency Dependent Ultrasonic Properties of High-Porosity Sandstones // Journal of Geophysical Research. 1983. Vol. 88. № B11. P. 9493-9499.
4. Toksöz M.N., Johnston D.H., Timur A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements // Geophysics. 1979. Vol. 44. № 4. P. 681–690.

#### ESTIMATION OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE ATTENUATION COEFFICIENT OF ELASTIC WAVES IN ROCK SAMPLES DURING THEIR DESTRUCTION

<sup>1,2</sup>**Pashchenko R.A.**, <sup>1,2</sup>**Smirnov V.B.**, <sup>2,3</sup>**Shikhova N.M.**,

<sup>2,3</sup>**Patonin A.V.**, <sup>2</sup>**Ponomarev A.V.**, <sup>2</sup>**Stroganova S.M.**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow,  
[r.pashhenko@mail.ru](mailto:r.pashhenko@mail.ru)

<sup>2</sup>Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow

<sup>3</sup>Geophysical observatory "Borok" Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Borok

Performed laboratory studies demonstrate that the attenuation coefficient of elastic waves in rocks serves as a sensitive indicator of mechanical stress and structural changes. Confining pressure reduces attenuation through pore closure, while axial loading increases it, especially at high frequencies, indicating impending failure. Water saturation significantly enhances attenuation, showing a clear power-law frequency dependence. These findings support using attenuation measurements for early detection of rock failure.

# ПРОБЛЕМЫ ПЕТРО- И АРХЕОМАГНЕТИЗМА НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМИКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ПАМЯТНИКА ГРИШИНСКИЙ ИСТОК III

<sup>1</sup>**Пилипенко О.В.**, <sup>2</sup>**Азаров Е.С.**

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН, Москва, [pilipenko@ifz.ru](mailto:pilipenko@ifz.ru)

<sup>2</sup>Государственный исторический музей, Москва, [hazari4@yandex.ru](mailto:hazari4@yandex.ru)

Данная работа посвящена петромагнитному и археоманитному исследованиям керамического материала поздняяковской культуры, отобранного на многослойном археологическом памятнике Гришинский исток III и датированного первой третью II тыс. до н.э. В работе представлены результаты определения археонапряженности магнитного поля, полученные методом двойных ступенчатых нагревов Теллье-Коз [Thellier and Thellier, 1959; Сое, 1967] в атмосфере воздуха. При определении величины древнего магнитного поля учитывались анизотропия термоостаточной намагниченности и скорость охлаждения керамики.

Несколько лет назад были начаты работы с целью построения кривой изменения виртуального аксиального дипольного момента (VADM) магнитного поля, записанного в керамическом материале, центра Русской равнины в долготном секторе 38°– 47° в.д. и севернее 50° с.ш. В частности, были получены значения археонапряженности магнитного поля, записанного во фрагментах сетчатой (текстильной) керамики третьей четверти II тыс. до н.э. многослойного археологического памятника Гришинский исток III [Пилипенко и др., 2023]. Древнее поселение Гришинский исток III располагалось примерно в 75 км на восток от города Рязань, у села Лакаш, (54°41'19"с.ш., 40°57'33"в.д.) [Азаров, 2017]. На месте одного из ранних жилищ, в котловане, были найдены фрагменты гладкостенной керамической посуды, орнаментированной в верхней части так называемыми «жемчужинами», округлыми и прямоугольными ямками, прочерченными линиями и т.д. Такая керамика соотносится с поздняяковской культурой позднего бронзового века [Азаров, 2017].

В продолжении начатой работы, в настоящей работе представлены результаты петромагнитного и археоманитного исследований семи фрагментов различных керамических сосудов, отобранных из котлована постройки поздняяковской культуры первой трети II тыс. до н.э. Эту древнюю постройку поздняяковской культуры пререзает более поздний по времени котлован жилища с археологическим материалом, который соответствует уже исследованной ранее коллекции образцов [Пилипенко и др., 2023].

В Геологическом институте РАН по остаткам угля, найденного на месте очага древнего жилища, определен возраст артефактов по измерению радиоактивного изотопа <sup>14</sup>C по отношению к стабильному изотопу углерода <sup>12</sup>C и получена радиоуглеродная



дата ГИН 6259:  $3490 \pm 70$  BP, 1976–1639 calBC (95%) [Сулержицкий, Фоломеев, 1993].

Проведенные петромагнитные исследования фрагментов керамики показали, что основными ферромагнитными носителями термоостаточной намагниченности в образцах являются частично окисленные псевдооднородные зерна магнетита, в котором ионы железа замещены немагнитными металлами. Не исключено, что в процессе нагрева образцов до  $350^\circ\text{C}$  в ходе терромагнитного анализа образовался маггемит.

В археомагнитном исследовании участвовало 40 образцов, по 4 – 9 образцов с одного фрагмента керамики, в зависимости от размера фрагмента. Как правило, три образца участвовало в экспериментах Телье-Коэ со скоростью охлаждения образца в трехкомпонентном терромагнитометре  $v_{\text{охл}} = 1^\circ/\text{с}$  и от одного до трех образцов – со скоростью  $v_{\text{охл}} = 0.2^\circ/\text{с}$ .

Для 9 образцов двух фрагментов керамики были получены величины археонапряженности. Диаграммы Араи-Нагаты исключенных из рассмотрения 31 образцов содержали несколько наклонов, были вогнутыми или демонстрировали рост естественной остаточной намагниченности (NRM). Причина многокомпонентного состава диаграмм Араи-Нагаты и роста NRM заключалась в термической нестабильности образцов, вызванной низкой температурой обжига керамики при ее изготовлении и, как следствие, с не до конца прошедшими в керамике минералогическими изменениями.

Девять полученных значений археонапряженности керамики хорошо согласуются друг с другом. Поскольку по типологии фрагменты исследованной керамики одновозрастные, то было рассчитано взвешенное среднее значение археонапряженности со взвешенной стандартной ошибкой:  $B_{\text{др}} = 47.5 \pm 3.0$  мкТл. Пересчет среднего значения археонапряженности на величину виртуального аксиального дипольного момента  $VADM = (7.1 \pm 0.3) \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  для  $1800 \pm 170$  г. до н.э. дает значение, которое с удовлетворительно ложится на сводный график зависимости VADM от возраста, построенный в результате археомагнитного исследования образцов многослойных археологических памятников центра Русской равнины.

В предыдущих работах [Начасова и др., 2022; Пилипенко, Цетлин, 2025] для возраста  $1800 \pm 170$  г. до н.э. было получено несколько определений VADM, а именно, по образцам многослойных археологических памятников Сахтыш I –  $(7.5 \pm 0.8) \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  и Ивановское III –  $(7.3 \pm 0.2) \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  и  $(8.0 \pm 0.3) \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . Тогда среднее взвешенное значение для возраста  $1800 \pm 170$  г. до н.э. по четырем определениям равно  $(7.4 \pm 0.3) \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ , что подтверждает тенденцию снижения величины магнитного поля после повышения во второй половине третьего тысячелетия до н.э. Наблюдаемый разброс определений может говорить как о точности, с какой получены данные значения,

так и отражать ошибку определения возраста в интервал времени, на который приходится быстрое изменение магнитного поля.

### **Литература**

1. Азаров Е.С. К планиграфии поселений культуры «текстильной» керамики позднего бронзового века Поочья. Жилые постройки // Археология евразийских степей. Эпоха бронзы и ранний железный век. Материалы III международной научной конференции «Ананьинский мир: культурное пространство, связи, традиции и новации». Издательский дом «Казанская недвижимость». 2017. №3. С. 63-79.
2. Начасова И.Е., Пилипенко О.В., Цетлин Ю.Б. Запись геомагнитного поля в керамике центра Русской равнины в III-II тыс. до н.э. // Физика Земли. 2022. № 2. С.60-72.
3. Пилипенко О.В., Начасова И.Е., Азаров А.С. Вариации палеонапряженности геомагнитного поля, записанные в археологической керамике позднего бронзового и раннего железного веков центра Русской равнины // Физики Земли. 2023. № 6. С. 224-244.
4. Пилипенко О.В., Цетлин Ю.Б. Археомагнитный возраст фрагментов керамики археологического многослойного памятника Ивановское III // Физики Земли. 2025. № 3. С.41-53
5. Сулержицкий Л.Д., Фоломеев Б.А. Радиоуглеродные даты археологических памятников бассейна средней Оки // Древние памятники Окского бассейна / Отв. Ред. В.П. Челябинов. Рязань: НПЦ по ОИПИКРО. 1993. С. 42-55.
6. Coe R.S. Paleointensities of the Earth's magnetic field determined from tertiary and quaternary rocks // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 3247–3262.
7. Thellier E., Thellier O., Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, Ann. Geophys, 1959, vol. 15, pp. 285-378.

### **PROBLEMS OF PETRO- AND ARCHAEOMAGNETISM ON THE EXAMPLE OF CERAMICS STUDY OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE GRISHINSKY ISTOK III**

**<sup>1</sup>Pilipenko O.V., <sup>2</sup>Azarov, E.S.**

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow, [pilipenko@ifz.ru](mailto:pilipenko@ifz.ru)

<sup>2</sup>State Historical Museum, Moscow, [hazari4@yandex.ru](mailto:hazari4@yandex.ru)

This work is devoted to the petromagnetic and archaeomagnetic studies of ceramic material of the Pozdnyakovo culture, collected at the multilayer archaeological site of Grishinsky Istok III and dated to the first third of the 2nd millennium BC. The work presents the results of determining the archaeointensity of the magnetic field, obtained by the Thellier-Coe double-step heating method in an air atmosphere. When determining the intensity of the ancient magnetic field, the anisotropy of the thermoremanent magnetization and the cooling rate of the ceramics were taken into account.

## ФРАГМЕНТИРОВАНИЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ В МОДЕЛИ РАЗЛОМА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ НОРМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

<sup>1</sup>Пономарев А.В., <sup>1</sup>Казначеев П.А., <sup>2</sup>Патонин А.В., <sup>2</sup>Шихова Н.М.,  
<sup>1</sup>Смирнов В.Б., <sup>1</sup>Краюшкин Д.В.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

[p\\_a\\_k@mail.ru](mailto:p_a_k@mail.ru)

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» - филиал ИФЗ РАН

Исследовано фрагментирование кварцевого песка, заполняющего лабораторную модель разлома, при увеличении нормального напряжения на разломе. Обнаружено, что нагружение приводит к выполаживанию кривой распределения частиц дробления по размерам, а также появлению мелкой фракции (20-200 мкм), ранее не присутствовавшей в исходном распределении зерен песка по размерам (200-800 мкм). Проведено качественное сравнение с опубликованными данными по распределению частиц заполнителя из активных разломных зон по размерам.

### Введение

Разрушение фрагментов горных пород, заполняющих разломные зоны, происходит при подвижках по разлому вследствие механического воздействия нормальных и сдвиговых напряжений. Характер развития разрушения зависит от параметров подвижек, величин напряжений, структуры разлома и параметров самого наполнителя – в частности, от распределения фрагментов по размерам. В предположении о непрерывном преобразовании вещества в активных разломных зонах такие фрагменты являются частицами дробления, в широком смысле слова.

Известно, что распределение частиц дробления различно в зависимости от типа пород и положения точки отбора в разломной зоне (в продольном и поперечном направлении). Прежде всего, средний размер частиц уменьшается при приближении к зоне магистрального сместителя. Это предполагает большую интенсивность преобразования в зоне с большими *сдвиговыми* деформациями [Кочарян, 2016].

С другой стороны изменение геодинамического состояния – например, обновление разлома после сильной подвижки-землетрясения, увеличение тектонических напряжений и др., – может приводить к изменению нормальных напряжений на разломе. Изучению режима скольжения по разломам при разных и, в частности, неравномерных нормальных напряжениях посвящено значимое количество современных работ [Cebry et al., 2023]. Но практически отсутствуют данные по разрушению материала

заполнителя разлома при увеличении *только нормального* напряжения. Такое увеличение тоже может приводить к дроблению, характеризующемуся определенными закономерностями.

### **Методика и экспериментальный материал**

Мы провели пробные эксперименты с кварцевым песком естественного происхождения как заполнителем модели разлома. Нагружение производилось на нагружающей машине INOVA с сервогидравлическим управлением в геофизической обсерватории «Борок» – филиале ИФЗ РАН [Веселовский и др., 2022]. Модель представляла собой два латунных цилиндра с плоскопараллельными торцами, приставленные друг другу с образованием контакта – модельного разлома, который был заполнен песком в количестве меньшем, чем было бы, если бы песок был толщиной в средний размер песчинок. Использование латуни соответствует ситуации, когда материал бортов разлома менее твердый и более пластичный, чем материал наполнителя, что наблюдается в случаях реальных разломов. Например, похожей по соотношению твердостей является пара материалов кварц-известняк, возможных для разломных зон [Scholz, 2002].

Гранулометрический анализ заполнителя производился лазерно-дифрактометрическим методом на анализаторе размеров частиц Malvern Mastersizer 3000 в Институте географии РАН; методика подробнее описана в [Panin et al., 2019].

### **Результаты**

На рис. 1 приведены распределения до и после дробления песка в модели. Видно существенное «размывание» распределения частиц по размерам, уменьшение доли крупных частиц, появление фракции с размером зерен 20-200 мкм, которая отсутствовала в исходном распределении, и увеличение доли мелких, пылевидных частиц с размерами 1-20 мкм. Медиана размер частиц уменьшилась с 356 до 176 мкм, средний размер, взвешенный по объему – с 367 до 208 мкм.

### **Обсуждение и выводы**

Традиционно допускается возможность фрактальной структуры дробления, проявляющаяся в обратной степенной зависимости числа частиц от их размера и, соответственно, в линейной аппроксимации на билогарифмическом графике. Для такого случая вводится параметр  $D$  фрактальной размерности распределения частиц по размерам  $r$ , определяющийся как модуль показателя степени десяти  $10^{-D \cdot r}$  [Sammis et al., 1986; Keulen, 2007].

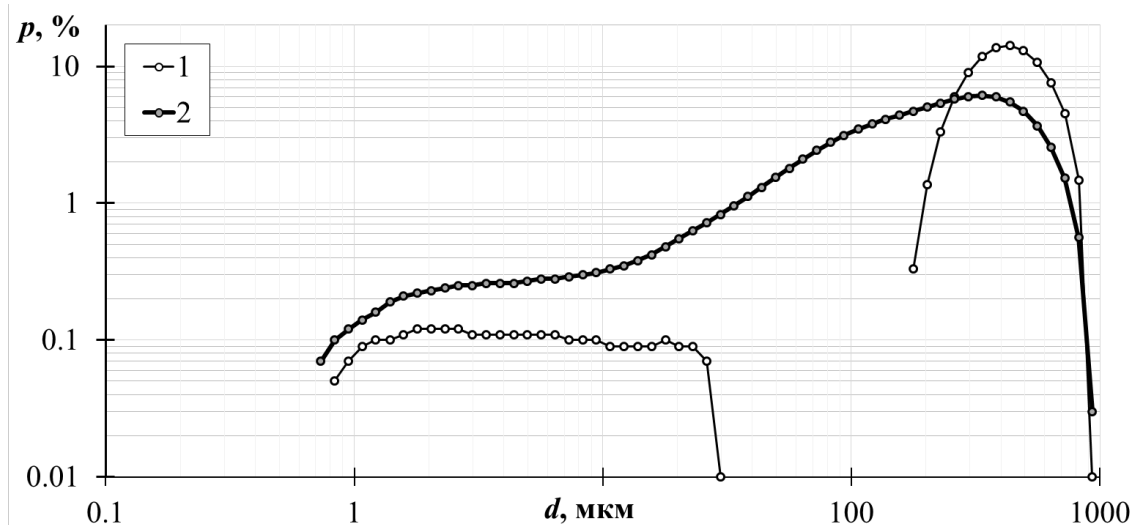


Рис. 1. Распределение частиц песка до (1) и после (2) эксперимента по дроблению сдавливанием.  $d$  – характерный размер частиц;  $p$  – доля частиц данного размера.

Предполагается, что при развитии переработанности материала-заполнителя магистрального сместителя разлома фрактальная размерность  $D$  возрастает [Blenkinsop, 1991; Keulen, 2007]. Полученные результаты не согласуются с этим тезисом. По всей видимости, необходимо дополнение экспериментальных данных, а именно получение распределения частиц после многократных нагружений. Совместный анализ данных изменения гранулометрического состава и акустической эмиссии, характеризующей процесс разрушения, позволит с двух сторон оценить фрактальность разрушения [Соболев, Пономарев, 2003].

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН.*

### Литература

1. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” // Геодинам. и тектонофиз. 2022. Т. 13. № 2. ArtID 0579. С. 1-12.
2. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. – М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
3. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука. 2003. 270 с.
4. Blenkinsop T.G. Cataclasis and processes of particle size reduction // Pure Appl. Geophys. 1991. V. 136. P. 59-86.

5. Cebry S.B., Sorhaindo K., Mclaskey G. Laboratory Earthquake Rupture Interactions With a High Normal Stress Bump // Journal of Geoph. Res.: Solid Earth. 2023. V. 128. ArtID e2023JB027297. P. 1-24.
6. Keulen N., Heilbronner R., Stünitz H., Boullier A.M., Ito H. Grain size distributions of fault rocks: A comparison between experimentally and naturally deformed granitoids // J. of Struct. Geol. 2007. V. 29. P. 1282-1300.
7. Panin P.G., Timireva S.N., Konstantinov E.A., Kalinin P.I., Kononov Yu.M., Alekseev A.O., Semenov V.V. Plio-Pleistocene paleosols: Loess-paleosol sequence studied in the Beregovoye section, the Crimean Peninsula // Catena. 2019. Vol. 172. P. 590-618.
8. Sammis C.G., Osborne R.H., Anderson J.L., Banerdt M., White P. (). Self-similar cataclasis in the formation of fault gouge // Pure Appl. Geophys. 1986. V. 124. P. 53-78.
9. Scholz C. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3rd ed. - Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 516 p.

#### FRAGMENTATION OF THE FILLER IN THE FAULT MODEL UNDER UNIAXIAL NORMAL LOADING

<sup>1</sup>**Ponomarev A.V.**, <sup>1</sup>**Kaznacheev P.A.**, <sup>2</sup>**Patonin A.V.**, <sup>2</sup>**Shikhova N.M.**,  
<sup>1</sup>**Smirnov V.B.**, <sup>1</sup>**Krayushkin D.V.**

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow,  
[p\\_a\\_k@mail.ru](mailto:p_a_k@mail.ru)

<sup>2</sup> Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS

Fragmentation of quartz sand filling the laboratory model of the fault has been studied with an increase in the normal stress on the fault. It was found that loading leads to flattening of the size distribution curve of crushing particles, as well as the appearance of a fine fraction (20-200 microns), which was not previously present in the initial size distribution of sand grains (200-800 microns). A qualitative comparison has been made with published data on the size distribution of filler particles from active fault zones.

## ИЗУЧЕНИЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД НЕРКАЮСКОГО КОМПЛЕКСА (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ): ПЕТРОФИЗИКА, ПЕТРОГРАФИЯ И ГЕОФИЗИКА

**Пономарева Т.А.**

Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, [taponomareva@inbox.ru](mailto:taponomareva@inbox.ru)

Метаморфический неркаюский эклогит-амфиболит-сланцевый комплекс расположен в северо-восточной части Приполярного Урала. В плане он имеет серповидную форму и протягивается с юга на север от р. Хальмерью до р. Тыкотлова на 85 км при ширине около 16 км [Государственная..., 2007]. Анализ публикаций последних лет, касающихся вопросов геологии неркаюского комплекса, изучения слагающих его пород, их возраста и многократно проявившимся процессам метаморфизма, указывает на то, что среди исследователей имеются определенные разногласия [Пучков и др., 1983; Пыстин, 1994; Пучков и др., 1996; Ремизов и др., 2006 и др.]. В современном рельефе неркаюский комплекс слабо выражен, так как относится к плохо обнаженным и труднодоступным районам. Вследствие этого, возникла необходимость в привлечении петрофизических и геофизических данных для установления общих связей их с геологическими (петрографическими, минералогическими, геохимическими и др.) сведениями [Пономарева и др., 2022; 2025; Пономарева, 2025]. Для проведения петрофизической классификации пород был использован каменный материал из геологической коллекции Кушмановой Е.В, отобранный во время полевых работ (2012, 2014 гг.). Всего в измерениях участвовало 105 образцов пород, собранных с северной части неркаюского комплекса, точнее с двух его участков: первый расположен на правом берегу р. Неркаю, а второй – в междуречье рр. Большая Хосая и Большая Нядокота. Метаморфические породы неркаюского комплекса в основном представлены кристаллическими сланцами, образованные по осадочным породам (парапородам) [Пыстин, 1994; Ремизов и др., 2006; Кушманова.2020] и первично-магматическим образованиям (ортопородам) [Пучков и др., 1983; Пыстин, 1994; Пучков и др., 1996; Ремизов и др., 2006 и др.]. Метабазиты, представленные амфиболитами и эклогитоподобными породами (эклогитами), составляют незначительную часть (20 %) изучаемого комплекса.



Петрофизическое группирование пород, выполненное совместно с петрографическим описанием и геохимическими данными, позволило выделить среди всех образований неркаюского комплекса шесть групп пород, отличающихся вещественным составом, петроплотностными и петромагнитными свойствами. В обобщенном виде результаты комплексных исследований представлены в таблице 1. Так, все метаморфические породы неркаюского

Таблица 1. Петрофизическое группирование пород неркаюского комплекса [Пономарева, 2025]

| Петрофизические характеристики пород |                          |             |   |           |  |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------|---|-----------|--|
| Петроплотностные группы              | Петромагнитные подгруппы |             |   |           |  |
|                                      | I                        | Немагнитные |   | Магнитные |  |
|                                      |                          | a           | $\rho > 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$<br>$\chi_{уд} < 100 \times 10^{-8} \text{ ед. СИ}$             | b         | $\rho \geq 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$<br>$\chi_{уд} \geq 100 \times 10^{-8} \text{ ед. СИ}$      |
|                                      | II                       | a           | $(2.78 < \rho \leq 3.00) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$<br>$\chi_{уд} < 100 \times 10^{-8} \text{ ед. СИ}$ | b         | $2.78 < \rho \leq 3.00) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$<br>$\chi_{уд} > 100 \times 10^{-8} \text{ ед. СИ}$ |
|                                      | III                      | a           | $\rho < 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$<br>$\chi_{уд} < 100 \times 10^{-8} \text{ ед. СИ}$             | b         | $\rho < 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$<br>$\chi_{уд} > 100 \times 10^{-8} \text{ ед. СИ}$            |

**Примечание.** В таблице греческими буквами  $\rho$  и  $\chi_{уд}$  обозначены плотность и удельная магнитная восприимчивость пород соответственно.

комплекса разделились по составу, текстурно-структурным особенностям и плотности на три основные петроплотностные группы (I-III): I – метабазиты; II – сланцевые породы различного генезиса (гнейсы и амфиболовые (глаукофановые) сланцы); III – гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит—амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы. Кроме того, выделены шесть петромагнитных групп пород, различные по магнитным свойствам и генезису.

**Метабазиты неркаюского комплекса.** Для немногочисленной группы метабазитов характерны плотности больше среднего значения  $3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$  (таблица; I, a-b). Среди них наибольшие вариации  $\rho$  установлены у амфиболитов –  $(2.87–3.27) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ . У эклогитоподобных пород (эклогитов) спектр вариативности меньше, при этом плотность их существенно больше –  $(3.13–3.34) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Петрофизические исследования метабазитов показали, что дифференциация физических свойств, отчетливо выраженная у амфиболитов, происходит при диафторезе и метасоматозе, в процессе протекания которых образуется вторичный магнетит, повышающий магнитные свойства пород до  $1176 \times 10^{-8}$  ед. СИ и выше. Измененные амфиболиты в минералогическом составе имеют до 12 % магнетита. Удельная магнитная восприимчивость эклогитоподобных пород (эклогитов) меняются в пределах  $(26-307) \times 10^{-8}$  ед. СИ. В связи с этим, высокоплотные породы комплекса разделяются на: немагнитные (неизмененные) – (I, а) и магнитные (метасоматически измененные) – (I, b). Условная граница выделения петрогрупп проходит по значению  $\chi_{уд}$  равному  $100 \times 10^{-8}$  ед. СИ и зависит от содержания тех или иных рудных и акцессорных минералов.

*Кристаллические сланцы неркаюского комплекса.* Различные по составу сланцы, равно как метабазиты, имеют широкие диапазоны изменения значений плотности  $(2.62-3.02) \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и удельной магнитной восприимчивости  $(10-2880) \times 10^{-8}$  СИ. Анализ петроплотностных характеристик, а также структурно-текстурные особенности сланцевых пород, претерпевших изменения при низко- и среднетемпературных метаморфических процессах, позволили разделить их на пара- и ортосланцы по условному значению  $2.78 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [Пономарева, Кушманова, 2025].

К группе с повышенными плотностями относятся гнейсоподобные породы (таблица; II, а), протолитом которых были песчаники [Пономарева, Кушманова, 2025]. Они имеют осадочное происхождение и практически немагнитны ( $\chi_{уд} < 100 \times 10^{-8}$  ед. СИ). Среди высокоплотных пород выделяются группа ортопород – амфиболовые (глаукофановые) сланцы с нематогранобластовой структурой, образованные по апобазальтам. Эти породы имеют первично-магматическую природу и отличаются от гнейсов повышенными магнитными свойствами –  $\chi_{уд} > 100 \times 10^{-8}$  ед. СИ (таблица; II, b).

Отдельную петроплотностную группу (таблица, III, а-b) составляют кристаллические сланцы с пониженными плотностями  $\rho < 2.78 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Они также, как и гнейсоподобные сланцы, имеют первично-осадочное происхождение [Пономарева, Кушманова, 2025], но образованы по глинистым породам. В составе данной

петроплотностной группы есть немагнитные (III, а) и магнитные (III, б) разности.

Районирование геофизических полей (гравитационного, магнитного), проведенное с учетом данных петрофизического группирования пород позволяет разделить объект исследований на две области: северо-восточную и юго-западную. В северо-восточном секторе по контурам аномалий картируются площади неизменных (в центре) или слабоизмененных метабазитов (в восточном обрамлении), а также участки диафторированных и метасоматически измененных амфиболитов (на западе). В юго-западном секторе, пониженные гравитационное и магнитное поля наблюдаются над кристаллическими сланцами осадочного происхождения, получившими здесь широкое развитие.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (рег. номер 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085).*

## **Литература**

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41. Воркута. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 541 с. <https://www.geokniga.org/maps/3353> (дата обращения: 25.01.2024).
2. Пучков В.Н., Карстен Л.А., Иванов К.С. Состав и тектоническое положение эклогит-глаукофансланцевых комплексов Приполярного Урала // Доклады академии наук СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 676–680.
3. Пыстин А.М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб: Наука, 1994. 208 с.
4. Пучков В.Н., Карстен Л.А., Шмелев В.Р. Важнейшие черты геологического строения восточного склона Приполярного Урала // Геология и палеонтология Урала. Свердловск. 1986. С. 75–88.
5. Ремизов Д.Н., Григорьев С.И., Григорьева Н.Г., Юдин В.В., Иванов В.Н., Феофилактов Ф.Н. Первичный состав и геодинамика неркаюского и лемвинского аллохтонов Приполярного Урала // Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар, Изд-во Геопринт. 2006. С. 128–142.

6. Пономарева Т.А., Кушманова Е.В. Метабазиты неркаюского комплекса Приполярного Урала: петрофизика, петрография и петрохимия // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2022. № 4. С. 84–94. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/83-93>
7. Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Петрофизическое группирование сланцевых пород неркаюского комплекса (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 14—24. DOI: 10.19110/geov.2025.1.2
8. Пономарева, Т. А. (2025). Результаты геолого-геофизических исследований неркаюского комплекса Приполярного Урала. Вестник ВГУ. Серия: Геология, (1), 89-101. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/89-101>
9. Пономарева Т.А., Кушманова Е.В. Метабазиты неркаюского комплекса Приполярного Урала: петрофизика, петрография и петрохимия // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2022. № 4. С. 84–94. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/83-93>
10. Кушманова Е.В. Состав и геодинамические условия формирования кристаллических сланцев неркаюского эклогит-сланцевого комплекса (Приполярный Урал) // Материалы LII Тектонического совещания. 2020. Т. 2. С. 13–16.

## STUDY OF METAMORPHIC ROCKS OF THE NERKAYU COMPLEX (NETHER-POLAR URALS): PETROPHYSICS, PETROGRAPHY AND GEOPHYSICS

**Ponomareva T.A.**

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar,  
[taponomareva@inbox.ru](mailto:taponomareva@inbox.ru)

Integrated geological and geophysical analysis of the Nerkayu complex enabled a petrophysical classification of its rocks into six distinct groups, differentiated by composition and genesis. Interpretation of geophysical data further revealed a division of the complex into two structural sectors: a northeastern sector characterized by metabasites and a southwestern sector dominated by schists.

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ В ЦИКЛАХ НАГРУЗКИ-РАЗГРУЗКИ ОБРАЗЦОВ ГРАНИТА И ПЕСЧАНИКА.

<sup>1,2</sup>**Потанина М.Г.**, <sup>1,2</sup>**Петрушов А.А.**, <sup>1,2</sup>**Смирнов В.Б.**, <sup>2,3</sup>**Патонин А.В.**,  
<sup>2</sup>**Пономарев А.В.**, <sup>2</sup>**Строганова С.М.**, <sup>2,3</sup>**Шихова Н.М.**

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва [potanina@physics.msu.ru](mailto:potanina@physics.msu.ru)

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, поселок Борок

Одной из важных задач физики сейсмического процесса является выяснение роли структурных факторов разрушения и действующих напряжений в формировании величины и изменениях наклона графика повторяемости акустических событий. Результаты решения этой задачи важны, в частности, для прояснения природы и особенностей аномалий наклона графика повторяемости перед сильными землетрясениями.

В литературе обсуждаются два основных подхода для объяснения изменений (в том числе и аномальных) величины наклона графика повторяемости. Один предполагает, что значение наклона графика повторяемости  $b$  определяется структурой неоднородностей среды, и распределение неоднородностей по размерам определяет распределение землетрясений по энергиям. Согласно этому подходу при подготовке землетрясения развитие трещиноватости ведет к укрупнению трещин при их слиянии, что проявляется в уменьшении наклона графика повторяемости. Второй подход предполагает, что величину  $b$  можно связать не только со степенью неоднородности горных пород, но и с уровнем действующих напряжений, и предвестниковое уменьшение величины  $b$  объясняется ростом напряжений. Подробное обсуждение этих подходов можно найти в [Scholz, 2015; Смирнов, Пономарев, 2020].

На основании эксперимента на образце мигматита с циклами нагрузки-разгрузки при последовательно увеличивающемся давлении всестороннего сжатия в [Смирнов, Пономарев, 2020] была выдвинута гипотеза о разделении структурного и силового факторов в изменениях наклона графика повторяемости. Авторы гипотезы предположили, что минимальные значения наклона графика повторяемости контролируются не уровнем напряжений, а степенью разрушенности (структурой неоднородности) материала. Пока действующие напряжения далеки от критического уровня, определяемого прочностью среды, наклон графика повторяемости  $b$  зависит от уровня действующих напряжений. Когда напряжения близки к критическим, зависимость  $b$  от напряжений выходит на «насыще-

ние», уровень которого не зависит от величины напряжений, а определяется структурой неоднородностей среды.

В докладе представлены пилотные результаты анализа данных лабораторных экспериментов, выполненных в геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН. Эксперименты проводились на сервоуправляемом прессовом комплексе ИНОВА [Патонин и др., 2013]. В результате экспериментов были получены бюллетени акустических событий, в которых представлены времена и относительные энергии событий в форме относительных энергетических классов.

Эксперименты проводились на образцах гранитов и песчаников цилиндрической формы по следующей схеме. Изначально целый образец подвергался осевому нагружению в условиях всестороннего сжатия. На первом этапе осевая нагрузка постепенно (с контролируемой скоростью) увеличивалась вплоть до образования макроразрыва через весь образец (макроразрыв рассматривается как аналог разломной зоны в натурных условиях [Смирнов, Пономарев, 2020]). После этого осевая нагрузка постепенно (с контролируемой скоростью) снималась. Таким образом формировался цикл нагрузки-разгрузки. На следующем этапе такие циклы нагрузки-разгрузки повторялись уже на образце с макроразрывом. Перед началом каждого цикла увеличивалось давление всестороннего сжатия (именуемое в лабораторных исследованиях конфайнингом), что увеличивало эффективную прочность образца по макроразрыву.

Величина наклона графика повторяемости акустических событий рассчитывалась в скользящих временных окнах для каждого цикла нагрузки-разгрузки. Исследовалось изменение величины наклона графика повторяемости на стадии нагрузки и разгрузки, а также его величина на максимуме нагрузки как функция осевых напряжений и конфайнинга.

По данным эксперимента на образце гранита обнаружено, что при увеличении осевой нагрузки величина  $b$  уменьшается, а при уменьшении нагрузки – увеличивается. Эта тенденция соответствует результатам эксперимента на мигматите [Смирнов, Пономарев, 2020] и подтверждает предположение о зависимости наклона графика повторяемости от напряжений. Однако минимальные значения  $b$ , достигшие своих величин на максимумах осевых напряжений в циклах нагрузки-разгрузки, примерно одинаковы (особенно на стадии разрушения образца с уже сформировавшимся макроразрывом), хотя значения этих максимальных осевых нагрузок различны. Это также согласуется с результатами из [Смирнов, Пономарев, 2020] и противоречит гипотезе об однозначной связи величины наклона графика повторяемости с величиной действующих напряжений.

По данным эксперимента на образце песчаника обнаружено, что кривая  $b$  для целого образца существенно отличается от кривых для образца со сформировавшимся макроразрывом. В пределах циклов нагрузки-разгрузки для образца с макроразрывом не видны изменения  $b$  при увеличении и уменьшении осевых напряжений, что противоречит гипотезе об обусловленности наклона графика повторяемости уровнем действующих напряжений. При максимальных значениях осевых нагрузок, существенно различающихся от цикла к циклу, значения  $b$  близки друг к другу, что соответствует данным опыта на граните и также, как и там противоречит гипотезе об однозначной связи  $b$  только с напряжениями.

По зависимости средних и минимальных значений  $b$ , приходящихся на «плато» нагрузки, от величин осевых напряжений и конфайнинга обнаружено, что для стадии разрушения образца со сформировавшимся макроразрывом величина  $b$  увеличивается с ростом осевой нагрузки, что противоречит сценарию гипотезы обусловленности наклона графика повторяемости действующими напряжениями, согласно которому с ростом напряжений величина  $b$  должна уменьшаться. С ростом конфайнинга и, соответственно, ростом прочности на макроразрыве величина  $b$  также увеличивается.

Полученные на настоящем этапе результаты мы считаем пилотными, свидетельствующими о перспективности дальнейшего более тщательного лабораторного исследования. Пока можно говорить о том, что в эксперименте мы видим проявления обоих обсуждаемых в литературе сценариев изменения величины наклона графика повторяемости в процессе разрушения горных пород – как в результате изменения осевых напряжений (в опыте с гранитом) и давления всестороннего сжатия (в опыте с песчаником), так и формирование режима разрушения (при максимальных значениях осевой нагрузки) с величиной  $b$ , практически не зависящей от действующих напряжений. Эти результаты (пока предварительные) указывают на то, что при интерпретации прогностических аномалий наклона графика повторяемости в натурных условиях следует иметь в виду возможность одновременного или последовательного действия различных физических механизмов, контролирующих величину наклона графика повторяемости и ее изменения.

*Работа выполнена в рамках госзаданий МГУ имени М.В.Ломносова и ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН.*



## Литература

1. Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34.
2. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
3. Scholz, C. H. On the stress dependence of the earthquake b value // Geophys. Res. Lett., 2015, 42, 1399–1402, doi:10.1002/2014GL062863.

## EXPERIMENTAL STUDY OF B-VALUE VARIATIONS DURING LOADING–UNLOADING CYCLES ON GRANITE AND SANDSTONE

<sup>1,2</sup>Potantina M.G., <sup>1,2</sup>Petrushov A.A., <sup>1,2</sup>Smirnov V.B., <sup>2,3</sup>Patonin A.V., <sup>2</sup>Ponomarev A.V., <sup>2</sup>Stroganova S.M., <sup>2,3</sup>Shikhova N.M.

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow  
[r.pashhenko@mail.ru](mailto:r.pashhenko@mail.ru)

<sup>2</sup>Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow

<sup>3</sup>Geophysical observatory "Borok" Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Borok

The report presents laboratory results focused on identifying the factors that control variations in the recurrence plot slope of acoustic events (Gutenberg–Richter b-value). The interplay between structural and stress-related factors during rock failure is examined. Experiments were conducted at the Borok Geophysical Observatory, Institute of Physics of the Earth, RAS, on cylindrical granite and sandstone samples under varying axial loads and confining pressures. It was found that the recurrence plot slope decreases with increasing axial stress; however, its minimal values are not stress-dependent but controlled by the degree of material fracturing. For samples with a macrofracture, a failure regime emerges where the slope becomes nearly independent of stress but increases with confining pressure. The obtained preliminary results indicate that both stress and structural heterogeneity may govern the evolution of the recurrence plot slope, which must be considered when interpreting b-value anomalies in the context of precursory processes of large earthquakes.

## ВЛИЯНИЕ T-P-fO<sub>2</sub> НА СТРУКТУРУ ОКСИФТОРИДНЫХ ФАЗ НИОБИЯ И НАТРИЯ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРАХ

**Редькин А.Ф., Котова Н.П., Некрасов А.Н., Дрожжина Н.А.**

Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского (ИЭМ) РАН, Черноголовка, [redkin@iem.ac.ru](mailto:redkin@iem.ac.ru); [kotova@iem.ac.ru](mailto:kotova@iem.ac.ru); [alex@iem.ac.ru](mailto:alex@iem.ac.ru); [nadron@mail.ru](mailto:nadron@mail.ru)

Согласно представлениям Г.П. Зарайского [Зарайский и др., 2008] редкие металлы, имеющие высокое сродство к кислороду, накапливаются в остаточном расплаве в ходе кристаллической дифференциации. Дальнейшему концентрированию металлов до промышленного уровня способствуют гидротермальные процессы растворения, переноса и концентрирования руд на геохимических барьерах. Оксидные и окси-фторидные минералы ниобия и тантала имеют низкую растворимость в разбавленных водно-солевых растворах, равновесных с кислыми гранитами. Заметная растворимость рудных минералов имеет место в кислых фторидных растворах. По оценке А.М. Аксюка [Аксюк, 2002], концентрация HF в Ta-Nb-содержащих гранитах могла достигать 1 моль·кг<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O. Высокие концентрации HF могли появиться при взаимодействии солей фторидов с оксидами Nb, Ta, W и др. рудных компонентов, входящих в состав расплавов Li-F гранитов. В связи с чем, представляет интерес исследование взаимодействия Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) с растворами NaF.

Ранее [Котова, 2016] было установлено, что при воздействии 1mNaF раствора на Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при 300 – 550°C образуется неизвестная окси-фторидная кристаллическая фаза, содержащая Na и Nb. Позднее в 2022 г. французскими исследователями [Boivin et al., 2022] при 240°C, P<sub>нас.</sub> были получены субмикронные кристаллы примерного состава Na<sub>2</sub>Me<sub>2</sub>O<sub>5</sub>F<sub>2</sub> (Me=Nb, Ta), отнесенные к пироклоровой структуре  $Fd\bar{3}m$ . Рентгенограммы этих кристаллов и их ПЭЯ параметры были подобны ранее полученным [Котова, 2016]. Однако, составы кристаллов имели существенное различие [Redkin et al., 2025].

Исследования влияния физико-химических параметров на структуру соединений ниобия были продолжены при 600-800°C, P<sub>общ.</sub>=200 МПа и fO<sub>2</sub>, заданной Ni-NiO и Co-CoO буферами. Исследования показали, что кубическая  $Fd\bar{3}m$  фаза устойчива при 600, 650 и 700°C, Ni-NiO буфере (рис. 1), а при 800°C образуется перовскитоподобная искаженная тетрагональная фаза (моноклинной структуры) (предварительные параметры  $a=2.7859$ ,  $b=3.9199$ ,  $c=2.7635$  Å,  $\alpha=90.000$ ,  $\beta=90.740$ ,  $\gamma=90.000^\circ$ ).

При Co-CoO буфере перовскито- и пироклороподобные фазы сосуществуют при 700°C (рис. 2). В опыте при 800°C произошло медленное падение общего давления с 200 МПа до 50 МПа в течение 3 суток. В результате, на поверхности крупных перовскитоподобных кристаллов образовались более мелкие кристаллы октаэдрической формы.

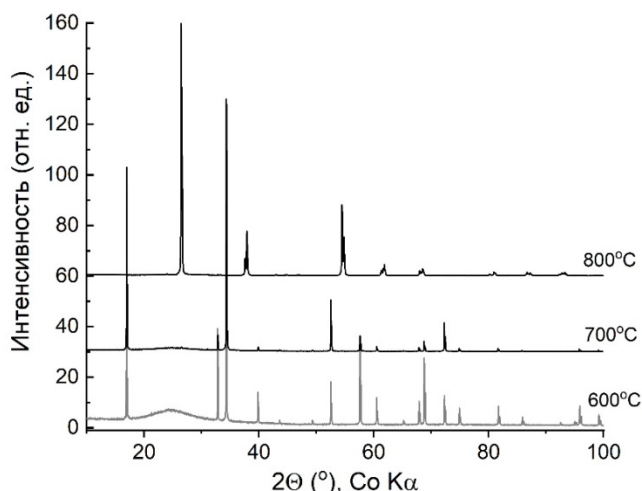


Рис. 1. XRD новообразованных фаз в опытах при 800-900°C, давлении 2 кбар, Ni-NiO буфере в 1.0 *mNaF*.

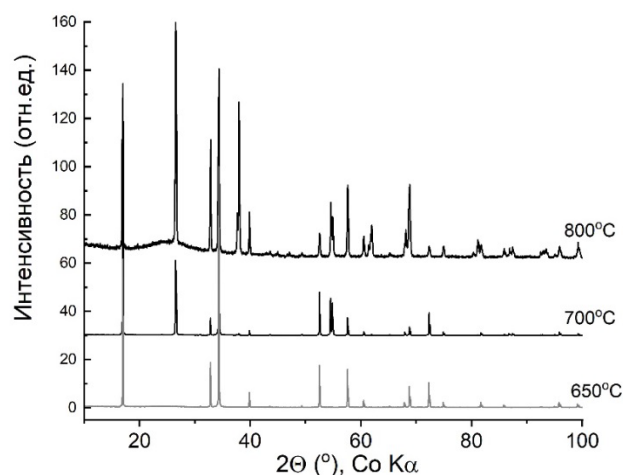


Рис. 2. XRD новообразованных фаз в опытах при 650-800°C, давлении 2 кбар, Co-CoO буфере в 1.0 *mNaF*.

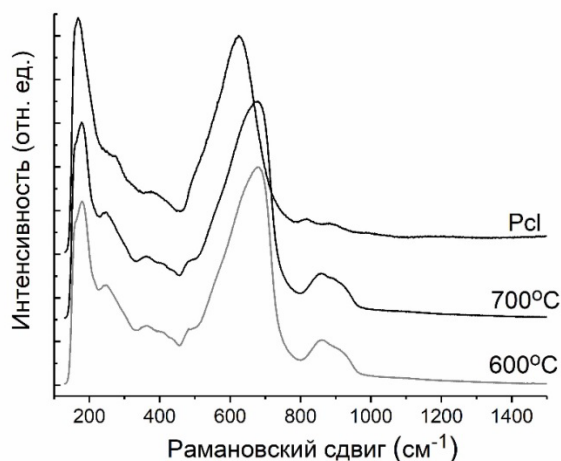


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния Pcl и продуктов опытов по растворимости Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при 600 и 700°C, 200 МПа, 1.0 *mNaF*, Ni-NiO буфере.

Продукты опытов были исследованы методом рамановской спектроскопии. Пироклороподобные фазы из опытов при 600 и 700°C (рис. 3) имели спектры аналогичные пироклору (Pcl) состава CaNaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>F с заметным сдвигом основных частот ввиду разного состава анализируемых кристаллов.

КР спектры перовскитоподобных кристаллов, полученные при 800 °С, сильно отличались от спектра Pcl.

Таким образом, установлено, что увеличение  $fH_2$  стабилизирует устойчивость перовскитовой структуры, тогда как падение общего давления способствует образованию  $Fd\bar{3}m$  структуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Минобрнауки России № проекта 13.1902.24.44, № соглашения 075-15-2024-641, тем НИР ИЭМ РАН FMUF-2022-0002 и FMUF-2022-0003.*

### Литература

1. Аксюк А.М. Экспериментально-обоснованные геофториметры и режим фтора в гранитных флюидах // Петрология. 2002. Т. 10. № 6. С. 628-642.
2. Зарайский Г.П., Чевычелов В.Ю., Аксюк А.М., и др. Экспериментальное обоснование физико-химической модели образования месторождений тантала, связанных с литий-фтористыми гранитами // Экспериментальные исследования эндогенных процессов. Памяти акад. В.А. Жарикова. Черноголовка: Ред.-изд. отд. ИПХФ РАН, 2008. С. 86–109.
3. Котова Н.П. Экспериментальное исследование влияния температуры на растворимость оксида ниобия в растворах NaF и LiF // Труды ВЕСЭМПГ-2017. М: ГЕОХИ РАН. 2017. С. 134-135.
4. Redkin A.F., Kotova N.P., Nekrasov A.N. Features of the interaction of NaF with niobium oxide compounds in hydrothermal solutions // Experiment in Geosciences. 2025. V. 31. No. 1. P. 98-100.

### EFFECT OF T-P- $fO_2$ ON THE STRUCTURE OF NIOBIUM AND SODIUM OXIFLUORIDE PHASES IN HYDROTHERMAL SOLUTIONS

**Redkin A.F., Kotova N.P., Nekrasov A.N., Drozhzhina N.A.**

Institute of experimental mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka,  
[redkin@iem.ac.ru](mailto:redkin@iem.ac.ru); [kotova@iem.ac.ru](mailto:kotova@iem.ac.ru); [alex@iem.ac.ru](mailto:alex@iem.ac.ru); [nadron@mail.ru](mailto:nadron@mail.ru)

The interaction of  $Nb_2O_5$  with NaF solutions at 600–800 °С, and a pressure of 200 MPa, in a reducing environment (Ni-NiO, Co-CoO) leads to the formation of Na-Nb oxifluorides. It has been established that an increase in  $H_2$  fugacity stabilizes the perovskite structure, while a decrease in total pressure promotes the formation of the pyrochlore  $Fd\bar{3}m$  structure.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА МАКРО- И МИКРОУРОВНЯХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КАМЕННЫХ ЛАВИН

<sup>1</sup>Родкин М.В., <sup>2</sup>Стром А.Л., <sup>3</sup>Цельмович В.А.

<sup>1</sup>ИТПЗ РАН, Россия, [rodkin@mitp.ru](mailto:rodkin@mitp.ru)

<sup>2</sup>РГГРУ (МГРИ), Москва, Россия [strom.alexandr@yandex.ru](mailto:strom.alexandr@yandex.ru)

<sup>3</sup>ГО «Борок» ИФЗ РАН. Россия, [tseim@mail.ru](mailto:tseim@mail.ru)

**Введение.** Каменные лавины (КЛ) формируются в породах разного состава и генезиса и описаны почти во всех горных странах. Это оползни течения, трансформирующиеся из крупных скальных оползней, обычно при превышении порогового объема в  $1 \times 10^6 \text{ м}^3$ , и характеризующиеся исключительно высокой подвижностью. Перемещаясь со скоростью до нескольких сотен км/час, они могут проходить расстояние до 10 и более километров, покрывая площадь в десятки квадратных километров у подножий высоких горных склонов.

Установлено, что подвижность КЛ, характеризуемая т.н. «эффективным коэффициентом трения» – отношением высоты обрушения к пройденному (в плане) расстоянию, возрастает с ростом объема, что противоречит закону Кулона, согласно которому с ростом массы (и мощности) перемещающегося тела следовало бы ожидать увеличения коэффициента трения. Очевидно, что при формировании и движении КЛ действуют иные механизмы, обуславливающие их аномально высокую подвижность [Eisermann, Abele, 1999; Адушкин, 2019; Hergarten, 2024].

**Объект и методы исследования.** Особенности строения отложений КЛ, позволяющие понять природу их аномально высокой подвижности, обычно изучаются на макроуровне – в обнажениях, на космических и аэрофотоснимках. Предлагаемая статья представляет собой одну из первых попыток исследовать эти особенности также и на микроуровне, с применением СЭМ Tescan Vega II с ЭДС.

**Результаты. Обсуждение и выводы.** Как установлено на многочисленных примерах, характерными особенностями КЛ, наряду с их высокой подвижностью, является двухчленное строение их отложений и отсутствие перемешивания материала, вследствие чего движение КЛ можно рассматривать, как ламинарное течение сухих обломочных потоков. В разрезе отложений КЛ всегда выделяется относительно маломощная панцирная фация, размеры обломков в которой соответствуют блочности исходного массива скальных грунтов, и подстилающая её основная фация, сложенная сильно раздробленными породами, состоящими из обломков размером обычно не более 10-20 см, в заполнителе, раздробленном вплоть до микронных и даже наночастиц. Иногда, в основании глубоко промытых тел, удается выделить также базальную фацию с более высоким содержанием наиболее мелких фракций. Следует

отметить очень резкий переход от панцирной к основной фации, практически без сколько-нибудь выраженной переходной зоны.

В случаях, когда обрушившийся скальный массив сложен породами разного состава, их обломки в теле КЛ не смешиваются и образуют отчётливо различимые «слои» разного петрографического состава, а панцирная фация в этих случаях сложена крупными обломками пород, образующих только верхний «слой» [Strom, Abdrakhmatov, 2018].

Можно было бы предположить, что в процессе дробления при движении КЛ наиболее мелкие частицы будут «просыпаться» вниз, накапливаясь в основании движущегося тела, что могло бы влиять на его подвижность. При этом, для того чтобы накопление мелких фракций в основании КЛ за счет «просыпания» повлияло на механизм движения обломочных потоков огромного объема (от миллиона кубометров и выше), оно должно проявляться в достаточно большой степени, что должно было бы быть визуально различимо. Однако, при изучении ряда КЛ, в телах которых выделяются «слои» разного состава, (и, что важно, разного цвета) однозначно установлено, что визуально такое перемешивание не проявляется. Не подтвердилось это предположение и на микроскопическом уровне, при анализе химического состава отдельных частиц с использованием ЭДС. Единичные частицы иного химического состава, вплоть до природной латуни, обнаруженной в одном образце, могут быть обломками акцессорных минералов и, в любом случае, «не делают погоды».

Почему в процессе интенсивного разрушения горных пород, изначально характеризующихся достаточно крупной блочностью, наиболее мелкие частицы не «проваливаются вниз», в промежутки между более крупными фрагментами, при том, что движение КЛ сопровождается образованием огромных облаков пыли? Т.е. мельчайшие фракции активно выбрасываются вверх, в атмосферу.

Интенсивное дробление горных пород происходит при формировании обвалов, селевых потоков, каменных лавин. При этом в обвалах или селях дробление происходит в результате соударения обломков, которые сталкиваются между собой, с поверхностью склона или с бортами долины, разлетаются, снова сталкиваются, а формирующиеся отложения характеризуются высокой степенью перемешивания обломков разного состава.

Можно предположить, что в КЛ разрушение происходит в результате процессов, сходных с катаклизмом при динамометаморфизме, когда нарушается строение и происходит частичное раздробление минералов, зерна которых растрескиваются и дробятся. Так же и в теле КЛ, в условиях всестороннего сжатия, разрушение не сопровождается значительными относительными перемещениями обломков



минеральных зерен. По-видимому, оно происходит в результате пульсаций напряжённого состояния с образованием так называемых "силовых цепочек" (force chains) – чередования напряжений сжатия, превосходящих прочность пород, и их кратковременного сброса. При этом разрушенные частицы представляют собой мозаику обломков (Рис. 1), а крупных промежутков между фрагментами разрушающихся обломков, куда могли бы «проваливаться» мелкие фракции, просто не образуется.

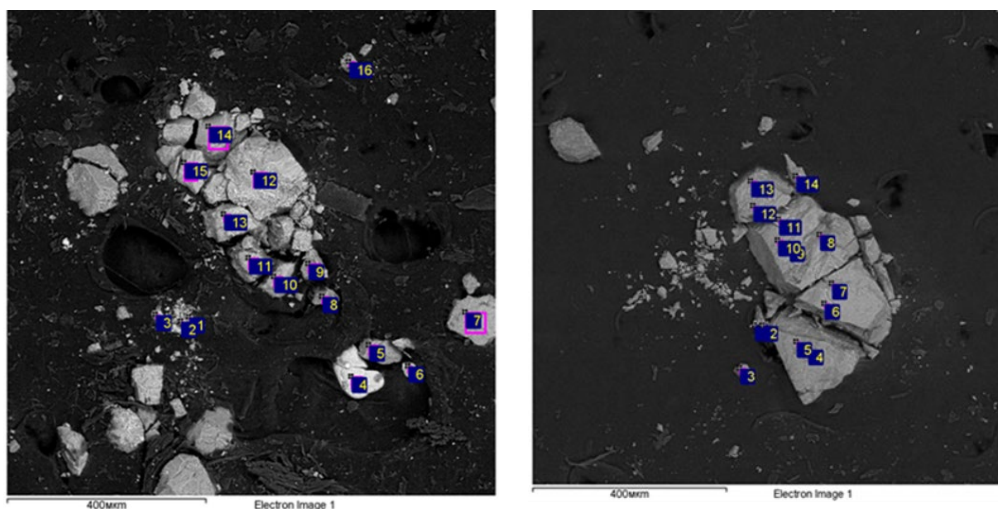


Рис. 1. Разрушенные частицы полевых шпатов, сохранившие мозаичную структуру. Образцы отобраны в нижней части основной фации Кокомеренской КЛ из сильно раздробленных гранитов.



Рис. 2. Растрескавшаяся глыба гранодиоритов на поверхности каменной лавины Сеит. Справа – увеличенный фрагмент.

Схожее явление наблюдается и на макроуровне. Так, среди крупно-глыбовой панцирной фации КЛ Сеит в Кыргызстане, сложенной глыбами гранодиоритов с размером обломков ~0.5-1.0 м, выделяются конические бугры, представляющие собой глыбы размером до 3-5 метров, сильно растрескавшиеся, но не развалившиеся (Рис. 2). Можно предположить, что эти глыбы, испытывавшие сильное сжатие, когда они находились в толще КЛ, были вытолкнуты на ее поверхность и при моментальном снятии внешней нагрузки, растрескались, но не развалились.



Проведенные примеры показывают, что при формировании КЛ, разрушение горных пород и на макро- и на микроуровнях по-видимому происходит сходным образом вследствие высокочастотных флуктуаций напряженного состояния с образованием силовых цепочек. Это явление, во многом схожее с катаклизмом при тектонических деформациях, приводит к разрушению горных пород, но не сопровождается значительными взаимными перемещениями отдельных фрагментов, что и обеспечивает интенсивное дробление при сохранении исходной макроструктуры массивов горных пород, вовлеченных в обрушение, и отсутствие перемешивания обломков разного состава. Выталкивание вверх отдельных крупных глыб происходит в локальных зонах растяжения в панцирной фации.

*Работа выполнена по госзаданию ИФЗ РАН и при частичной поддержке РНФ, грант № 25-47-00020.*

### **Литература**

1. Адушкин В.В. Обрушение горных склонов и образование дальнотрассовых каменных лавин при крупных подземных взрывах. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 6. С. 35-48
2. Erismann, T.H., Abele, G. Dynamics of Rockfalls and Rockslides. 1999. Springer, Heidelberg, 316 pp.
3. Hergarten, S. Scaling between volume and runout of rock avalanches explained by a modified Voellmy rheology, Earth Surf. Dynam., 2024, 12, 219–229, <https://doi.org/10.5194/esurf-12-219-2024>,.
4. Strom A., Abdrakhmatov K. Rockslides and rock avalanches of Central Asia: distribution, morphology, and internal structure. Elsevier, 2018. Netherlands, UK, USA. ISBN: 978-0-12-803204-6.

### **ABOUT PECULIARITIES OF THE MACRO- AND MICRO-SCALE ROCK FRAGMENTATION DURING ROCK AVALANCES' FORMATION**

**<sup>1</sup>Rodkin M.V., <sup>2</sup>Strom A.L., <sup>3</sup>Tselmovich V.A.**

<sup>1</sup>Institute of earthquake prediction theory and mathematical geophysics, RAS, Moscow, Russia, [rodkin@mitp.ru](mailto:rodkin@mitp.ru)

<sup>2</sup>Russian State University for Geological Prospecting. Moscow, Russia. [strom.alexandr@yandex.ru](mailto:strom.alexandr@yandex.ru)

<sup>3</sup>Geophysical Observatory "Borok" - branch of the IPE RAS, [tselm@mail.ru](mailto:tselm@mail.ru)

Rock avalanches formation is associated with rock crushing both at macro- and micro-scales, most likely due to high-frequency variation of the stress state and force chains formation. It is similar to cataclasis during tectonic deformations that causes clasts crashing without significant relative displacements of fragments and, thus without debris mixing.

# ОБЗОР МАГМАТИЗМА, РУДООБРАЗОВАНИЯ, ТЕКТониКИ ОТДЕЛЬНЫХ ЗОН ПАМИРА: НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА

<sup>1</sup>Романько А.Е., <sup>2</sup>Малых М.М., <sup>2</sup>Минаев В.Е., <sup>3</sup>Имамвердиев Н.А.,  
<sup>4</sup>Криночкина О.К., <sup>5</sup>Новиков В.П., <sup>6</sup>Викентьев И.В., <sup>1</sup>Савичев А.Т.,  
<sup>1</sup>Полещук А.В., <sup>7</sup>Хейдари М.

<sup>1</sup>Геологический институт (ГИН) РАН, Москва, [a-romanko@ya.ru](mailto:a-romanko@ya.ru);

<sup>2</sup>ТПСЭ, Мингео, Душанбе, Таджикистан, [mmimal957@gmail.com](mailto:mmimal957@gmail.com);

<sup>3</sup>Бакинский Государственный университет (БГУ), Баку, Азербайджан, [inazim17@yahoo.com](mailto:inazim17@yahoo.com);

<sup>4</sup>МГСУ, Москва, [vdovinaok@mail.ru](mailto:vdovinaok@mail.ru);

<sup>5</sup>ИГ АН, Душанбе, Таджикистан, [vp\\_novikov@mail.ru](mailto:vp_novikov@mail.ru);

<sup>6</sup>Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва, [viken@igem.ru](mailto:viken@igem.ru);

<sup>7</sup>Университет Исфохана, Иран, [mehrdad.hei@gmail.com](mailto:mehrdad.hei@gmail.com)

Мы представляем некоторые имеющиеся и новые материалы по Памиру. Памир (мощность земной коры до 75км и, видимо – более; обнажения - до 5км по вертикали! - Баратов,1984, МГК, Москва) чрезвычайно интересен, несмотря на сомнительную пока рентабельность его минерализации вообще [Владимиров и др. 1992; Новиков и др.1992; Malykh et al.,1996 и мн.др., рис.1]. Особое внимание уделено зонам: **Южный Памир**: Аличурский метаморфический комплекс (докембрий, гранулитовый метаморфизм **триаса**) и контактирующие с ним гранитоиды мезозоя (преимущественно мел - К?), С. Памир (герциниды и вулканиты триаса), Ц.Памир–лейкограниты массива Раумид, 35 млн. лет (Pg2)–скрупулезно исследованный **В.Н. Волковым**. Некоторые общие выводы таковы:

**Триас (Т): исключительно мощная эндогенная активность:** Гранулитовый триасовый метаморфизм докембрийского аличурского комплекса (надежные независимые определения), основной магматизм С. Памира – зюрюзаминская свита и др., вулканиты ЮВ Памира, рифт? Рушано-Пшартской зоны Ц. Памира, глубинные щелочные породы предполагаемых трубок взрыва Гиссара и Зеравшана, Ю. Тянь-Шань, по О.К. Криночкиной и др.

**Неоген (N, особенно N2) – квартал (Q) - также мощная эндогенная активность** (высокая-до 200км мощность астеносферы на Памире, как предполагается) **и связанная с этим минерализация:** усиленный рост гор на Кавказе - Памире, по В.Г. Трифонову и др., лампроитоподобные редкие породы трубок взрыва (**K20 до 9.1 мас.%**), оз. Дункельдык и Карадонг, ЮВ Памир, **Pg-Q?** [Корсаков, 2011; Malykh et al.,1996; Romanko et al., 2025], «пост-меловые» (**Pg-N?**) дайки мафит-ультрамафитов в Аличурском метаморфическом комплексе, метасоматические самоцветы: корунды, кунциты (разновидности сподумена) полихромные турмалины и дравиты-разновидности того же турмалина (**бор - В**), м-е благородной шпинели Кухилал, **ЮЗ. Памир (N?)**; также метасоматические корунды, турмалины (**вновь бор – В**) и т.д.- оз. Ранкуль, Кукурт, **Ц.-В. Памир**, неоген (**N**) - К-Аг возраст, контакт

докембрия и перми-триаса; карбонатиты Ханнешин, **Афганистан, квартал (Q)**; предполагаемые карбонатиты Памира, известные - Саудовской Аравии; высоко-Са магматиты В. Ирана-свыше 1/3 мас.% СаО; вулканы Ирана: Дамаванд (щелочные вулканиты); Базман - Тафтан, а также Солтан, Пакистан (преимущественно известково-щелочные андезиты и дациты, а также поздние базальты Базмана), возраст всех четырех вулканов - **неоген-квартал (N-Q)**.

Средние и кислые магматиты региона, в целом, отвечают принятым аналогам [Коваленко, Ярмолюк и др., 1983; Лучицкий, 1985; Маракушев 1988; Русинов, 1985; Imamverdiyev et al., 2014; Solovova et al., 1996, Vikentev et al., 2004 и др.].

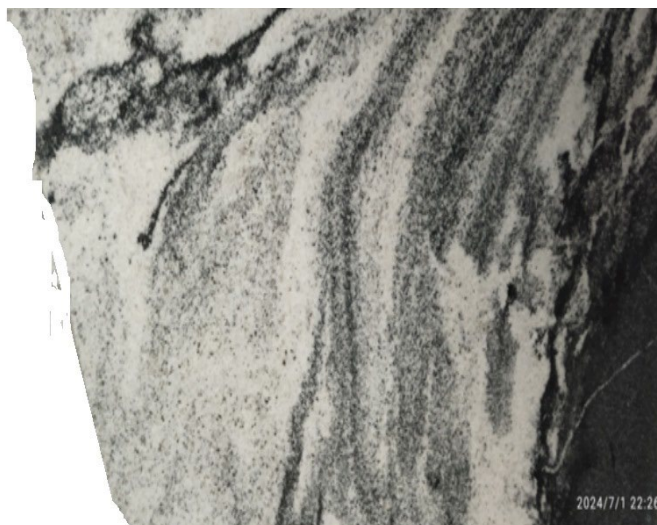


Рис.1. Аналогия тектонической схемы Западного Памира (справа-восток), Ю. Тянь-Шаня (Гиссарский хребет–слева вверх - северо-запад (СЗ)) и Таджикской (Таджикско-Афганской) впадины (слева, запад) в **природном образце** гнейса. Рисунок в пользу существования единого поля напряжения в кайнозое, своеобразная имитация моделирования.

**Краткий очерк** избранной металлогении Памира. 1/. **Бор (В)**: уникальное м-е **Ак-Архар** (сходное? с м-ем Тетюхе) эндогенного? бора - скарны на контакте с меловыми (**К**) **гранитоидами**. К20 в наших образцах гранитов варьирует: 4.3-8.1 мас.%, выделены и **Рг**-дайки диабазов - Ni до 240 г/т) - С. Аличурский хребет, Ю. Памир. **Рг**-дайки диабазов, возможно, также способствуют формированию залежей/вторичных залежей. Возраст бора не ясен.

2/. Вновь Бор (**В**) - турмалин (дравит) в Mg-скарнах в связи с гранулитовым региональным метаморфизмом (возможно Т), м-е шпинели Кухилал, ЮЗ. Памир; корунды и др. Рангуль, Ц-В. Памир. Бор предполагается также и из эвапоритов, что генетически важно.

3/. Попутный бор при превалирующем **серебре (Ag)** и подчиненном золоте (**Au**) – м-е Токузбулак, Ю. Памир, в связи с **мезозойскими (меловыми?) гранитоидами**. И здесь опять повышена концентрация **бора (В)** - «заражение» Ц.-Ю. Памира бором. Это говорит в пользу крупной, оформленной структуры в это

время (кайнозой) вместо разрозненных блоков. Осадочный бор мог быть использован активным плюмом.

**Золото (Au)** и в неогеновых конгломератах. Дарваз, С. Памир, **кайнозойская (KZ)** активизация способствовала минерализации?

**Литий (Li), олово (Sn)-м-е Трезубец и вольфрам (W)-м-е Икар** ассоциируют с осадочными S-гранитами мела? на Памире и в Гиндукуше, Афганистан.

Немوتря на то, что разделяют Памир на Западный и Восточный по предполагаемому разлому или серии разломов, некайнозойские структуры прослеживаются с запада на восток Памира, не реагируя на эти разломы явно. Например – палеозойские структуры Памира, мезозойские гранитоиды Ц. и Ю. Памира. Это разделение на Западный и Восточный Памир, вероятно, справедливо для кайнозоя.

Нами выделены местные краткие циклы активности эндогенного режима: 1 = **максимум** активности – и последующий 2 = **спад** активности: карбон (C) - максимум активности, а пермь (P) - спад активности. Затем: триас (T) – максимум активности – юра (J) минимум; мел (K) – максимум – палеоген (Pg) минимум. Для неогена (N) и продолжающегося квартера (Q) ситуация не очевидна. Некоторые материалы нуждаются в подтверждении, имея ввиду прежние **пионерские отечественные** работы. Общая металлогения Памира не противоречит коллизионной тектонике и соответствующему магматизму как ее индикатору.

**Совместный** анализ магматизма, дегазации, тектоники и металлогении, несомненно, важен, в том числе - экономически.

Авторы очень благодарны **К.Т. Будановой†, В.Н. Волкову†, Е.Л. Романько†**, Э.Я. Левену, А.М. Месхит†, В.Г. Трифонову, В.Е. Минаеву, С.В. Руженцеву† и И.И. Пospelову†, многим памирским геологам, А.В. Корсакову, А.В. Гирнису, В.В. Ярмолюку, В.Л. Сывороткину, Е.О. Дубининой и А.С. Авдеенко, К.Н. Шатагину, С.Н. Бубнову и мн. др. за консультации, обсуждения, помощь и т.д.

*Исследование выполнено в рамках госзадания Геологического института РАН.*

### **Литература**

1. Владимиров А. Г., Малых М.М., Дронов В.И. и др. Индосинийский магматизм и геодинамика Южного Памира. Новосибирск: ОИГГМ. 1992. 229 с.
2. Корсаков А.В. Особенности минералообразующих процессов при метаморфизме сверхвысоких давлений. автореферат дис. доктора гмн: ИГМ СО РАН. Новосибирск, 2011. 32 с.
3. Луцицкий И.В. Палеовулканология. М.: Наука, 1985. 275 С.
4. Магматические горные породы. Средние и кислые породы. Ред. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В. М: Наука, 1983. 410 с.
5. Маракушев А.А. Петрогенезис. М.: Недра, 1988. 293 с.
6. Новиков В.П., Романько А.Е., Супрычев В.В, Салихов Ф.С. Позднепалеозойский вулканизм Северного Памира и вопросы геодинамики // Доклады АН. 1992. Т. 326. № 6. С. 1010-1013.

7. Imamverdiyev N.A., Romanko A., Abdullayeva Sh.F., Vikentev I., Prokofiev V., Savichev A., Heidari M., Rashidi B. L. Caucasus - E. Iran, Middle East: Some materials on geology and metallogeny, "hot" tectonics due to the African superplume activity, melt and fluid inclusions; and different data on hydrocarbons (HC - Oil-gas), and some problems. News of Baku State University. 2014. N 3. P. 113-136.
8. Malykh M., Romanko A., Savichev A., Imamverdiyev N. On a geology of the Alichur zone., S. Pamir. 30 IGC. Abstract volume. Beijing. China. 1996. P. 230.
9. Romanko A., Imamverdiyev N., Heidari M., Rashidi B., Malykh M., Vikentev I., Savichev A., Poleshchuk A. Intraplate Ca-rich and Ca-usual igneous rocks in Baluchestan, Iran associated with real carbonatites of Afghanistan, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May. 2025.
10. Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D. Inclusions of carbonate and silicate melts in minerals of alkali basaltoids from the east Pamirs. Petrology. V 4. N 4. 1996. P. 319-341.
11. Vikentev I.V., Yudovskaya M.A., Mokhov A.V., Kerzin A.L., Tsepin A.I. GOLD AND PGE IN MASSIVE SULFIDE ORE OF THE UZELGINSK DEPOSIT, SOUTHERN URALS, RUSSIA. Canadian Mineralogist. 2004. V. 42. P. 651-665.

#### A REVIEW OF MAGMATISM, TECTONICS AND METALLOGENY IN SEVERAL ZONES OF PAMIR AND SOME PROBLEMS OF JOINT ANALYSIS

<sup>1</sup>Romanko A.E., <sup>2</sup>Malykh M.M., <sup>2</sup>Minaev V.E., <sup>3</sup>Imamverdiyev N.A., <sup>4</sup>Krinochkina O.K., <sup>5</sup>Novikov V.P., <sup>6</sup>Vikentev I.V., <sup>1</sup>Savichev A.T., <sup>1</sup>Poleshchuk A.V., <sup>7</sup>Heidari M.

<sup>1</sup>Geological Institute RAS, Moscow, [a-romanko@ya.ru](mailto:a-romanko@ya.ru); <sup>2</sup>Tajik prospecting expedition, Ministry of Geology, Dushanbe, Tajikistan, [mmimal957@gmail.com](mailto:mmimal957@gmail.com); <sup>3</sup>Baku State University (BSU), Baku, Azerbaijan, [inazim17@yahoo.com](mailto:inazim17@yahoo.com); <sup>4</sup>Moscow State Building University, Moscow, [vdovinaok@mail.ru](mailto:vdovinaok@mail.ru); <sup>5</sup>Institute of Geology, Academy of Sciences, Dushanbe, Tajikistan, [vp\\_novikov@mail.ru](mailto:vp_novikov@mail.ru); <sup>6</sup>Institute of geology of ore deposits RAS, Moscow, [viken@igem.ru](mailto:viken@igem.ru); <sup>7</sup>Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran, [mehrdad.hei@gmail.com](mailto:mehrdad.hei@gmail.com)

Magmatic–tectonic–metallogenic correlation in several zones of **Pamir** is discussed. Strong magmatic activity in **Triassic (T)** was, ex.: basalts in N. Pamir; Rushan-Pshart rift, C. Pamir (P-T); strong granulite metamorphism in S. Pamir; deep alkaline basalts in Gissar - Zeravshan (S.Tien-Shan); basalts of SE. Pamir etc. Also, African superPlume affects this region in **N-Q**. Local activity cycles were revealed as: **Carboniferous-C** (maximal activity)-P (less activity), **T-J**, **K-Pg** and **N...?**



## ВНУТРЕННИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В НИЗКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**Салюков В.С., Вознесенский А.С.**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», (НИТУ МИСИС), [m1605021@edu.misis.ru](mailto:m1605021@edu.misis.ru)

Внутренние механические потери (ВМП) относятся к физическим свойствам горных пород, которые наряду с упругими, пластическими, прочностными свойствами должны учитываться в ряде расчетов и моделей [Liu, 2021], но которые не всегда оцениваются ввиду сложности их определения. Они имеют большое значение при оценке сейсмического действия землетрясений и горных ударов, промышленных взрывов, вибрационных источников на породные массивы вокруг выработок и на подземные сооружения [Pan, 2022]. В настоящее время для изучения ВМП в материалах известны два основных вида методов: резонансные и нерезонансные [Gade, 1995]. Также эти методы используются для оценки внутренних механических потерь в композитных материалах [Zhou, 2021] металлах и сплавах [Mochugovskiy, 2021]. Величина ВМП оценивается либо добротностью  $Q$ , либо коэффициентом потерь  $Q^{-1}$ .

Одной из моделей описывающей частотные зависимости механических потерь является Рэлеевская модель, которая учитывает две составляющие [Galvez, 2022]. Первая составляющая связана с вязким поглощением механической энергии, она характеризует рост потерь при увеличении частоты воздействия. Вторая составляющая характеризует их возрастание при уменьшении частоты. Указанные зависимости на практике устанавливаются различными методами. Если первая составляющая, характеризующая возрастание потерь с увеличением частоты, может быть исследована с помощью резонансного метода, то для установления закономерностей второй составляющей в большей степени подходит один из нерезонансных методов: регистрация деформаций и нагрузок на образцы с построением и анализом гистерезисных петель [Tang, 2014].

Целью данной работы является установление частотных зависимостей коэффициента потерь  $Q^{-1}$  в диапазоне от 0.003 Гц до 0.1 Гц при изгибе горных пород различных типов, обладающих индивидуальностью в зависимости от места происхождения, минерального состава, структуры и текстуры, что определяет новизну данных исследований. Также решается задача получения коэффициентов рэлеевской модели потерь для дальнейшей оценки ее применимости при компьютерном моделировании деформирования горных пород и массивов, распространения в них упругих волн.

В экспериментах использовались образцы габбро, мрамора, известняка и доломита в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 150x40x40 мм. Образцы циклически нагружались при

изгибе по трехточечной схеме на прессе в заданном режиме деформирования. Испытания проводились с использованием специально разработанного приспособления для циклических нагружений по рекомендациям ISRM, позволяющего минимизировать трение в опорах, а также измерять прогиб непосредственно на образцах. Нагрузка измерялась тензометрическим динамометром, а прогиб баки – LVDT–преобразователями.

Образцы нагружались по трехточечной схеме на прессе с заданной скоростью перемещений до первого пика, после происходило циклическое деформирование в заданном диапазоне перемещения рамы, затем происходило нагружения до второго пика и циклическое деформирование в следующем диапазоне перемещения рамы. Скорости перемещения рамы установки варьировались от 0.1 до 4 мм/мин. Частоты рассчитывались, исходя из фактического периода нагрузки – разгрузки при испытании образца. После этого для каждого цикла нагрузки – разгрузки на каждой скорости перемещения рамы были построены приведенные к началу координат петли гистерезиса. Коэффициент потерь оценивался по методу гистерезисной петли для каждого цикла в соответствии с ГОСТ Р 56801–2015. Для расчёта коэффициента потерь не использовались первые два цикла нагрузки–разгрузки каждого пика перемещения рамы, так как на них устанавливался стационарный режим для дальнейших циклов.

В процессе обработки результатов экспериментов коэффициенты потерь для каждого образца усреднялись на каждом пиковом перемещении рамы на каждой частоте нагрузки–разгрузки. После расчётов производилась аппроксимация зависимости коэффициента потерь  $Q^{-1}$  от частоты  $f$  методом наименьших квадратов в соответствии с Рэлеевской моделью потерь. После этого из аппроксимированных зависимостей были получены коэффициенты, характеризующие прямо и обратно пропорциональную зависимости потерь от частоты. Значения коэффициентов детерминации и вариации аппроксимированных зависимостей позволили сказать о соответствии полученных данных Рэлеевской модели.

Лучшая аппроксимация коэффициента потерь  $Q^{-1}$  от частоты в диапазоне от 0.003 до 0.1 Гц отмечена у известняка, а худшая у доломита, что, вероятно, является следствием большой трещиноватости образцов доломита и нагрузками вблизи предела прочности. Габбро и мрамор демонстрируют соответствие в промежутке между доломитом и известняком. Коэффициент детерминации у известняка, мрамора и габбро близок к 1. Коэффициент вариации образцов этих пород превышает 28.6% только для одного из образцов габбро, у остальных он значительно меньше. Определенные отличия эмпирических и аналитических зависимостей друг от друга могут быть обусловлены тем, что



рэлеевская модель описывает вязкие потери и не учитывает трение между поверхностями трещин.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00103, <https://rscf.ru/project/24-27-00103/>.*

## **Литература**

1. Liu Y., Dai F. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. No 5. Pp 1203–1230.
2. Pan Y., Wang C., Wang Y. Mechanical degradation mechanism of rock under seismic disturbance stress // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2022. Vol. 55. No. 4.
3. Zhou G., Jiang H., Liu C., Huang H., Wei L., and Meng Z. Effect of porous particle layer on damping capacity and storage modulus of AlSi30p/5052Al composites // Mater. Lett. 2021, 300.
4. Gade S., Zaveri K., Konstantin-Hansen H., Herlufsen H. Complex modulus and damping measurements using resonant and non-resonant methods // SAE Technical Papers. 1995.
5. Mochugovskiy A.G., Mikhaylovskaya A.V., Zadorognyy M.Y., Golovin I.S. Effect of heat treatment on the grain size control, superplasticity, internal friction, and mechanical properties of zirconium-bearing aluminum-based alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 856.
6. Galvez F., Sorrentino L., Dizhur, D., Ingham J. M. Damping considerations for rocking block dynamics using the discrete element method // Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2022, Vol. 51, No. 4.– P. 935–957.
7. Tang J., Fang B., Lan Y. Analysis of rock nonlinear deformation behavior with loading and unloading hysteresis effect. Shiyou Diqu Wuli Kantan/Oil // Geophysical Prospecting, 2014, Vol. 49, No. 6.– P. 1131–1137.

## **METHODS OF RESEARCH OF INTERNAL MECHANICAL LOSSES IN ROCKS IN THE LOW-FREQUENCY AREA OF IMPACTS**

**Salyukov V.S., Voznesenskii A.S.**

University of Science and Technology MISIS, (NUTS MISIS),  
[m1605021@edu.misis.ru](mailto:m1605021@edu.misis.ru)

Internal mechanical losses are of great importance in assessing the seismic action of earthquakes, industrial explosions, and vibration sources on rock massifs. Two main types of methods are known for studying internal mechanical losses  $Q^{-1}$  in materials: resonant and non-resonant methods. The purpose of this work is to study internal mechanical losses and their frequency dependencies in minerals rocks. Cyclic loading of gabbro, marble, limestone, and dolomite specimens was carried out. The dependence of the loss factor on frequency was obtained.

## К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ АЛМАЗОВ, ВОДЫ, ПРИРОДНОГО ГАЗА И НЕФТИ

**Сафронов А.Н.**

Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова (ИФА) РАН,  
Москва, [safronov\\_2003@mail.ru](mailto:safronov_2003@mail.ru)

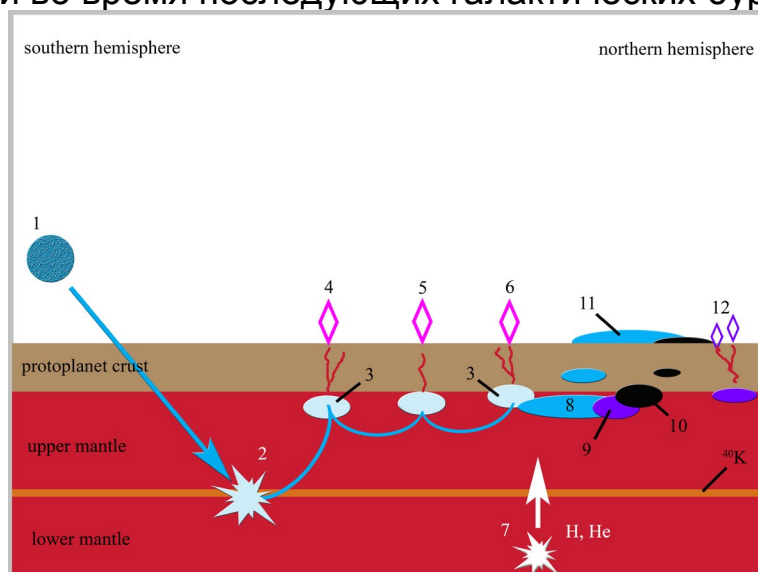
Цель данной работы [Safronov, 2025] – продолжить исследования, а также ознакомить широкую аудиторию читателей, включающую не только астрономов и астрофизиков, но и геологов, геофизиков и специалистов в области добычи алмазов, нефти и газа, с ранее полученными результатами [Safronov, 2016] и [Safronov, 2023]. Показано, что алмазы, вода, нефть и природный газ на Земле образовались в результате теплового ядерного взрыва после столкновения кометы с поверхностью протопланеты под скользящим углом. Следует отметить, что разработанная концепция кометного происхождения алмазов, нефти и газа также дает теоретическую основу для поиска новых месторождений алмазов, нефти и природного газа. Успех разработанной концепции был обусловлен совместным применением достижений астрофизики, геофизики и ядерной физики. Гипотеза, предложенная автором, является единственной, объясняющей преобладание месторождений алмазов в Южном полушарии и месторождений нефти и газа в Северном полушарии. В ходе проведенного исследования также было объяснено, почему пространственное распределение месторождений алмазов образует ярко выраженные линейные или кольцевые пространственные скопления. В данной работе выделены два типа месторождений алмазов и четыре типа месторождений газа и нефти. Уточнены рекомендации по поиску этих месторождений.

Автор выделил два типа месторождений алмазов.

*d1.* Первый тип алмазных месторождений — это месторождения, которые в основном расположены в Южном полушарии, в Южной Африке, Индии, Антарктиде и Южной Америке. В этих месторождениях алмазы образовались в результате взрыва самой кометы, то есть до взрыва ядерных слоев Th–U и образования изотопов H, He. Поскольку эти алмазы образуются до синтеза воды, метана и нефти, такие алмазы можно охарактеризовать как «сухие» или «кометные» алмазы.

*d2.* Второй тип алмазов — это алмазы, которые образовались после взрыва нижележащих слоев Th–U. По мнению автора, этот тип алмазов образуется из смеси углекислого газа и метана. Эти алмазы, которые в основном добываются в Северном полушарии, имеют меньшие размеры и могут содержать различные примеси, включая воду, редкоземельные и трансурановые элементы.

Также было выделено четыре основных типа нефтяных и газовых месторождений (*p1–p4*). Показано, что нефтяные месторождения образуются не только сразу после столкновения с кометой, но и во время последующих галактических бурь.



**Рис. 1.** Схема, иллюстрирующая процесс образования алмазов в Южном полушарии Земли и залежей нефти и газа в Северном полушарии. (1) – столкновение кометы с протопланетой Земля. Комета падает на поверхность протопланеты под скользящим углом; (2) – первичный взрыв кометы после удара о ядерный слой  $^{40}\text{K}$ ; (3) – скачкообразное движение плазменного облака, образованного продуктами кометы, такими как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{C}$ ; (4–5–6) – месторождения алмазов. Регулярное расположение месторождений алмазов происходит за счет линейного и скачкообразного движения кометных дерби; (7) – вторичный глубинный взрыв внутренних ядерных слоев протопланеты с выделением большого количества различных изотопов водорода  $\text{H}$ ,  $\text{H}_2$  и гелия ( $\text{He}$ ), созданием Земли и отделением Луны; (8) – синтез воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ); (9) – образование залежей метана ( $\text{CH}_4$ ); (10) – образование нефтяных месторождений; (11) – выброс воды и нефти на поверхность уже существующей планеты Земля; (12) – образование вторичного типа алмазов из паров метана в Северном полушарии.

**p1.** Первый тип нефтяных месторождений — это глубинные месторождения нефти и газа, которые являются результатами взаимодействия фрагментов кометы с водородом, образовавшимся в земных ядерных слоях Th-U;

**p2.** Второй тип месторождений — это осадочные месторождения, образовавшиеся в результате выдавливания нефти на поверхность во время сжатия галактического шторма и рассеивания течениями мелководных морей, также образовавшихся во время этих галактических бурь;

**p3.** Третий тип нефтяных месторождений — это субдукционные месторождения нефти и газа, которые образовались в результате того, что магматические течения во время галактических бурь вынесли часть глубинных нефтяных залежей в зону субдукционной ловушки;

**p4.** Четвертый тип месторождений соответствует нефтяным и газовым месторождениям в открытом море. Месторождения этого типа расположены вдали от краев старых континентов. Эти месторождения, как и месторождения предыдущего типа, были

вынесены магматическими потоками, но на своем пути они не встретили субдукционных ловушек.

Напомним, что на основе обобщения теории плавучести было установлено, что слой  $^{40}\text{K}$  является ключевым фактором, влияющим на жидко–капельное отделение Луны от Земли, формирование моноконтинента Родиния, синтез алмазов, воды, нефти и газа. Данный  $^{40}\text{K}$  слой также играет ключевую роль в понимании процессов субдукции и дрейфа континентов, а также является теоретической основой современной сейсмологии и вулканологии. Процесс образования алмазов, воды, природного газа и нефти схематически показан на рис. 1.

### **Литература**

1. Safronov A.N. The Basic Principles of Creation of Habitable Planets around Stars in the Milky Way Galaxy // International Journal of Astronomy and Astrophysics. 2016. V. 6, P. 512–554. DOI:10.4236/ijaa.2016.64039
2. Safronov A.N. Theory of the Origin of Terrestrial and Lunar Ores // International Journal of Geosciences. 2023. V. 14, P. 547-583. DOI:10.4236/ijg.2023.146030
3. Safronov A.N. A Few Notes Regarding Origin of Diamonds, Water, Natural Gas and Oil. // Open Journal of Geology, V.15, P. 309-330. DOI:10.4236/ojg.2025.156015

### **A FEW NOTES REGARDING ORIGIN OF DIAMONDS, WATER, NATURAL GAS AND OIL**

#### **Safronov A.N.**

Obukhov Institute of Atmospheric Physics (OIAP) RAS, Moscow,  
[safronov\\_2003@mail.ru](mailto:safronov_2003@mail.ru)

This study [Safronov, 2025] investigated the origin of water, natural gas and oil, as well as diamonds. It has been shown that diamonds, water, oil and natural gas on Earth were formed as a result of a thermal nuclear explosion following the collision of a comet with the surface of a protoplanet at a sliding angle. The hypothesis proposed by the author is the only one explaining the predominance of diamond deposits in the southern hemisphere and oil and gas deposits in the northern hemisphere. It was explained why the spatial distribution of diamond deposits forms pronounced linear or circular spatial clusters. Two types of diamond deposits and four types of gas and oil deposits were identified in this study. The recommendations for the search for these deposits have been specified.

## ПРОДУВКА РИОЛИТОВОЙ МАГМЫ CO<sub>2</sub> В НАЧАЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ – СХОЛАСТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

<sup>1</sup>Симакин А.Г., <sup>1</sup>Девятова В.Н., <sup>2</sup>Ширяев А.А.

<sup>1</sup>Институт Экспериментальной Минералогии РАН (ИЭМ РАН),  
Черноголовка

<sup>2</sup>Институт Физической Химии и Электрохимии им. Фрумкина РАН  
(ИФХЭ РАН), Москва, [simakin@iem.ac.ru](mailto:simakin@iem.ac.ru)

Объемы CO<sub>2</sub>, выделившиеся на некоторых базальтовых вулканах (Этна, Стромболи), значительно превышают пределы потенциальной транспортировки в растворенной форме в магме, что, несомненно, указывает на продувку CO<sub>2</sub> из глубинных коровых и мантийных источников. Подобная продувка для кислых магматических систем не столь очевидна. Мы проанализировали опубликованные данные по относительно компактному эксплозивному извержению Йеллоустоуна, непосредственно предшествовавшему извержению HRT-A [Myers et al., 2024]. Содержание Li во включениях расплава в кварце из двухметрового слоя пирокластики показало изменчивую ковариацию с концентрациями H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. В нижней части слоя установлена сильная положительная корреляция Li с CO<sub>2</sub>. Верхняя часть слоя показывает сильную отрицательную корреляцию с CO<sub>2</sub>. В промежуточной части слоя значимой корреляции с CO<sub>2</sub> не наблюдается. Мы предполагаем, что в начале извержения ювенильный CO<sub>2</sub> проник в нижний слой, который стал гравитационно нестабильным и поднялся, создав избыточное давление. Извержение началось из обезвоженной нижней части магмы, которая характеризуется РВ в кварце с сильной положительной корреляцией между Li, принесенным флюидом, и CO<sub>2</sub>.

В момент, близкий к завершению извержения, часть магмы, подвергшейся само-продувке флюидом, обогащенным углекислым газом, выделившимся во время извержения в магматической камере, была выброшена и накоплена вверху разреза. Изначально этот слой магмы был беден углекислым газом из-за длительной фракционной кристаллизации, а во время извержения он был сильно дегидратирован и одновременно обеднен литием, что обеспечило сильную отрицательную корреляцию Li-CO<sub>2</sub>.



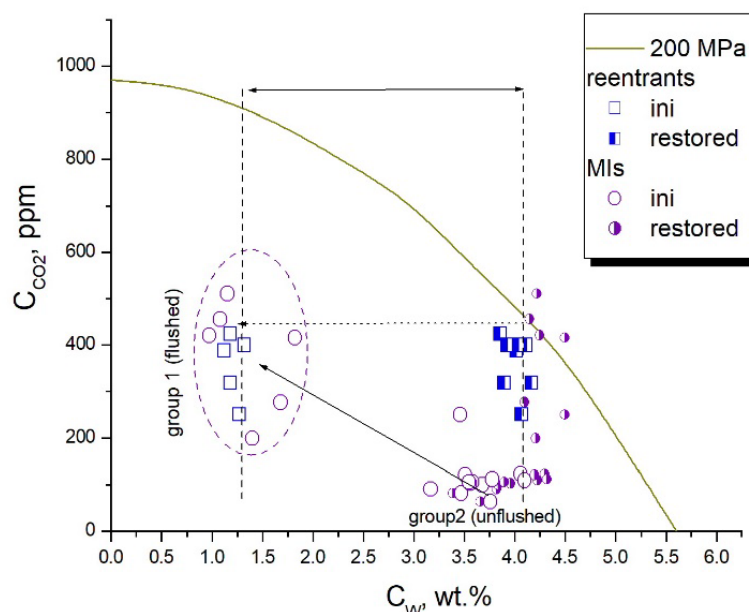


Рис.1 Составы заливов и расплавных включений в кварце из прикровельного слоя магмы, подвергнутого само-продувке богатым CO<sub>2</sub> флюидом в ходе всего извержения, предшествовавшего HRT-A, Йеллоустон (построено по данным supplementary materials [Myers et al., 2016]). Максимальная потеря воды в заливах на 3-3.5 мас.% сопровождалась диффузионной потерей воды в части включений примерно на 1 мас.% за несколько суток извержения.

Наш численный анализ показал, что пузырьки CO<sub>2</sub> дегидратируют риолитовый расплав в течение десяти минут – первых часов при достаточно высокой объемной доле флюида, в то время как расплав мало обогащается CO<sub>2</sub>, коэффициент диффузии которого в 6-20 раз меньше. Это подтверждают наши экспериментальные данные [Simakin et al., 2023]. Расплавные заливы кварца с верхней части разреза, демонстрирует экстремальную потерю воды – с примерно 4-4,5 мас.% до 1 мас.% – при переменном обогащении CO<sub>2</sub>. Мы приписываем это эффективной продувке флюидом, обогащенным CO<sub>2</sub>. С помощью численного моделирования был уточнен метод оценки времени диффузии, используя данные о снижении максимального содержания воды в заливах и в РВ в кварце. Для образцов из прикровельных областей этот метод даёт продолжительность извержения в несколько дней, в то время как подъём магмы к поверхности оценивается в первые часы. Относительно небольшой объём извержения, предшествовавшего HRT-A, и участие единого источника магмы облегчают выявление контрастного распределения летучих по глубине и различных механизмов

дегазации. Эти особенности могут быть упущены при изучении крупных климатических извержений из-за многих дискретных источников магмы и проблем с репрезентативным отбором проб на больших объёмах пород и площадях.

*Работа выполнена при поддержке за счет средств, выделяемых из бюджета на исследования, ведущиеся в рамках темы Государственного задания ИЭМ РАН FMUF-2022-0004*

## **Литература**

1. M.L. Myers, P.J. Wallace, C.J.N. Wilson, B.K. Morter, E.J. Swallow (2016) Prolonged ascent and episodic venting of discrete magma batches at the onset of the Huckleberry Ridge supereruption, Yellowstone. *Earth and Planetary Science Letters*. 451, 285-297.
2. A.G. Simakin, V.N. Devyatova, and A.A. Shiryayev (2023) Theoretical and Experimental Modeling of Local Scale CO<sub>2</sub> Flushing of Hydrous Rhyolitic Magma. *Russian Journal of Earth Sciences*. 23(6), ES6007.

## **FLUXING WITH CO<sub>2</sub> OF RHYOLITIC MAGMA AT THE BEGINNING OF AN ERUPTION – SCHOLASTIC CONCEPT OR REALITY?**

**<sup>1</sup>Simakin A.G., <sup>1</sup>Devyatova V.N., <sup>2</sup>Shiryayev A.A.**

<sup>1</sup>Institute of Experimental Mineralogy of the Russian Academy of Sciences (IEM RAS), Chernogolovka

<sup>2</sup>Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, Moscow (IPCE RAS), [simakin@iem.ac.ru](mailto:simakin@iem.ac.ru)

Accumulation of analytical data obtained by modern methods on the composition of melt inclusions and embayments in quartz from pyroclastics of climatic rhyolitic eruptions allows a detailed analysis of the activity of supervolcanoes. Based on published data on the Yellowstone eruption preceding HRT-A, as well as our numerical analysis and experimental data, manifestations of flushing of bottom magma with juvenile CO<sub>2</sub> at the beginning of the eruption and long-term self-flushing of the roof magma by CO<sub>2</sub>-rich fluid were established.



## U-Pb ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА АНДРАДИТА КОРКОДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

<sup>1</sup>Стифеева М.В., <sup>1</sup>Сальникова Е.Б., <sup>2</sup>Макеев А.Б., <sup>3</sup>Терехов Е.Н.

<sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия (ИГГД) РАН, Санкт-Петербург, [stifeeva.maria@yandex.ru](mailto:stifeeva.maria@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва, [abmakeev@mail.ru](mailto:abmakeev@mail.ru)

<sup>3</sup>Геологический институт (ГИН) РАН, Москва

На Урале, в пределах его Среднего и Полярного сегментов, известно несколько месторождений ювелирного граната – демантоида зеленого цвета, а также топазолита желтого и коричневого цветов, приуроченных к зонам серпентинитового меланжа и к внешним тектоническим контактам ультрабазитовых массивов. Его добывают несколько мелких артелей из россыпей и коренных месторождений на протяжении уже более 150 лет, затем облагораживают, нагревая до температуры более 850°C в восстановительных условиях, при этом гранат приобретает ярко-изумрудно-зеленую окраску. Такой ювелирный камень имеет большую ценность сопоставимую с изумрудом. Гранат локализован в магнетит-брусит-талек-антигоритовых, магнетит-талек-β-лизардит-хризотилитовых серпентинитах и его образование связывают с этапом контактового метаморфизма. Результаты U-Pb геохронологических исследований этого минерала позволяют оценить возраст этапа прогрессивного метаморфизма и возможно внедрения ультрабазитовых массивов в породы рамы. Предварительные результаты изучения нами уральских демантоидов и условий их локализации приведены в [Макеев, Терехов, 2024].

U-Pb геохронологическое исследование (ID-TIMS) проведены в лаборатории изотопной геологии ИГГД РАН по методике, изложенной в работе [Stifeeva et al., 2023]. Для изучения было отобрано шесть микро навесок граната различных по цвету: четыре образца изумрудно-зелёного цвета (демантид) и две навески фрагментов кристаллов жёлтого и коричневого (топазолит) цветов. Установлено, что содержание урана в демантиде изменяется в пределах 1.37 – 6.62 мкг/г, содержание урана в топазолите 0.51 мкг/г и 1.79 мкг/г соответственно (Таблица). Доля обыкновенного свинца ( $Pb_c$ ) резко отличается для различных по цвету гранатов: ярко-зелёные фрагменты демантида характеризуются относительно высоким отношением  $Pb_c/Pb_t$  (0.46 – 0.68). Коричневые фрагменты топазолита демонстрируют относительно невысокое содержание обыкновенного свинца (0.32), а желтый топазолит наиболее радиогенный и характеризуется низкой долей  $Pb_c$  (0.06). Точки

изотопного состава демантоид-топазолитового граната из Коркодинского месторождения образуют дискордию (Рисунок), с верхним её пересечением  $307 \pm 13$  млн лет (СКВО = 0.71).

Таблица. Результаты U-Pb геохронологических исследований демантоида из Коркодинского месторождения

| №<br>п/п | Навес<br>ка, мг | Pb,<br>мкг/г | U,<br>мкг/г | Изотопные отношения               |                                     |                                  |                                  |      | Возраст, млн лет                 |                                  |                                   |
|----------|-----------------|--------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|          |                 |              |             | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | Rho  | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |
| 1        | 1.50            | 0.15         | 1.37        | 41.52                             | $0.0530 \pm 13$                     | $0.2714 \pm 75$                  | $0.0371 \pm 4$                   | 0.50 | $244 \pm 7$                      | $235 \pm 3$                      | $330 \pm 55$                      |
| 2        | 1.43            | 0.24         | 2.93        | 17.24                             | $0.0526 \pm 4$                      | $0.3243 \pm 35$                  | $0.0447 \pm 2$                   | 0.60 | $285 \pm 3$                      | $282 \pm 2$                      | $311 \pm 20$                      |
| 3        | 2.33            | 0.16         | 1.38        | 51.17                             | $0.0523 \pm 5$                      | $0.3148 \pm 41$                  | $0.0436 \pm 4$                   | 0.74 | $278 \pm 4$                      | $275 \pm 3$                      | $300 \pm 20$                      |
| 4        | 0.95            | 0.83         | 6.62        | 64.34                             | $0.0524 \pm 4$                      | $0.3492 \pm 29$                  | $0.0483 \pm 2$                   | 0.49 | $304 \pm 2$                      | $304 \pm 1$                      | $395 \pm 17$                      |
| 5        | 3.51            | 0.11         | 1.79        | 119.5                             | $0.0526 \pm 3$                      | $0.3347 \pm 22$                  | $0.0462 \pm 1$                   | 0.49 | $293 \pm 2$                      | $291 \pm 1$                      | $311 \pm 13$                      |
| 6        | 7.35            | 0.52         | 0.51        | 57.28                             | $0.0530 \pm 6$                      | $0.3352 \pm 40$                  | $0.0458 \pm 2$                   | 0.43 | $294 \pm 3$                      | $289 \pm 1$                      | $331 \pm 24$                      |

Примечания: изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный Pb; Rho – коэффициент корреляции ошибок  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ; Величины ошибок ( $2\sigma$ ) соответствуют последним значащим цифрам после запятой

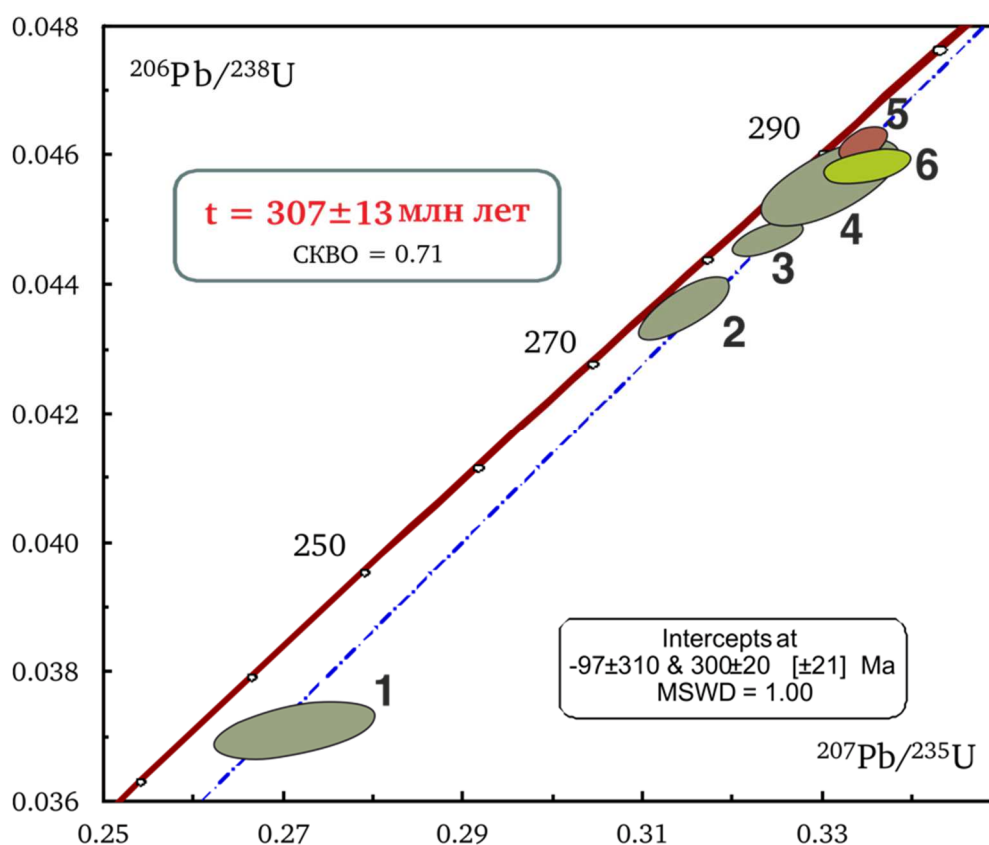


Рисунок. Диаграмма с конкордией для демантоид-топазолитового андрадита Коркодинского месторождения. Номера точек соответствуют порядковым номерам в таблице

U-Pb возраст андрадита-демантоида из Коркодинского месторождения ( $307 \pm 13$  млн лет) в пределах погрешности согласуется с возрастом кварцевых диоритов Суховязовской интрузии –  $316 \pm 5$  млн лет [Hatzel, Romer, 1999]. Мы полагаем, что именно эта небольшая интрузия кварцевых диоритов, расположенная на расстоянии 7 км от исследуемого месторождения демантоида, послужила источником термального воздействия на уже регрессивно серпентинизированные ультраосновные породы [Брянчанинова, Дубинина, Макеев, 2004]. В результате этого воздействия породы Коркодинского и соседнего Уфалейского массивов претерпели прогрессивный метаморфизм (хризотиловой фации), что привело к тому, что в аподунитовых серпентинитах произошла кристаллизация ювелирного граната демантоида и топазолита.

Ранее Е.С. Сорокиной с соавторами была получена U-Pb (LA-ICP-MS) оценка возраста граната из Коркодинского месторождения –  $343 \pm 4$  млн лет [Sorokina et al., 2023]. Расхождение в результатах геохронологических исследований может объясняться использованием различных по происхождению гранатов: вероятно, в предыдущей работе охарактеризованы малорадиогенные демантоиды, образование которых связано с более ранними процессами. Полученная нами оценка возраста ( $307 \pm 13$  млн лет) согласуется с известным возрастом Суховязовской интрузии кварцевых диоритов, расположенной в непосредственной близости с Коркодинским месторождением.

Установленный возраст граната-демантоида ( $\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) Коркодинского месторождения –  $307 \pm 13$  млн лет, который неразрывно входит в метаморфическую парагенетическую ассоциацию – And+Mag+Tlc+Chl+Spn ( $\beta$ -Liz+Hrz), следует считать возрастом прогрессивного этапа метаморфизма хризотиловой фации, проявившейся при прогреве ультраосновных пород под воздействием внедрения кварцевых диоритов расположенной рядом с Коркодинским месторождением Суховязовской интрузии и флюидов декомпрессионной природы. Прогрессивный метаморфизм (хризотиловой фации) с возрастом  $307 \pm 13$  млн лет, наложен на уже регрессивно серпентинизированные ультраосновные породы Коркодинского и Уфалейского массивов. В результате этого метаморфизма с участием кальциевого метасоматоза в аподунитовых серпентинитах произошла кристаллизация ювелирного граната демантоида и топазолита.

Геохронологические исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22–17–00211П.

## Литература

1. Макеев А.Б., Терехов Е.Н. Ювелирный демантоид (андрадит) из внешних зон метаморфизма ультрабазитовых массивов Среднего и Полярного Урала // Материалы XI Международной научной конференции молодых ученых «Молодые – Научкам о Земле». МГРИ. М. 2024. С. 319-323.
2. Hatzel R., Romer R. U-Pb dating of Verkhniy Ufaley intrusions, Middle Urals, Russia: a minimum age for subduction and amphibolite facies overprint of the east European continental margin // Geological magazine. 1999. 136.P. 593-597.
3. Брянцининова Н.И., Дубинина Е.О., Макеев А.Б. Геохимия изотопов водорода хромитонесущих ультрабазитов Урала // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 3. С. 392-396.
4. Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Arzamastsev A.A., Kotov A.B. and Grozdev V.Yu. Calcic Garnets as a Source of Information on the Age of Ultramafic Alkaline Intrusions in the Kola Magmatic Province // Petrology. 2020. V. 28. N 1. P. 62-72.
5. Sorokina E.S., Albert R., Botcharnikov R.E., et al. Origin of Uralian andradite (var. demantoid): Constraints from in situ U-Pb LA-ICP-MS dating and trace element analysis // Lithos. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107091>.

## U-Pb DETERMINATION OF THE AGE OF ANDRADITE OF THE KORKODINSKOYE DEPOSIT (MIDDLE URALS)

<sup>1</sup>Stifeeva M.V., <sup>1</sup>Salnikova E.B., <sup>2</sup>Makeyev A.B., <sup>3</sup>Terekhov E.N.

<sup>1</sup>Institute of Precambrian Geology and Geochronology (IGGD) RAS, Saint Petersburg

<sup>2</sup>Institute of Ore Deposits Geology (IGEM) RAS, Moscow

<sup>3</sup>Geological Institute (GIN) RAS, Moscow

The established age of the demantoid garnet ( $\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) of the Korkodinskoye deposit is  $307 \pm 13$  million years, which is inextricably included in the metamorphic paragenetic association – And+Mag+Tlc+Chl+Spn ( $\beta$ -Liz+Hrz), should be considered the age of the progressive stage of metamorphism of the chrysotile facies, manifested during the heating of ultrabasic rocks under the influence of the introduction of quartz diorites from the Sukhoviyazovskaya intrusion and decompression fluids located near the Korkodinskoye deposit.

## НАКОПЛЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ЗОНАХ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА В МОРСКОМ ДНЕ

**Суетнова Е.И.**

Институт физики Земли РАН Р(ИФЗ РАН), Москва,

[Elena\\_suetnova@mail.ru](mailto:Elena_suetnova@mail.ru)

Наблюдавшиеся в морском дне в некоторых регионах северных морей газовые гидраты приуроченные к грязевым вулканам ставят вопрос о влиянии процессов грязевого вулканизма на геофизические процессы в структуре дна приводящие к накоплению газовых гидратов в зонах глубоководного грязевого вулканизма где реализуются благоприятные термобарические условия для аккумуляции фильтрогенных газовых гидратов [Соловьёв 2001, Milkov 2000]

Основываясь на этих наблюдениях, можно предположить, что, в дополнение к вулканическому каналу газонасыщенный флюид просачивается на поверхность над протяженным слоем с аномально высоким поровым давлением на определенной глубине внутри осадочного слоя, который служит источником грязевулканической активности (резервуаром). Давление морской воды на поверхность морского дна создает условия для термобарической устойчивости гидратов в отложениях вблизи поверхности морского дна. В диапазоне глубин, где между извержениями грязевых вулканов соблюдаются условия термобарической стабильности газовых гидратов, накопление газовых гидратов определяется условиями фильтрации газонасыщенного флюида над резервуаром питания. На условия фильтрации помимо свойств среды влияет изменения давления в питающем резервуаре в соответствии с циклическостью извержений грязевого вулкана. Этот процесс накопления газовых гидратов в морском дне в зонах грязевого вулканизма можно описать моделированием системой дифференциальных уравнений в частных производных описывающей группу гидродинамических и термодинамических процессов в морском дне при циклической активности грязевого вулкана. Разработанная математическая модель описывает процесс фильтрации газонасыщенного флюида из грязевулканического резервуара через слой осадков с последующим осаждением газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности под поверхностью морского дна. Уравнения описывают скорость фильтрации газонасыщенного флюида из грязевулканического резервуара через слой осадков с последующим осаждением газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности под поверхностью морского дна. в пористой среде над

резервуаром питания грязевого вулкана в процессе между извержениями. Подобный механизм фильтрации может существовать в интервалах времени между извержениями грязевого вулкана которые потенциально приводят к изменению структуры дна и возможно разрушению газовых гидратов.

При извержении грязевого вулкана изменяется давление флюидов в резервуаре питания что оказывает влияние на скорости фильтрации газонасыщенного порового флюида над резервуаром и эволюция гидратонасыщенности происходит с другой скоростью, соответствующей скорости поступления газонасыщенного флюида в среду из за нового градиента давления газонасыщенного флюида. Скорость фильтрации описывается уравнением Дарси и при моделировании существенную роль играет проницаемость среды морского дна. Таким образом учет этих параметров процесса дает возможность оценить возможную гидратонасыщенность и её эволюцию в зонах глубоководных грязевых вулканов. Глубина зоны стабильности газовых гидратов определялась из термодинамических расчетов согласно [Milkov 2000, Tinivella 2012], Некоторые результаты вычислений, представленные ниже (рисунок 1) количественно показали как проницаемость среды дна сильно влияет на гидратонасыщенность в разные моменты времени истории процесса аккумуляции газовых гидратов в окрестности жерла между извержениями в морском дне

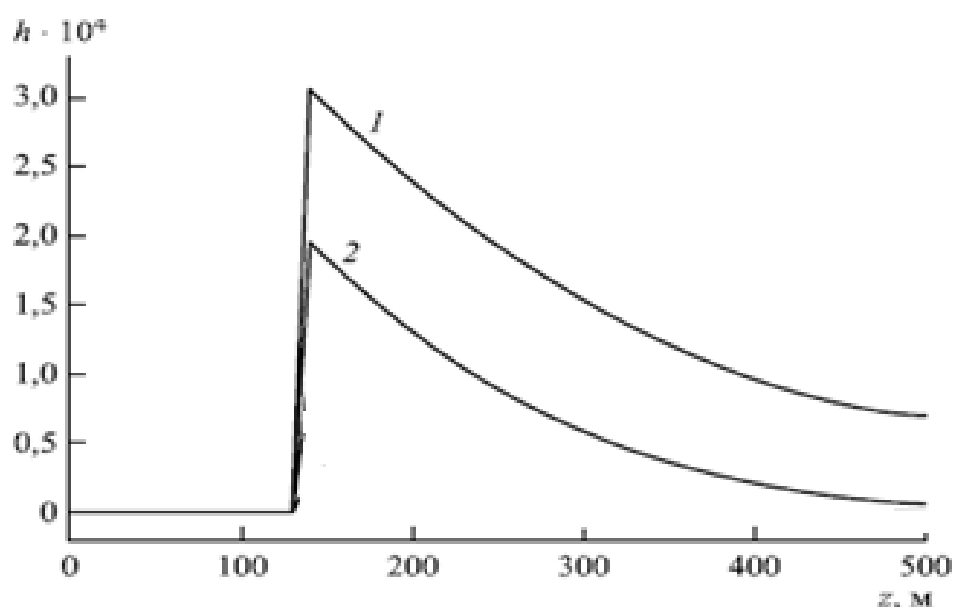


Рисунок 1 — Гидратонасыщенность через 1 год после начала фильтрации для различных значений проницаемости морских осадков (1) —  $k=10^{-13}\text{м}^2$ , (2) —  $k = 10^{-13.5}\text{м}^2$  . Глубина питающего резервуара - 500м. Фоновый градиент температуры принимался равным  $0.05^\circ\text{К м}^{-1}$ .

Моделирование показало что наблюдаемые различия в гидратонасыщенности участков морского дна, приуроченных к грязевулканическим структурам, определяются не только глубиной питающего резервуара, давления в нём и временем фильтрационного процесса газонасыщенного флюида, но и сильным влиянием флюидодинамических свойств среды,. Таким образом выявлено как проницаемость приповерхностного слоя морских осадков влияет на фильтрогенное накопление газовых гидратов в зонах грязевого вулканизма помимо различий в давлениях флюидов в зоне питающего резервуара вулкана после извержения грязевого вулкана и определяет различия объёмов накоплений газовых гидратов после извержений.

*Работа выполнена в рамках госзадания.*

### **Литература**

1. Соловьёв В.А. Газогидратоносность недр Мирового океана // Газовая промышленность. — 2001. — № 12. — С. 19–23.
2. Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates // Marine Geology. — 2000. — 167. — P. 29 – 42.
3. Tinivella, U. and Giustianiani, M., An overview of mud volcanoes associated to gas hydrate system, in “Updates in Volcanology – New Advances in Understanding Volcanic Systems,” // Earth Planet. Sci.. — 2012. — <https://doi.org/10.5772/51270>

## **ACCUMULATION AND EVOLUTION OF GAS HYDRATE ACCUMULATIONS IN THE ZONES OF MUD VOLCANISM IN THE SEAFLOOR**

**Suetnova E.I.**

Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,  
IPhZ RAS, Moscow, [Elena\\_suetnova@mail.ru](mailto:Elena_suetnova@mail.ru)

It was revealed how the permeability of the near-surface layer of marine sediments affects the filterogenic accumulation of gas hydrates in the zones of mud volcanism, in addition to the differences in fluid pressures in the zone of the feeding reservoir of the volcano after the eruption of the mud volcano, and determines the differences in the volume of accumulations of gas hydrates after eruptions



# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИТОФАЦИЙ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХНЕ-КОЛИКЪЕГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ГАММА-МЕТОДА

**Турышев В.В.**

ФБГОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ),  
г.Тюмень, [vvтурышев@yandex.ru](mailto:vvтурышев@yandex.ru)

В Западной Сибири ранее были выполнены работы по площадной фацальной дифференциации нижнемеловых и юрских отложений лабораторным спектральным гамма-методом (СГМ), охватывающие крупные стратиграфические единицы – ярусы. При этом на кросс-плотах была выявлена достаточно большая дисперсия данных, приводящая к перекрытию областей с различными фацальными условиями и затрудняющая однозначное разделение существовавших обстановок осадконакопления [Турышев, 2018; Турышев, 2019]. Осталась недостаточно изученной возможность идентификации литофаций по глубине, в пределах одного месторождения. Настоящая статья открывает серию таких исследований на территории Западно-Сибирской плиты; объектом изучения в данном случае является Верхне-Коликъеганское нефтегазоконденсатное месторождение.

Исследования были проведены на коллекции из 216 образцов горных пород юрского и нижнемелового возраста, взятых из разрезов разведочных и эксплуатационных скважин Верхне-Коликъеганского месторождения. Все образцы были изучены лабораторным гамма-спектральным методом на содержание радиоактивных элементов К, U и Th. Анализы выполнялись на однокристалльной гамма-спектрометрической установке института ЗапСибНИИГГ (г.Тюмень, Россия) с детектором NaJ(Tl) размерами 150 x 100 мм, с колодцем 65 x 60 мм, включавшей фотоумножитель типа ФЭУ-94, аппаратуру регистрации и защитный свинцовый блок. Время замера одного образца массой ~ 100 г составляло примерно 1 ч. Относительная погрешность определения калия составила 2.4, урана – 6.5, тория – 17.5 (%); порог чувствительности соответственно 1500, 0.78, 2.55 (г/т).

Рассмотренные материалы позволяют выделить в разрезе Верхне-Коликъеганского месторождения пять древних обстановок осадконакопления.

1. *Равнина низменная аккумулятивная*, сложенная отложениями позднего апта (пласт ПК<sub>19-21</sub>). 12 образцов аптских отложений представлены переслаиванием серого и темно-серого алевролита, темно-серым алевролитом крупнозернистым, светло-серым

мелкозернистым песчаником, глиной темно-серой с тонкими намывами алеврита.

2. *Равнина прибрежная, периодически заливавшаяся морем*, сложенная породами оксфорда (пласт ЮВ<sub>1</sub>) и байоса-бата (тюменская свита, пласты ЮВ<sub>2-3</sub>). 84 образца оксфордского возраста представлены семью песчаниками серыми, мелко-среднезернистыми однородными, а также большим количеством песчаников без дополнительного описания. Открытая пористость колеблется в пределах 12,6-21,4 (%), абсолютная проницаемость составляет 3,2-138,2 (мД). 68 образцов байос-батского возраста представлены песчаниками серыми мелкозернистыми алевритистыми, однородными, слабо нефтенасыщенными, алевролитами серыми, плотными, аргиллитами и переслаиванием аргиллитов с алевролитами. Открытая пористость составляет 2,8-19,8 (%), абсолютная проницаемость 4,7-93,8 (мД).

3. *Мелководная часть шельфа*. Сложена породами позднего валанжина (пласт БВ<sub>11</sub>). 30 образцов представлены песчаниками серыми, мелко-среднезернистыми, иногда глинистыми, с прослоями углисто-растительного детрита, и алевролитами мелкозернистыми глинистыми.

4. *Относительно глубоководная часть шельфа*. Состоит из пород берриаса-раннего валанжина (ачимовская пачка). 41 образец представлен песчаниками серыми мелкозернистыми алевритистыми и аргиллитами. Открытая пористость составляет 13,8-24,4 (%), абсолютная проницаемость 0,25-48,8 (мД).

5. *Море внутреннее, залив, озеро с пониженной соленостью*. Сложена породами готеривского века (пласт БВ<sub>1</sub>). 6 образцов представлены песчаниками, аргиллитами и алевролитом без дополнительного описания.

Анализ материалов показывает, что, во-первых, все пять выделенных фациальных комплексов сходны по литологической характеристике, и во-вторых, образцы песчаников количественно преобладают над остальными разновидностями осадочных пород. Поэтому было решено в дальнейшем использовать только образцы песчаников и алевролитов, как из-за их численного преимущества, так и с целью избежать влияния вещественного состава аргиллитов.

Окончательное выяснение возможностей лабораторного спектрального гамма-метода по идентификации литофаций Верхне-Коликъеганского месторождения производится методом кросс-плотов К, U и Th.

Наибольший интерес представляет сопоставление параметров К – Th (рис.1). На шкале распределения К равнина низменная аккумулятивная располагается в левой части графика, между

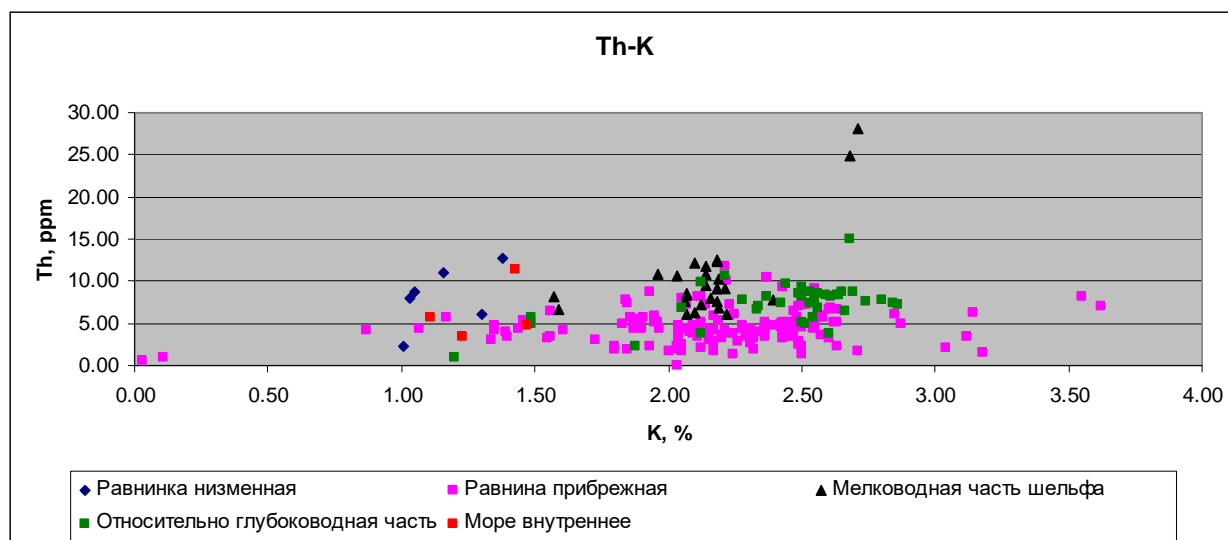


Рис.1. Кросс-плот Th-K

содержаниями калия 1 и 1.4 (%). На нее накладывается область моря внутреннего, заключенная в пределах 1-1,5 (%).

Правее, между значениями  $\approx 1,9-2,2$  (%) расположена область мелководного шельфа. Два образца песчаника из этой области обладают аномальными содержаниями всех трех радиоэлементов и смещены вправо-вверх. Открытая пористость их составляет 19 и 25 (%), поэтому причиной аномальности радиоактивных свойств не может быть увеличение глинистости. Вероятнее всего, это влияние тяжелых акцессорных минералов, являющихся концентраторами урана и тория в терригенных песчано-алевритовых породах. Повышенные значения калия, исходя из имеющихся данных, объяснить пока трудно.

Еще правее, между значениями 2,2-2,8 (%), расположена относительно глубоководная область шельфа.

Область равнины прибрежной, периодически заливавшейся морем, «растянута» по всей шкале содержания K от 0 до 3,7 (%).

## Выводы

1. В разрезе нижнемеловых и юрских отложений Верхне-Коликъеганского месторождения выделено пять древних обстановок осадконакопления: 1) равнина низменная аккумулятивная; 2) равнина прибрежная, периодически заливавшаяся морем; 3) мелководная часть шельфа; 4) относительно глубоководная часть шельфа; 5) внутреннее море, залив, озеро с пониженной соленостью.

2. С использованием электронного каталога радиогеохимических данных, путем анализа полученных на его основе табличных и графических материалов, в частности, кросс-плотов K, U и Th, установлены следующие критерии песчано-алевритовых пород для выделения в разрезе месторождения четырех фациальных областей: 1)  $K = 1-1.5$  (%), область отложений равнины низменной и моря внутреннего; 2)  $K=1.9-2.2$  (%), область отложений мелководной части шельфа и равнины прибрежной; 3)  $K=2.2-2.8$  (%), область отложений относительно глубоководной части шельфа; 4)  $Th < 6$  ppm, область отложений равнины прибрежной (преимущественно) и моря внутреннего.

3. Содержания калия возрастают в ряду «континентальные – прибрежно-морские – пелагические осадки» согласно модели А.С.Ронова и Ю.П.Гирина для отложений Русской платформы. Поведение тория на фациальной шкале контролируется в большей степени спецификой тектонического режима плиты и ее складчатых обрамлений. Уран повторяет особенности поведения тория на более низком уровне, что также говорит о его обусловленности тектонической обстановкой осадконакопления.

### **Литература**

1. Турышев В.В. Естественные радиоактивные элементы как индикаторы условий образования осадочных отложений Западно-Сибирской плиты // Геохимия. – 2018. – № 9. – С.883-894.
2. Турышев В.В. Изучение пород-коллекторов Западной Сибири гамма-спектрометрическим методом. – Тюмень: ТИУ. 2019. – 382 с.

### **IDENTIFICATION OF LITHOFACIES OF DEPOSITS OF THE VERKHNE-KOLIKYEGANSKOYE FIELD BASED ON THE SPECTRAL GAMMA METHOD**

**Turyshev V.V.**

Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, [vvturyshev@yandex.ru](mailto:vvturyshev@yandex.ru)

Based on laboratory data of the spectral gamma method, the possibility of identifying four facies regions in the section of the Verkhne-Kolikyeganskoye field has been demonstrated: 1)  $K = 1-1.5$  (%), the region of lowland plain and inland sea deposits; 2)  $K = 1.9-2.2$  (%), the region of shallow-water shelf and coastal plain deposits; 3)  $K = 2.2-2.8$  (%), the region of relatively deep-water shelf deposits; 4)  $Th < 6$  ppm, the region of coastal plain (mainly) and inland sea deposits.

# ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКОЛ С ИМИТАТОРАМИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОТРАБОТАВШЕНО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

<sup>1</sup>Уланова А.С., <sup>1</sup>Кроль И.М., <sup>1</sup>Комаров В. Б., <sup>2</sup>Стефановская О.И.,  
<sup>1</sup>Никольский М.С.

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, [mnickolsky@yandex.ru](mailto:mnickolsky@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина  
(ИФХЭ) РАН

Стеклокристаллические материалы в настоящее время предлагаются в качестве матриц для изоляции высокоактивных отходов отработавшего ядерного топлива [Ojovan M. I. & Yudinsev S. V., 2023]. Стеклянная часть такой матрицы представляет собой аморфное твердое тело с высокой механической прочностью, устойчивостью к температурным воздействиям, и агрессивным воздействием окружающей среды, содержащая короткоживущие изотопы. Кристаллическая часть матрицы представляет собой слабо растворимые кристаллические фазы, в структуру которых инкорпорированы долгоживущие радиоактивные элементы.

Получение стеклокристаллических матриц возможно двумя путями. Первый путь заключается в низкотемпературном отжиге стеклянной фриты с оксидами или с предварительно подготовленными кристаллическими фазами. Второй путь основан на традиционной технологии плавления шихты, получения стекла и дальнейшей его кристаллизации в контролируемом температурном режиме. В качестве кристаллической фазы при производстве стеклокристаллических материалов выбирают такие фазы как цирконолит, пирохлор, бритоит в боросиликатных стеклах и монацит и NZP (материалы на основе  $\text{NaZr}_2(\text{PO}_4)_3$ ) в случае алюмофосфатных стекол.

Для исследования процессов кристаллизации алюмофосфатных и железо-алюмофосфатных стекол нами были выбраны стекла содержащие La, Ce и Gd в качестве имитаторов редкоземельно-актинидной фракции (Табл.1). Составы стекол примерно соответствуют базовому составу стекол, применяемому при остекловывании высокоактивных отходов на ПО «Маяк» [Вашман А. А., 1997]. Стекла синтезировались из смеси оксидов в кварцевых тиглях при температуре 1300 °С. Часть полученных расплавов сливались на стальной лист. Предыдущие исследования [Стефановский С. В., 2018] показали, что все полученные образцы были рентгеноаморфны.

Элементный состав полученных стекол изучался на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-5610-Iv, оснащённым энергодисперсионной приставкой UltimMax 100 (Рисунок). Характеристическая температура  $T_g$  стекол определялись методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием синхронного термического анализатора DSC200 производства Xiang Yi Instruments (КНР).

Термический анализ проводили со скоростью нагрева образца  $10^\circ/\text{мин}$  в диапазоне температур  $30-500^\circ\text{C}$  в потоке инертного газа ( $40 \text{ мл/мин}$ ). Исследуемые вещества помещали в корундовые тигли, фиксируя массы. Экспериментальные ДСК кривые образцов Re-1-2, Re-1-3, Re-1-7 приведены на Рисунке 2. ДСК кривые образцов Re-2-15, Re-2-17 и Re-2-20 приведены на Рисунке 3. Как видно, температуры  $T_g$  довольно близки и составляют  $428^\circ\text{C}$  для образца Re-1-7,  $436^\circ\text{C}$  для образца Re-1-3,  $439^\circ\text{C}$  для образца Re-1-2. Для железосодержащих образцов Re-2-15, Re-2-16 и Re1-10 характеристические температуры  $T_g$  оказались равны  $436^\circ\text{C}$ .

Несмотря на частичное замещение алюминия на железо в составе стекол температуры  $T_g$  остаются примерно равными, что указывает на то, что и в случае сложного химического состава температура стеклования будет приблизительно  $430-440^\circ\text{C}$ .

В дальнейшем запланирован эксперимент со ступенчатым отжигом изучаемых стекол при температуре  $T_g$  и выше с шагом в  $100^\circ\text{C}$  и повторными исследованиями отождённых стекол на сканирующем электронном микроскопе. Это позволит проследить динамику фазообразования монацита в стеклокристаллической матрице.

Таблица 1. Составы изученных стекол, мас. %

| Оксиды  | Re-1-2 | Re1-3 | Re1-7 | Re-2-15 | Re-2-16 | Re-2-20 |
|---|--------|-------|-------|---------|---------|---------|
| $\text{Na}_2\text{O}$                                 | 24.1   | 23.2  | 23.2  | 22.8    | 21.9    | 21.9    |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                               | 19.8   | 19.0  | 19.0  | 9.3     | 9.0     | 9.0     |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$                               | -      | -     | -     | 14.7    | 14.1    | 14.1    |
| $\text{P}_2\text{O}_5$                                | 55.1   | 53.0  | 53.0  | 52.2    | 50.2    | 50.2    |
| $\text{Ce}_2\text{O}_3$                               | 1.0    | -     | -     | 1.0     | -       | -       |
| $0.2\text{La}_2\text{O}_3 + 0.8\text{Ce}_2\text{O}_3$ | -      | 4.8   | -     | -       | 4.8     | -       |
| $\text{Gd}_2\text{O}_3$                               | -      | -     | 4.8   | -       | -       | 4.8     |

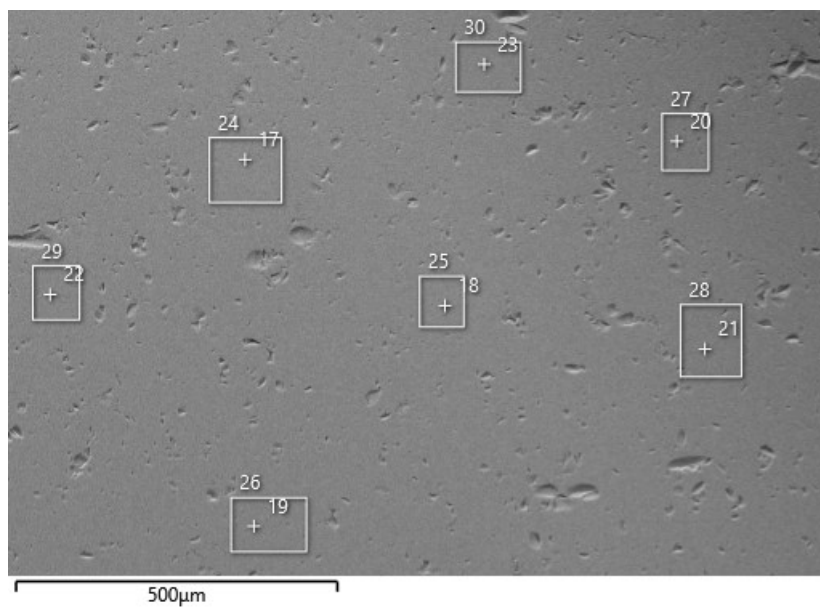


Рис. 1. BSE изображение образца Re-1-2

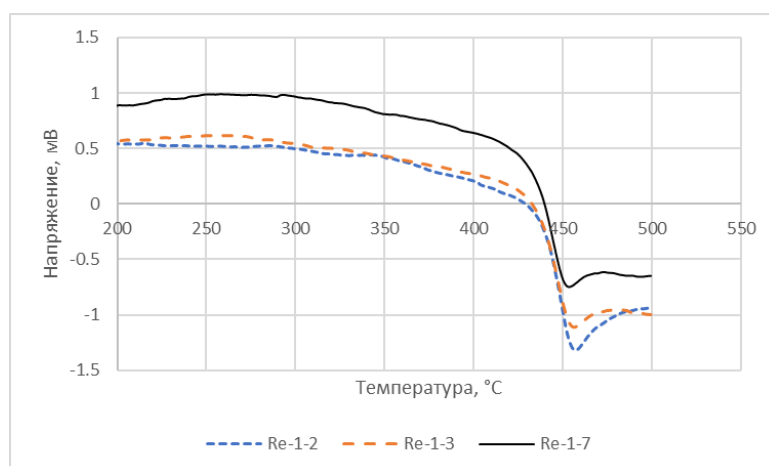


Рис. 2. ДСК кривые образцов Re-1-2, Re-1-3, Re-1-7.

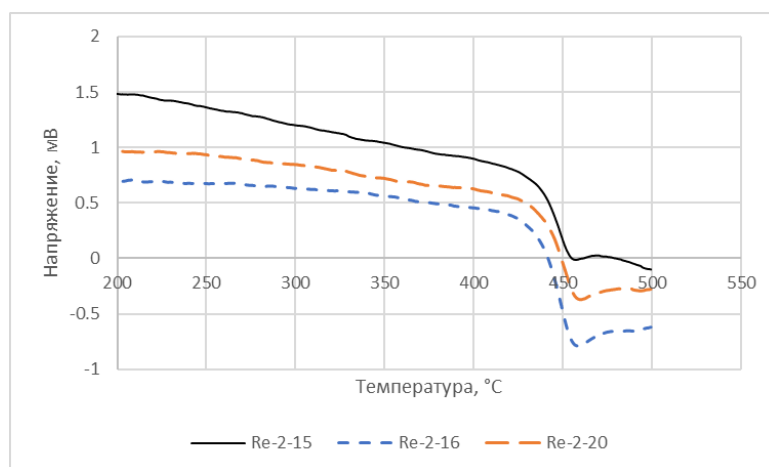


Рис. 3. ДСК кривые образцов Re-2-15, Re-2-16 и Re-2-20



*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.*

### **Литература**

1. Ojovan M. I., Yudintsev S. V. Glass, ceramic, and glass-crystalline matrices for HLW immobilisation //Open Ceramics. – 2023. – Т. 14. – С. 100355.
2. Стефановский, С. В., Стефановская, О. И., & Семенова, Д. (2018). Фазовый состав и структура стекломатериалов на натрий-алюмофосфатной основе, содержащих оксиды редкоземельных элементов. *Радиоактивные отходы*, (1), 97-101.
3. Вашман А. А. и др. Фосфатные стекла с радиоактивными отходами/Под ред //АА Вашмана, АС Полякова. М.: ЦНИИАтоминформ. – 1997.

### **CHARACTERISTIC TEMPERATURES $T_g$ OF GLASSES WITH SURROGATES OF HIGH ACTIVE SPENT NUCLEAR FUEL WASTES**

**<sup>1</sup>Ulanova A.S., <sup>1</sup>Krol I.M., <sup>1</sup>Komarov V.B., <sup>2</sup>Stefanovskaya O.I., <sup>1</sup>Nickolsky M.S.**

<sup>1</sup>Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, [mnickolsky@yandex.ru](mailto:mnickolsky@yandex.ru)

<sup>2</sup>Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry (IPCE) RAS

This study explores the use of glass-ceramic materials as matrices for isolating high-level waste from spent nuclear fuel. These materials consist of an amorphous glass phase, offering strength and stability, and a crystalline phase that incorporates long-lived radioactive elements. Two preparation methods are examined: low-temperature annealing and traditional melting with crystallization. The study investigates aluminophosphate and iron-alumino-phosphate glasses, using La, Ce, and Gd as simulants. Thermal analysis and scanning electron microscopy are employed to analyze the crystallization processes and glass properties, providing insights into their potential for radioactive waste immobilization. It is shown that despite sufficient differences in chemical compositions of the studied glasses the  $T_g$  temperature remains nearly the same (~430-440°C). The obtained results suggests that in case of complex chemical compositions typical for rare-earth – actinide fraction of real high level wastes temperatures  $T_g$  would be in the same temperature range.

## СУБДУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАКСЮТОВСКОГО ЭКЛОГИТ-ГЛАУКОФАНСЛАНЦЕВОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

**Федькин В.В.**

Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН,  
Черноголовка, [vfedkin@iem.ac.ru](mailto:vfedkin@iem.ac.ru)

На примере Максютовского эклогит-глаукофансланцевого комплекса (МК) на Южном Урале проведена апробация новых геодинамических идей возникновения и развития субдукции коровых эклогитов: концепции «Правило инициации субдукции» [Whattam, Stern, 2011] и геодинамической классификации океанических базальтов [Pearce, 2008]. В свете новых прецизионных данных по химическому составу высокобарных пород комплекса [Fedkin et al., 2021] проведено комплексное изучение основных геохимических, петрологических и геодинамических признаков зарождения и развития субдукционных процессов применительно к устоявшимся традиционным представлениям о формировании комплексов коровых эклогитов.

Решается вопрос, являются ли выявленные закономерности общими для эклогит-глаукофансланцевых комплексов или они носят случайный характер, отражающий специфику конкретного региона?

В силу своей изученности и разнообразия геологических событий Максютовский комплекс (МК) является уникальным объектом для такого тестирования с целью использования выявленных закономерностей в качестве общих правил инициации субдукции (ИС) в коллизионных областях земной коры. Исследования показали, что основные признаки инициации субдукции коровых эклогитов и выявленные закономерности их геодинамического развития отчетливо проявлены в МК. Однако интерпретация полученных результатов в свете новаторских геодинамических идей выявляет ряд спорных вопросов в истории развития Максютовского террейна, осложняющих восприятие установленных правил в качестве универсальной модели развития. Предполагается, что эти особенности носят случайный характер, отражают специфику данного региона и не влияют на общие закономерности. Тем не менее, они требуют дальнейшего изучения и уточнения. Это: вопросы времени и длительности формирования МК, субдукционной полярности его развития, особенностей ретроградного метаморфизма на стадии эксгумации, источника и происхождения HP/UHP индекс минералов – алмаза и коэсита и др.

**«Правило инициации субдукции (ИС)»** рассматривает процессы зарождения субдукции в преддуговых бассейнах во

взаимосвязи с образованием офиолитовых комплексов, и формированием в них диагностической магматической хемотратиграфической последовательности. Основные критерии ИС: временное и пространственное сочетание эклогитовой и офиолитовой частей комплекса, четкая хемотратиграфическая последовательность пород, наличие восстановленного HP/UHP канала субдукции, отчетливо проявлены в МК. С другой стороны, геохимические характеристики состава океанических базальтов по широкому спектру химических элементов (в том числе, по HFSE и LILE элементам) позволяют идентифицировать структурно-тектонические фрагменты земной коры, участвующие в ИС, оценить вклад того или иного источника исходного материала в субдукционный процесс [Pearce, 2008]. Исследования, проведенные на основе новых данных о химическом составе высокобарных пород МК [Fedkin et al., 2021], и их интерпретации в свете новаторских геодинамических идей выявляют новые и обостряют некоторые старые спорные вопросы строения и развития орогена, что осложняет восприятие установленных правил в качестве универсальной модели ИС.

**Среди геохимических характеристик** высокобарных пород МК, пожалуй только две могут иметь связь с ИС. Это - широкий разброс состава эклогитов (от толеитовой до известково-щелочной серии) и источников их исходного материала: базальтов океанических островов (OIT, OIA), островодужных толеитов (IAT), базальтов N-MORB и E-MORB серий. Факты мало значимые для концепции ИС, но для их реализации требуется, по крайней мере, трехкомпонентный источник исходного материала: обогащенной мантии, деплетированной мантии и некоего вклада субдукционной компоненты (коровой контаминации) и длительное время его накопления. В связи с этим встает вопрос о времени начала субдукции и длительности существования Максютковского комплекса (с раннего палеозоя по девон включительно). =13

Большая часть высокобарных пород МК оказалась обогащенной ниобием, так называемые Nb-обогащенные базальты (NEB), что является показателем субдукции океанической коры. На этой основе возникает **идея пересмотра полярности субдукции МК с восточной на западную** [Ryazantsev, Tolmacheva, 2016]. Главным событием геодинамической эволюции комплекса становится поддвижение палеоазиатской океанической коры под континент, а не субдукция окраины Восточно-Европейского кратона под Магнитогорскую островную дугу, как это считалось ранее [Brown et al., 2006; Пучков, 2010].

Этот момент вызывает вопрос происхождения Уральского океанического бассейна, длительность существования которого определяет роль и степень участия субдукционной (континентальной) компоненты в породах МК. Новые геохимические данные о составе HP/UHP пород МК по редким и рассеянным элементам [Fedkin et al., 2021] в соответствии с модельными расчетами [Pearce, 2008] определяют вклад субдукционной компоненты в породах МК от 1 до 4 %. Возможно, **это связано с надсубдукционными изменениями океанической литосферы** при формировании раннедевонского P-MORB хребта на Южном Урале в ордовикское время [Ryazantsev et al., 2008].

Наличие в нижней единице комплекса древних (~533 Ma) ультрамафитовых (Ol-En) и эклогитовых (Jd-Gros) пород, структурно и генетически связанных между собой, а также высокие параметры их образования:  $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P > 3,5\text{--}4,0\text{ ГПа}$  [Вализер и др., 2011, 2015], предполагает участие в формировании комплекса тектонических мантийно-коровых включений, образовавшихся в процессе мантийно-плюмового взаимодействия. Это подтверждается параметрами магмогенерации при взаимодействии источников разного типа (OIB, MORB). По соотношению микроэлементов  $\text{TiO}_2/\text{Yb-Nb/Yb}$  определен интервал давления их взаимодействия от 3,5 до 1,5 ГПа, в котором степень частичного плавления увеличивается от 5% в OIB источнике до 20%, при формировании N- и E-MORB составов [Shchipansky et al., 2012]. Эти параметры существенно ограничивает область стабильности высокобарных пород комплекса, в том числе алмаза – главного индекса минерала UHP условий метаморфизма комплекса.

Безусловно, главной петрологической особенностью МК являются предполагаемые находки алмаза и коэсита [Chesnokov, Rorov, 1965; Leech, Ernst, 1998; Bostick et al., 2003], **Их присутствие в породах МК** никак не инициируют его субдукцию, являясь всего лишь ее результатом. **Но создает миф о UHP условиях метаморфизма террейна.** Предполагаемые псевдоморфозы кварца по коэситу [Chesnokov, Rorov, 1965)] пока остаются предположением [Добрецов, Добрецова, 1988], а случаи находок алмаза в составе пород комплекса достаточно редки и не всегда подтверждаются инструментально. Всего несколько наноразмерных зерен в двух образцах эклогита изучено методом рамановской спектроскопии [Bostick et al., 2003]. Наши повторные попытки расширить такой поиск в том же университете, на аналогичной аппаратуре не увенчались успехом. Единичные находки алмаза в шлихах [Алексеев и др., 2009] зависят от источника сноса и не являются достоверно рожденными в МК.

Кубоидные образования графита [Leech, Ernst, 1998] обычно образуются при низких температурах и не связаны с графитизацией алмаза [Корсаков и др., 2019].

Вопрос происхождения алмаза весьма важен для МК. Он определяет статус Максютовского террейна – является ли он комплексом сверхвысокого (UHP) давления или образовался при средних РТ параметрах коровых эклогитов. Для его решения привлечены традиционные петрологические методы изучения эволюции метаморфизма.

Главной особенностью метаморфизма МК является его **циклический возвратно-пульсационный характер** проявления [Федькин, 2020], когда явления проградного и ретроградного метаморфизма неоднократно повторяются, а их РТ тренды, построенные по составам Grt-Cpx-Pl-Qtz парагенезиса, образуют сопряженные пары, характеризующие режимы отдельных этапов (циклов) развития террейна. Четыре таких цикла, зафиксированные по составам сосуществующих фаз, в совокупности образуют общий тренд проградно-ретроградной эволюции комплекса и характеризуют основные события на в процессе его формирования.

Соотношение проградных и ретроградных трендов в образцах МК (4:1) показывает, что основным направлением эволюции комплекса были субдукционные процессы с небольшой долей регрессивных изменений.

Заключительный цикл проградного развития террейна кардинально отличается от предыдущих трех по его аномально высоким параметрам ( $T \leq 800-910$  °C,  $P \leq 2,5-3,5$  ГПа), по максимально древнему возрасту своего проявления ( $533 \pm 4,6$  Ma), повышенному содержанию Nb и HFSE элементов, вследствие чего он выпадает из общей линейки событий, но совпадает по условиям образования с ультрамафит-эклогитовыми включениями.

Это дает основание полагать, что алмаз в составе глубинных ультрамафитовых блоков был захвачен и внедрен в эклогитовый комплекс в результате мантийно-корового взаимодействия задолго (~140 Ma) до начала субдукции. На пике субдукции (~385-390 Ma) эти блоки были захвачены и выдвинуты на поверхность уже поднимающимся слэбом МК в процессе его эксгумации.

Основные критерии и условия «Правил инициации субдукции» [Whattam, Stern, 2011] в Максютовском эклогит-глаукофансланцевом комплексе проявлены достаточно четко, вследствие чего **концепция ИС может быть принята в качестве общей модели формирования и развития комплексов коровых эклогитов.**

Геохимические, петрологические и геодинамические особенности комплекса выявили ряд спорных вопросов, которые требуют

дополнительного изучения и уточнения. Это вопросы времени возникновения и продолжительности существования Максютковского комплекса, источников его исходного материала, направления полярности субдукции террейна, природы и происхождения алмаза в породах комплекса, особенностей циклического возвратно-пульсационного характера метаморфизма

*Работа выполнена в рамках Госзадания ИЭМ РАН FMUF-2022-0004 и Программы Фулбрайт ИМО, грант 2011-2015 г.*

## **Литература**

1. Вализер П.М., Краснобаев А.А., Русин А.И. Ультравысокобарическая ассоциация в ультрамафитах максютковского комплекса (Южный Урал) // ДАН, 2011. Т. 441. № 4. с. 1–4.
2. Вализер П.М., Краснобаев А.А., Русин А.И. УНРМ эклогит Максютковского комплекса (Южный Урал) // ДАН, 2015. Т. 461. № 3. с. 316–321.
3. Добрецов Н.Л., Добрецова Л.В. Новые данные по минералогии Максютковского эклогит-глаукофансланцевого комплекса, южный Урал // ДАН, 1988. Т. 300. № 1. с. 195–200.
4. Пучков В.Н. Геология Урала и Предуралья (актуальные проблемы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении) // Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2010. 280 с.
5. Федькин В.В. Четыре эпизода термальной эволюции эклогитов Максютковского комплекса (Южный Урал) // Геология и Геофизика, 2020. Т. 61. с. 666–684.
6. Bostick, B., et al. (2003) Positive identification of microdiamond from the Maksyutov Complex, south Urals, Russia. // American Mineralogist v. 88, p. 1709–1717.
7. Chesnokov, B.V., and Popov, V.A. // Increasing volume of quartz grains in eclogites of the South Urals: Doklady Akademii Nauk SSSR, 1965, v. 162, p. 176–178.
8. Dobretsov N.L. et al. Tectonic setting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Maksyutov Complex, Ural Mountains, Russia // International Geology Review, 1996. V. 38. p. 136–160.
9. Fedkin V.V., et al., Petrotectonic origin of mafic eclogites from the Maksyutov subduction complex, south Ural Mountains, Russia. // Geological Society of America Special Paper, 2021, v. 552, p. 177–195.
10. Korsakov A.V., Rezvukhina O.V., Jaszczak J.A., Rezvukhin D.I. and Mikhailenko D.S. Natural Graphite Cuboids. // Minerals 2019, 9(2), 110; doi:10.3390/min9020110

11. Leech M. L. and Ernst W. G. (1998) Graphite Pseudomorphs after Diamond? A Carbon Isotope and Spectroscopic Study of Graphite Cuboids from the Maksyutov Complex, South Ural Mountains, Russia. // *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 2143–2154.
12. Pearce J.A. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust // *Lithos*, 2008. V. 100. p. 14–48.
13. Ryazantsev, A.V. et al., Ordovician lithotectonic complexes in allochthons of the Southern Urals // *Geotectonics*. 2008. V. 5. P. 368-395.
14. Ryazantsev A.V., Tolmacheva T.Yu. Ordovician volcanic and plutonic complex of the Sakmara allochthons in the Southern Urals // *Geotectonics*, 2016. V. 50(6). p. 23–51.
15. Shchipansky A.A., Fedkin V.V., Ernst W.G., Leech M.L. Petrochemical and geochemical characteristic of eclogites of the Maksyutov complex (preliminary data) // *Mineralogy in a whole space of the word. RMS Annual Session and Fedorov Session Conf. proceedings*. St. Petersburg. 2012. p. 271–273.
16. Whattam S.A., Stern R.J. The subduction initiation rule': a key for linking ophiolite, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2011. V. 162(5). p. 1031–1045.

## SUBDUCTION FEATURES OF THE MAKSYUTOV ECLOGITE-BLUESCHIST COMPLEX (SOUTHERN URALS)

**Fedkin V.V.**

Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences,  
[vfedkin@iem.ac.ru](mailto:vfedkin@iem.ac.ru)

Using the Maksyutov eclogite-blueschist complex (MC) in the Southern Urals as an example, new geodynamic ideas of the origin and development of crustal eclogite subduction were tested: the concept of the "Subduction Initiation Rule" [Whattam, Stern, 2011] and the geodynamic classification of oceanic basalts [Pearce, 2008]. In light of new precision data on the chemical composition of high-pressure rocks of the complex [Fedkin et al., 2021], a comprehensive study of the main geochemical, petrological and geodynamic features of the origin and development of subduction processes was carried out in relation to established traditional ideas about the formation of crustal eclogite complexes.

The question is whether the identified patterns are common to eclogite-blueschist complexes lexes or are they random in nature, reflecting the specifics of a particular region?



# РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

**Франишку Т., Вознесенский А.С.**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, [m1708475@edu.misis.ru](mailto:m1708475@edu.misis.ru)

В данной работе представлены результаты лабораторных исследований температурных и частотных зависимостей коэффициента механических потерь  $d$  в горных породах методом резонансной акустической спектроскопии. Эксперименты проводились на образце известняка при температурах 25–80 °С и частотах 10–80 кГц. Установлено, что с ростом температуры частотные максимумы смещаются в низкочастотную область, а коэффициент потерь возрастает. Предложена методика, позволяющая получать эти зависимости для последующей оценки состояния массива пород методами неразрушающего контроля.

Коэффициент механических потерь ( $d$ ) отражает диссипацию упругой энергии в горных породах и используется в геомеханике, сейсмомониторинге и неразрушающем контроле.

$$d = \frac{W}{U}, \quad (1)$$

где  $W$  – энергия, рассеиваемая за один период колебания;  $U$  – полная энергия системы. Обратная величина  $Q = 1/d$  носит название добротности.

Использован цилиндрический образец известняка ( $D = 20$  мм,  $L = 120$  мм). Возбуждение и регистрация колебаний производились пьезопреобразователями, закреплёнными на торцах образца. Испытания проводились по схеме, предусматривающей закрепление образца в средней части, где находится узел колебаний, как это показано на рисунке 1. Схема измерений представлена на рисунке 2.

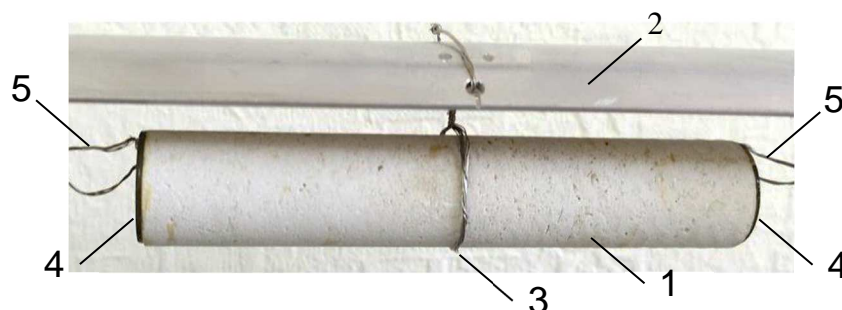


Рис. 1 – Фото держателя с образцом: 1 – цилиндрический образец горной породы; 2 – верхняя планка держателя образца; 3 – подвес образца; 4 – пьезопреобразователи; 5 – электрические выводы пьезопреобразователей.

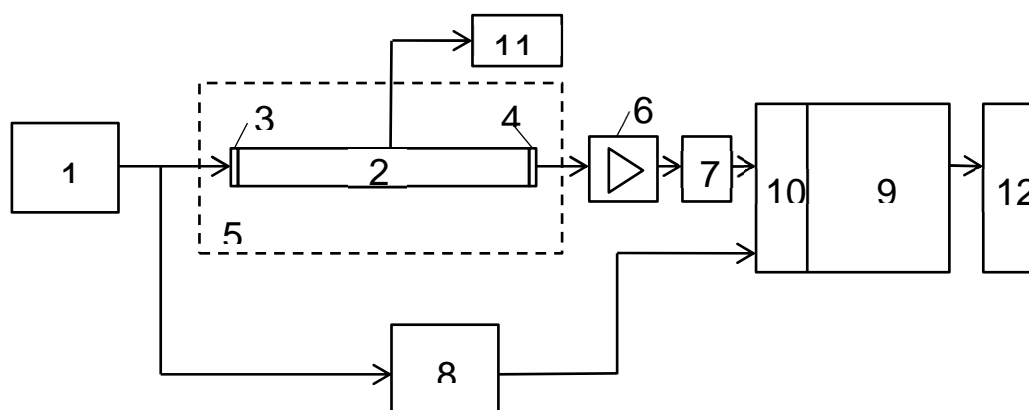


Рис. 2 –. Схема измерений: 1 – генератор JDS-2900, 2 – образец в держателе, 3, 4 – излучающий и приемный пьезопреобразователи, 5 – печь Nabertherm с контроллером Р 320, 6 – предварительный усилитель с коэффициентом усиления 30 дБ, 7, 8 – блоки согласования, 9 – измерительная система QMBox, 10 – модуль QMS17, 11 – измеритель температуры Testo 922, 12 – компьютер

Результаты сканирования АЧХ в виде спектрограммы представлены на рисунке 3.

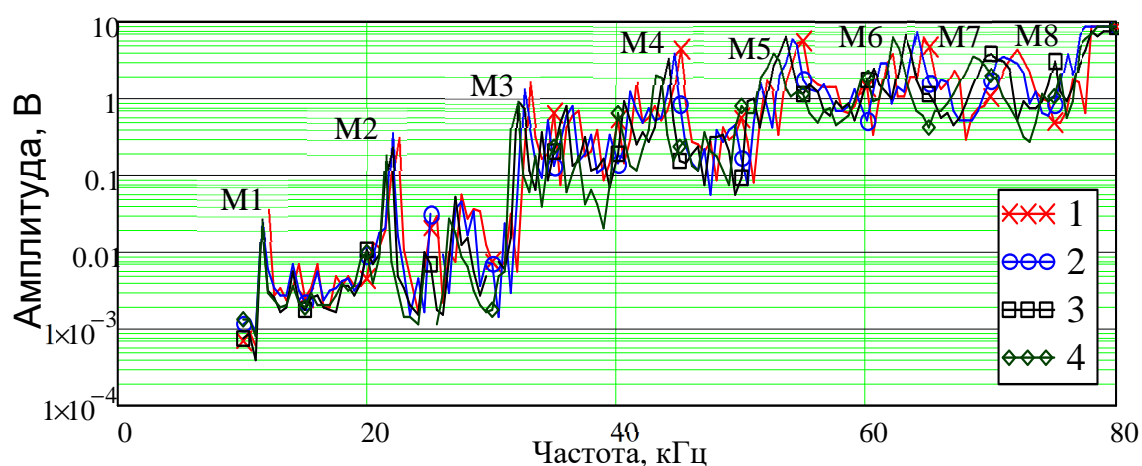


Рис. 3. Спектрограмма образца известняка при температурах 25 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4) градусов Цельсия

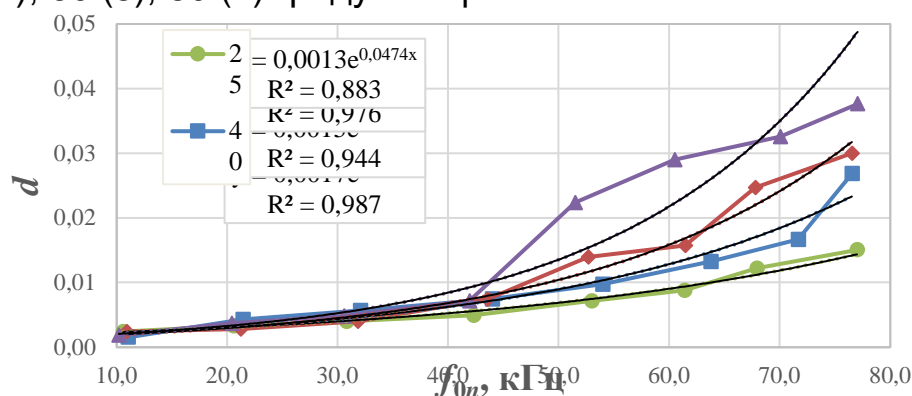


Рис. 4 – Зависимость коэффициента потерь d от частоты при различных температурах и аппроксимирующие кривые

Зависимость коэффициента  $d$  от частоты при разных температурах представлена на рисунке 4. Как следует из приведенных зависимостей, большим номерам резонансов  $n$  и соответствующим им частотам  $f_{0n}$  соответствуют большие величины коэффициента потерь. Аналогичная закономерность наблюдается и при изменении температуры, с ростом температуры коэффициент  $d$  также растет.

Зависимость коэффициента потерь от частоты при разных температурах удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$d(f) = a_0 e^{a_1 f} \quad (2)$$

Значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ , а также коэффициент детерминации  $R^2$  представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты зависимости  $d(f)$

| Температура, °C | $a_0$  | $a_1$ , | $R^2$ |
|-----------------|--------|---------|-------|
| 25              | 0,0013 | 0,0474  | 0,883 |
| 40              | 0,0013 | 0,0421  | 0,976 |
| 60              | 0,0015 | 0,0361  | 0,944 |
| 80              | 0,0017 | 0,0273  | 0,987 |

Как следует из данных таблицы 1, параметр экспоненты  $a_1$  монотонно уменьшается с возрастанием температуры, что соответствует более резкому увеличению  $d$  при росте частоты.

Исследования легли в основу методики получения частотных и температурных зависимостей коэффициента потерь горных пород различных типов и происхождения, необходимых для оценки состояния горных пород вокруг подземных горных выработок методами неразрушающего контроля в условиях глубоких горизонтов.

Интерпретация полученных результатов выполнена с учётом известных закономерностей, описанных в работах Davis, et al, 2016, Ushakov, 2021, Voznesenskii and Ushakov, 2022], посвящённых влиянию температуры на упругодемпфирующие свойства горных пород. При переходе горных работ на глубокие горизонты в породных массивах формируется сложное напряжённо-деформированное состояние, усугубляемое ростом температуры, что отражается на характеристиках упругих волн. В диапазоне температур 25–80 °C для исследованного образца известняка зафиксировано смещение частотных максимумов в низкочастотную область, что согласуется с данными других авторов для пород аналогичного состава.

Повышение температуры сопровождается ростом коэффициента механических потерь  $d$ , что связано с термоупругими эффек-

тами и изменением внутреннего трения в материале. Для высокочастотных мод наблюдается более интенсивный рост  $d$ , что указывает на повышенную чувствительность тонких структурных элементов породы к температурным воздействиям.

Влияние температурного фактора на демпфирование упругих волн подтверждает целесообразность применения многочастотных методов ультразвукового прозвучивания при мониторинге трещиноватости и прогнозировании зон разрушения вокруг горных выработок. Полученные в лабораторных условиях зависимости  $d(f, T)$  формируют основу для разработки методик неразрушающего контроля состояния горных пород на глубинах свыше 1000 м в условиях повышенной температуры массивов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24–27–00103, <https://rscf.ru/project/24-27-00103/>.*

### **Литература**

1. Davis E. S., Sturtevant B. T., Sinha D. N., Pantea C. Resonant Ultrasound Spectroscopy studies of Berea sandstone at high temperature. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016, vol. 121, issue 9, pp. 6401–6410, DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013410>.
2. Ushakov E.I. Acoustic quality of multilayer rocks / in the collection *Acoustics of the habitat (CCA-2021): The Sixth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (Moscow, May 21, 2021): proceedings of the Conference*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2021, pp. 261-267.
3. Voznesenskii A. S., Ushakov E. I. Temperature dependence of internal mechanical losses of gypsum stone with complex composition and structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 906, 164194.

## **RESONANCE METHOD FOR DETERMINING THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE COEFFICIENT OF MECHANICAL LOSSES IN ROCKS**

**Francisco T., Voznesenskii A.S.**

National Research Technological University "MISIS", Moscow,  
[m1708475@edu.misis.ru](mailto:m1708475@edu.misis.ru)

This study presents laboratory results on the temperature and frequency dependence of the mechanical loss coefficient ( $d$ ) in rocks, determined using resonant acoustic spectroscopy. Experiments were conducted on a tuff specimen over a temperature range of 25–80 °C and a frequency range of 10–80 kHz. The results indicate that increasing temperature causes the resonance peaks to shift toward lower frequencies and leads to an increase in the loss coefficient. A methodology is proposed for obtaining these dependencies to support subsequent non-destructive evaluation of rock mass conditions.

## ИЗМЕНЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД НА ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЯХ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

**Фролова Ю.В.**

МГУ имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Москва

[ju\\_frolova@mail.ru](mailto:ju_frolova@mail.ru)

**Введение.** Термальные поля, формирующиеся в местах разгрузки гидротерм и парогазовых струй на дневной поверхности, представляют собой природные лаборатории, в которых можно наблюдать процесс трансформации вулканогенных пород в гидротермально-метасоматические. В целом преобладают низкотемпературные процессы, приводящие к выщелачиванию и разуплотнению пород, снижению их геомеханических характеристик, что в свою очередь активизирует ряд опасных геологических процессов, отражается на рельефе, влияет на расположение и режим термопроявлений. Цель исследования – показать закономерности изменения петрофизических свойств вулканогенных пород на термальных полях Южной Камчатки с различными гидрогеохимическими и температурными условиями.

**Объект исследования.** В основе работы лежат результаты многолетних исследований, проводимых автором (совместно с лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН) на термальных полях Паужетско-Камбально-Кошелевского района, расположенного на Южной Камчатке - Нижне- и Верхне-Кошелевских, Южно-Камбальных, Восточном Фумарольном Камбального вулкана и Восточно-Паужетском (табл.1). Данные поля сформированы на эффузивных породах (андезитах, андезибазальтах, базальтах), однако при этом характеризуются различными гидрогеохимическими особенностями.

**Геологические условия.** Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район представляет собой долгоживущий (с раннего олигоцена по голоцен) вулканогенно-рудный центр [Долгоживущий центр., 1980]. За счет разгрузки глубинного тепла на дневной поверхности в пределах данной территории сформировано множество термальных полей. Основными продуктами изменения вулканитов являются аргиллизиты, опалиты, сольфатарные вторичные кварциты. Формирование тех или иных пород зависит от гидрогеохимических и температурных условий.

**Результаты и их обсуждение.** Наиболее масштабным процессом на термальных полях является *гидротермальная аргиллизация*, в ходе которой глинистые минералы замещают первичные компоненты вулканогенных пород, что сопровождается разуплотнением, выщелачиванием, трещинообразованием с резким

снижением прочностных и деформационных свойств. В результате прочные вулканические массивы нередко полностью трансформируются в аргиллизиты и гидротермальные глины. Так, в ряду неизмененные → слабо- → средне- → сильноизмененные породы плотность воздушно-сухого грунта  $\rho_d$  уменьшается:  $2,66 \rightarrow 2,56 \rightarrow 2,32 \rightarrow 2,02 \text{ г/см}^3$ , а при полной трансформации в глины  $\rho_d$  снижается до  $0,57-1,36 \text{ г/см}^3$ . Выщелачивание первичных компонентов обычно опережает процесс осаждения вторичных минералов, в результате формируется вторичная пористость:  $n=5\% \rightarrow 25\%$ ; а у глин она возрастает до 41-79%. При сильной аргиллизации вулканитов модуль упругости  $E_{\text{дин}}$  уменьшается в 3-4 раза ( $45,3-64,8 \rightarrow 10,5-21,7 \text{ ГПа}$ ), прочность на одноосное сжатие  $R_c$  снижается в среднем на порядок (от более 100 МПа до 10 МПа и ниже). При полной трансформации вулканитов в глины  $R_c$  снижается на три порядка. Также на 2-3 порядка уменьшается прочность на сдвиг, отвечающая за устойчивость склонов. В свою очередь, формирование ослабленных гидротермальной деятельностью аргиллизированных пород способствует активизации эрозионных и обвально-оползневых процессов.

*Опалиты* образуются в приповерхностной зоне термальных полей под действием сернокислотного выщелачивания вторичными кислыми и ультракислыми сульфатными, хлоридно-сульфатными флюидами с  $T \sim 100^\circ\text{C}$  и выше, в ходе которого из вмещающих выносятся все основные компоненты, за исключением Si и Ti. Опалиты состоят из низкотемпературных минералов группы кремнезема (опал, кристобалит, тридимит, халцедон, кварц); также могут присутствовать глинистые минералы (каолинит, галлуазит), алунит, ярозит, сера, гидроксиды железа. Формирование опалитов обычно происходит вокруг выходов парогазовых струй, приуроченных к сети трещин в вулканическом массиве. Вследствие выщелачивания и выноса большинства первичных компонентов пористость увеличивается в 5-7 раз ( $2-8 \rightarrow 30-43\%$ ); происходит разуплотнение ( $\rho_d \ 2,71 \rightarrow 1,73 \text{ г/см}^3$ ), разупрочнение породы и снижение деформационных свойств. Более чем в 2 раза снижаются скорости продольных волн  $V_p$ :  $4,74 \rightarrow 2,18 \text{ км/с}$ ; в 5 раз уменьшается модуль упругости  $E_{\text{дин}}$ :  $50,5 \rightarrow 10,3 \text{ ГПа}$ . Прочность на одноосное сжатие уменьшается в среднем в 5 раз ( $167 \rightarrow 32 \text{ МПа}$ ); прочность на сдвиг - в 6 раз ( $23 \rightarrow 4 \text{ МПа}$ ). Несмотря на высокую пористость, опалиты обладают повышенной упругостью и прочностью за счет жесткого кремнистого «каркаса».

Таблица 1. Петрофизические свойства вулканогенных пород и продуктов их изменения на термальных полях Южной Камчатки (средние значения)

| Исходные породы и продукты их изменения                     |                       | Показатели свойств              |                 |   |                           |                  |                               |
|---|-----------------------|---------------------------------|-----------------|---|---------------------------|------------------|-------------------------------|
|   |                       | $\rho_d$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | n,<br>%         | $V_p$ ,<br>км/с   | $E_d$ ,<br>ГПа            | $R_c$ ,<br>МПа   | $\chi \cdot 10^{-3}$<br>ед.СИ |
| Южно-Камбальные термальные поля [Фролова и др., 2020]       |                       |                                 |                 |   |                           |                  |                               |
| Андезиты, андезибазальты                                    | Неизм.                | 2,72                            | 5               | 5,4   | 59,9                      | 126              | 31,4                          |
|   | Слабоизм.             | 2,56                            | 12              | 4,4   | 36,7                      | 83               | 26,8                          |
|   | Среднеизм.            | 2,29                            | 20              | 3,5   | 18,8                      | 28               | 8,4                           |
|   | Сильноизм.            | 1,86                            | -               | 2,6   | 9,6                       | 15               | 1,4                           |
| Гидротермально-метасоматические породы                      | Серные опалиты        | 1,66                            | 30              | 2,1   | 5,5                       | 3,1              | 0,08                          |
|   | Монокварциты пористые | 1,56                            | 43              | 3,5   | 12,3                      | 4,5              | -0,02                         |
|   | Монокварциты плотные  | 2,27                            | 18              | 4,7   | 38,1                      | 73               | 0,02                          |
|   | Глины                 | 0,57-1,51                       | 41-79           | -   | -                         | ≤0,3             | -                             |
| Восточно-Фумарольное поле Камбального вулкана               |                       |                                 |                 |   |                           |                  |                               |
| Базальты  |                       | 2,55                            | 12              | 3,5   | 25,9                      | 65               | 34,2                          |
| Опалиты   |                       | 1,74                            | 32              | 2,9   | 12,5                      | 32               | 0,03                          |
| Верхне-Кошелевское термальное поле                          |                       |                                 |                 |   |                           |                  |                               |
| Андезиты, андезибазальты                                    | Неизм.                | 2,62                            | 8               | 4,8   | 43,3                      | 124              | 61                            |
|   | Изм.                  | 2,36                            | 9               | 3,5   | 23,6                      | 92               | -                             |
| Опалиты - монокварциты                                      |                       | 1,53                            | 35              | 2,5   | 10,8                      | 53               | 0,06                          |
| Нижне-Кошелевское термальное поле [Фролова и др., 2019]     |                       |                                 |                 |   |                           |                  |                               |
| Андезидациты, андезиты, андезибазальты                      | Неизм.                | 2,69                            | 7               | 4,8   | 44,8                      | 111              | 37,5                          |
|   | Слабоизм.             | 2,41                            | 13              | 4,3   | 31,4                      | 89               | 18                            |
|   | Средне-сильноизм.     | 2,05                            | 26              | 3,2   | 17,2                      | 20               | 5,5                           |
| Глины   |                       | 1,03–1,11                       | 60              | Консистенция твердая и полутвердая, число пластичности 29-30%, в воде размокают |                           |                  |                               |
| Восточно-Паужетское термальное поле [Большаков и др., 2023] |                       |                                 |                 |   |                           |                  |                               |
| Андезиты, андезибазальты                                    | Неизм.                | 2,71                            | 3               | 5,6   | 62,7                      | 142              | 31                            |
|   | Слабоизм.             | 2,62                            | 6               | 4,1   | 30,3                      | 114              | 26                            |
|   | Среднеизм.            | 2,48                            | 11              | 3,9   | 28,0                      | 43               | 25                            |
|   | Сильноизм.            | 2,28                            | 18<br>max<br>32 | 3,0   | 17,0                      | 21<br>min<br>2,3 | 19<br>min<br>2,3              |
| Глины   |                       |                                 | 39-81           |   | 0,14-3,3·10 <sup>-3</sup> | 0,05-0,14        |                               |



Помимо «классических» опалитов существуют и другие их разновидности (железистые опалиты, опал-каолиновые породы, кварц-алунитовые метасоматиты, монокварциты), отличающиеся по петрофизическим свойствам. Поскольку опалитизация и особенно окварцевание вызывают некоторое упрочнение пород, то формируются положительные формы рельефа, например, «опалитовые бугры» или островершинные хребты. Однако эти процессы имеют не столь масштабное распространение как аргиллизация.

Отдельно следует упомянуть магнитную восприимчивость ( $\chi=20-40 \cdot 10^{-3}$  СИ у исходных пород), которая снижается на три порядка при аргиллизации и на пять порядков при опалитизации.

**Заключение.** На термальных полях происходит значительное изменение петрофизических свойств вулканогенных пород, причем особо следует отметить высокую скорость протекающих процессов. В условиях разгружающихся от слабокислых до слабощелочных гидротерм вулканические массивы подвергаются аргиллизации, которая вызывает разуплотнение, снижение прочности на два-три порядка значений, тем самым способствуя формированию отрицательных форм рельефа и активизации эрозионных и обвально-оползневых процессов. В условиях парогазовой кислой и ультракислой среды породы подвержены выщелачиванию и опалитизации. Формирующиеся опалиты, несмотря на высокую пористость, обладают повышенными упругими и прочностными характеристиками за счет жесткого кремнистого «каркаса». Фильтрующиеся растворы могут обогащаться кремнеземом за счет растворения первичных силикатов и осаждать его в пустотах в виде кварца, приводя к образованию сольфатарных вторичных кварцитов (монокварцитов) – плотных и прочных пород. Вследствие постоянной миграции парогазовых струй и зон «пропарки», область распространения опалитов существенно превышает площадь современных термопроявлений.

## Литература

1. Большаков И.Е., Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. Закономерности изменения состава и физико-механических свойств андезитов Восточно-Паужетского термального поля под действием аргиллизации (Южная Камчатка) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. № 5. С. 46-57.
2. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / отв. ред. Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1980. 172 с.
3. Фролова Ю.В., Чернов М.С., Рычагов С.Н., Лисицина Д.Д., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е., Кириченко В.А. Изменение

андезитов Нижне-Кошелевского термального поля в процессе гидротермальной аргиллизации (Южная Камчатка) // Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню Вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С.236- 239.

4. Фролова Ю.В., Чернов М.С., Рычагов С.Н., Суровцева К.И., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т.XV. №1. С. 36-51.

## CHANGES IN PETROPHYSICAL PROPERTIES OF VOLCANIC ROCKS IN THE THERMAL FIELDS OF SOUTHERN KAMCHATKA

**Frolova J.V.**

Lomonosov Moscow State University (MSU), Faculty of Geology, Moscow, [ju\\_frolova@mail.ru](mailto:ju_frolova@mail.ru)

The article considers changes in the petrophysical properties of volcanic rocks in the thermal fields of South Kamchatka with various hydrogeochemical and temperature conditions. Thermal fields formed in places of thermal water discharge and steam-gas jets on the surface are natural laboratories in which one can observe the process of transformation of volcanic rocks into hydrothermal-metasomatic ones. In general, low-temperature processes prevail, leading to leaching and decompaction of rocks, a decrease in their geomechanical characteristics, which in turn activates a number of hazardous geological processes, is reflected in the relief, affects the location and mode of thermal manifestations.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЛИАРЕНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОМПОНЕНТОВ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ)

**Хаустов А.П., Редина М.М.**

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,  
(РУДН), 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Естественные системы стремятся к наибольшему числу возможных реализаций (степеней свободы), что выражается в росте энтропии и снижении термодинамического потенциала. Особенно такие различия значимы на геохимических барьерах (ГХБ). Функции ГХБ многогранны и неоднозначны: характеристики переменных на входе имеют флуктуации (импульсы) подачи энергии и масс вещества происходят неравномерно (порциями), которые создают порядок и возмущения в принимающей среде.

В активной отдающей среде создается неравновесная структуризация взаимодействующих систем вследствие энергетических потерь на преодоление ГХБ потоками растворенных веществ, которая частично наследуется в принимающей среде через миграционную активность. Перевод системы в другое качество в пассивной среде сопровождается изменением набора химических соединений. В итоге основное назначение ГХБ – возникновение «порядка» через флуктуации. Барьеры избирательны по отношению к активным средам; барьеры чувствительны к объемам массопотоков, граничным условиям на контурах и внутри.

В неравновесных биогеохимических системах (БХГС) возникают эффекты кооперативного согласования: элементы системы коррелируют свое поведение на макроскопических расстояниях в макроскопические интервалы времени. Создаются механизмы рассеивания или концентрирования веществ по отношению к массопотокам. Формируются пулы веществ с соразмерными молекулярными свойствами с более-менее стабильными свойствами по отношению к реакции на внешние воздействия.

Деление на термодинамически стабильные и кинетически стабильные молекулярные структуры во многом условно и не имеет точных количественных критериев. Чем больше время жизни молекулярной структуры, тем больше кинетическая стабильность.

Углеводороды ПАУ при фазовых переходах (в частности, нафталин, антрацен, фенантрен) образуют прочные связи на длительные интервалы времени.

На первом уровне усложнения систем будут проявляться пулы ПАУ с сильными межмолекулярными связями, следовательно, активными взаимодействиями; именно по этой причине они первыми начинают образовывать новую фазу. На такие процессы необходимы наибольшие затраты энергии (производство энтропии), и которые характеризуются максимальным значением полезной работы (производство эксергии) по перемещению пулов ПАУ через ГХБ.

Объекты наших исследований – разгрузки (источники) подземных вод восточного Крыма с разным характером воздействия (химический состав) на компоненты прилегающей экосистемы. Исследование основано на анализе фазовых переходов ПАУ в процессах усложнения систем на примере рассмотренных БГХС.

1. Выделение условий иерархического взаимодействия потоков вещества и энергии – необходимый этап идентификации механизмов эволюции (самоорганизации) БГХС при усложнении взаимодействующих компонентов. С этих позиций объекты 1-го уровня усложнения: «вода–донные отложения», «вода–гидрофиты», «вода–почвы», «почвы–корни растений», «корни растений–стебли»; 2-го уровня – «вода–донные отложения–почвы»; 3-го уровня «вода–донные отложения–почвы–корни растений»; 4-го уровня – «вода–донные отложения–почвы–корни растений–стебли».

2. Расчёты эксергии проводились по известной формуле:

$$Ex = -RT \sum_{i=1}^N \left[ c_i \ln \left( \frac{c_i}{c_{i\,eq}} \right) + (c_i - c_{i\,eq}) \right],$$

где R – универсальная газовая постоянная; Джоуль/(моль·К); T – абсолютная температура, К;  $c_i$  – концентрация ПАУ во взаимодействующем компоненте, мкг/кг;  $c_{i\,eq}$  – его концентрация в условиях термодинамического равновесия, мкг/кг.

3. Чувствительность принимающей компоненты БГХС к потокам вещества оценена на основе: коэффициентов концентрации (КК); производства энтропии ( $\Delta S$ , разница ее значений на входе и выходе); доля полезной энергии, участвующей в процессе структурного перехода массопотока; доля работы, затраченная на переход активных веществ через ГХБ.

4. Для оценок миграционной активности ПАУ в системах, состоящих из 2–5 компонентов были рассчитаны рейтинги термодинамической активности. Их достоинство – в том, что для каждого объекта формируется своя шкала рейтинговых оценок; это

позволяет идентифицировать индивидуальность процессов усложнения систем при различном взаимодействии компонентов. Еще более важным аспектом является то, что принципиальная идея таких оценок рейтингов обусловлена возможностью объективных расчётов величин эксергии фазовых переходов на ГХБ. По отношению к обоснованию активности перехода мигрирующих веществ объективный расчет возможен по формуле 1. Чаще значения  $c_{i\text{ eq}}$  веществ в условиях термодинамического равновесия принимаются по лабораторным или табличным данным в условиях далеких от реальности.

В случае систем из 3 и более компонентов расчет проводился аналогичным образом, а коэффициенты концентрации для каждой из систем рассчитывались как средние от коэффициентов концентрации для геохимических барьеров в рамках этой системы. Например, для 5 компонентной системы вода–ил–почва–корень–стебель необходимо было рассчитать среднее арифметическое от коэффициентов концентрации для барьеров вода–ил, ил–почва, почва–корень и корень–стебель. Расчеты проведены отдельно для каждого источника, а затем для всей совокупности рассмотренных ГХБ. Реализованные потенциалы термодинамической активности существенно различны по своим величинам, что отчасти обусловлено внутримолекулярными свойствами самих ПАУ.

В термодинамике для процессов миграции предполагается зависимость параметров энтропии потенциала Гиббса, энтальпии, коэффициента липофильности от молекулярной массы (свойство экстенсивности в системах). Наши оценки рейтинга на природных объектах указывают, что это фундаментальное свойство может нарушаться. Чем сложнее молекулы, тем выше значения их энтропии и тем они устойчивее в структурных переходах.

По мере усложнения растут энергозатраты на преодоление ГХБ и происходит увеличение производства энтропии. В прогрессирующей системе происходит рост энтропии с уменьшением энергозатрат за счет снижения роли биогенного вещества, что особенно ярко проявляется в нашем случае при включении в систему организмов-гидрофитов. Двухкомпонентная система 1-го уровня представлена самыми разнообразными сочетаниями взаимодействий и характеризуется максимальными КК за счет наиболее низких производств энтропии и высоких значений эксергии. Это наиболее эффективный механизм эволюции с минимальными затратами энергии при выполнении максимума работы, если судить по величинам концентраций ПАУ в принимающей компоненте.

Отрицательная эксергия – минимальная работа, необходимая для перехода системы из состояния равновесия с окружающей средой в заданное состояние (в нашем случае – фиксируемое на момент отбора проб). Отрицательный знак эксергии означает, что работа производится за счёт энергии внешней среды. В нашем эксперименте это воды источников с разным химическим составом. Так, в исследуемой БГХС у фенантрена, антрацена, аценафтена, нафталина на уровне 2-компонентной системы это показывает невозможность их миграции через ГХБ. При этом в большинстве работ наоборот обычно указывается на высокую миграционную активность этих ПАУ. Показанные нами условия проявляются практически при всех этапах усложнения (от 2- до 5-компонентных систем). Именно эти малокольцевые ПАУ накапливаются в соответствующих средах, а более активными мигрантами являются более крупные молекулы (4-5 бензольных колец). Это подтверждает сказанное выше об избирательной чувствительности ГХБ по отношению к потокам веществ извне.

Положительные значения эксергии для оставшихся ПАУ (активно мигрирующих) демонстрируют активность с выполнением максимальной работы по переходу через ГХБ, которую может совершить макроскопическая система при переходе из заданного состояния в состояние равновесия. Роль этих ПАУ – формирование ореолов рассеивания и активно мигрирующих потоков в системах.

## THERMODYNAMIC ACTIVITY OF POLYARENES IN THE INTERACTION OF COMPONENTS OF BIOGEOCHEMICAL SYSTEMS (ENERGY INTERPRETATION)

**Khaustov A.P., Redina M.M.**

People's Friendship University of Russia, (RUDN University), 117198 Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6.

For the first time in the practice of geochemical research, the potential of migration activity of polyarenes has been assessed. The complexity of biogeochemical systems (sources of Crimea) is considered as the interaction of active and passive environments with the participation of geochemical barriers. The energy characteristics entropy and energy are substantiated for the identification of these processes. Active and passive markers of migration processes have been identified.

## АРХЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ГИПОТЕЗЫ ИЗНАЧАЛЬНО ГИДРИДНОЙ ЗЕМЛИ

<sup>1</sup>**Цельмович В.А.,** <sup>2</sup>**Камышов А.Н.**

<sup>1</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» - филиал Института Физики Земли РАН, Россия, [tselm@mail.ru](mailto:tselm@mail.ru);

<sup>2</sup>ООО «ОП» Балтик Эскорт холдинг»

**Введение.** Известны археологические находки инструментов, выполненных из технически чистого железа (ТЧЖ). Предметы скифского периода сохранились в хорошем состоянии, что показывает чрезвычайно высокую устойчивость железа к коррозии. Поскольку находок метеоритов с железом такой чистоты никогда не было зафиксировано, а древние кочевники не обладали технологиями получения ТЧЖ, рассмотрен вариант объяснения природы артефакта из ТЧЖ в рамках гипотезы В.Н.Ларина о изначально гидридной Земле. Задачей исследования было показать, что изученный артефакт сделан не из выплавленной стали, а из материала природного происхождения, ТЧЖ, что является краеугольным камнем гипотезы гидридной Земли.

**Объект и методы исследования.** Сохранившиеся старинные литературные источники сообщают, что в древности для создания инструментов использовали два вида железа (Fe), которое могло иметь космогенное и терригенное происхождение:

1. Бухарский эмир приказал своим лучшим оружейникам отковать ему меч из куска «небесного железа». Но сколько они не старались, ничего у них не вышло. Нагретое железо не поддавалось ковке и эмир казнил неудачников [Мезенин, 1985]. Вероятно, этот кусок состоял из никелистого железа, который плохо поддается ковке.
2. В своем донесении якутский воевода Василий Пушкин в 1646 году писал: «у иноземцев якутов их якутское дело железо есть самое доброе, а плавят они то железо из каменьев не по многу, не на большое дело» [Николаев, 2021]. В 1660 году пленный поляк Каменский-Длужик писал, что якуты собирают железо по Ленским берегам кучками, и оно хорошее, как сталь. Полярная экспедиция Росса в 1818 году обнаружила, что эскимосы Баффиновой Земли делали в то время ножи и наконечники гарпунов из железа, отделяемого ими от крупного метеорита, лежащего на берегу бухты Мельвиль. Сохранилось упоминание в «Словаре коммерческом» В.Левшина [Словарь, 1787] - «так называется железо, совсем приготовленное природою в недрах земных и совсем очищенное от веществ посторонних столько, что можно из него ковать без переплавки всякие вещи. Г.Руель получил через Восточно-индийскую компанию кусок такого самородного железа из Сенегала,



где находится оное в превеликих глыбах» [Мезенин, 1985]. В Сибири во многих местах находят самородное железо, подобная находка отмечена и авторами статьи [Цельмович и др., 2025].

С учетом огромного интереса к находкам ТЧЖ, была изучена археологическая находка - молот весом 5кг, найденный на глубине около 1 метра в Шарьинском районе Костромской области (урочище Морозово), состоящую из металлического железа. Исследование проведено при помощи СЭМ Tescan Vega3, энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) Oxford Instruments). Основная фаза рентгенодифракционного спектра исследуемого железа – объёмноцентрированное кубическое железо (ОЦК железо).

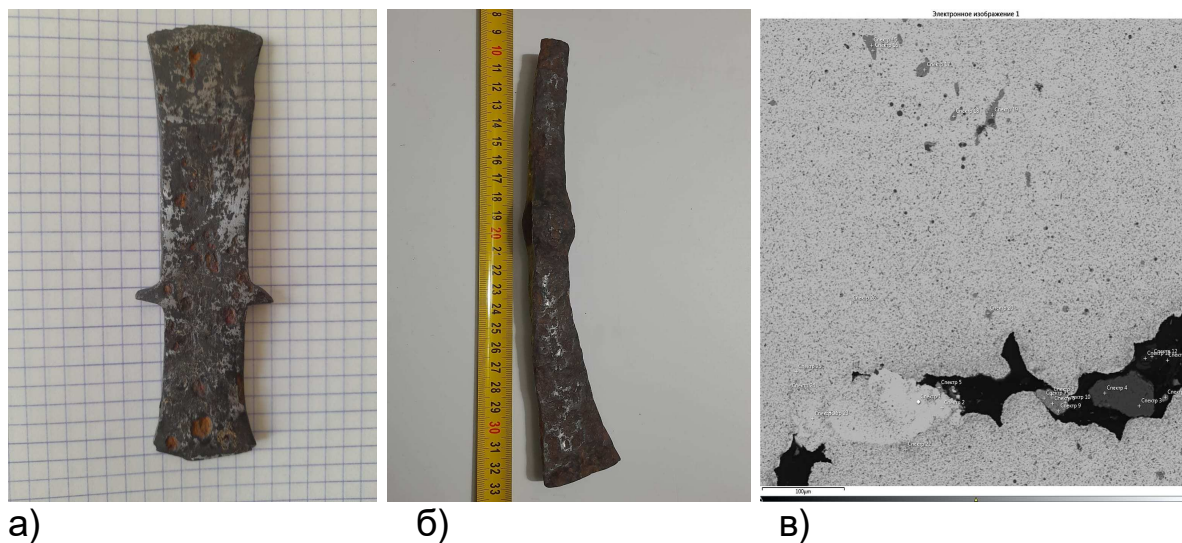


Рис.1. а), б) - вид инструментов из ТЧЖ; в) участок изделия, СЭМ. Фотография участка чистого Fe с силикатными включениями.

Проведённые при помощи СЭМ с ЭДС исследования показали, что изделие состоит из ТЧЖ с чистотой Armco iron (рис. 1в) - 100% Fe по данным ЭДС. Оно сохранились в рабочем состоянии до наших дней благодаря защитной магнетитовой пленке. Материал настолько мягкий, что с него можно ножом срезать стружку, что характерно для ТЧЖ. Получение железа такой чистоты в то время было невозможно. Происхождение небольшого количества силикатов и оксидов, обнаруженных в теле массивного куска Fe (рис. 1в), скорее всего, вторично или обусловленным физическим захватом, а не формированием в той же среде, где образуется гидридное железо. Поэтому нами было высказано предположение о природном происхождении железа, что отвергает версии космогенного и металлургического происхождения, и хорошо ложатся на гипотезу "Гидридной Земли", предложенную В.Н.Лариным [Ларин, 2005]. Ключевые положения гипотезы Ларина, которые подтверждают нашу находку:

1. Природное железо в мантии Земли: Согласно гипотезе Ларина, глубинная мантия Земли содержит огромные объемы металлического железа (в форме твердых растворов с водородом, т.е. гидридов железа), а не в виде оксидов, как принято в стандартной геохимии.

2. Водород как ключевой элемент: Гипотеза предполагает, что водород присутствует в Земле в огромных количествах, связан с металлами, и играет ключевую роль в формировании структуры Земли, ее магнитного поля и даже геологических процессов.

3. Поднятие глубинного материала: По этой гипотезе, различные геологические процессы (например, извержения вулканов, поднятие мантийных плюмов) могут выносить на поверхность или близко к ней этот глубинный, богатый водородом и природным железом, материал.

**Результаты. Обсуждение и выводы.** Полученные результаты хорошо согласуются с гипотезой о природном происхождении железа, а не промышленном. Высокая чистота и отсутствие типичных промышленных легирующих элементов (кроме Mn, Ni, Co в низких концентрациях, характерных для природного происхождения) однозначно указывают на то, что это не обычная современная сталь или чугун. Спектр примесей (Ni, Co, Mn) является характерным для природного железа, которое могло образоваться в восстановительных условиях в мантии или коре. Если это железо действительно было получено в рамках условий, описываемых гипотезой Ларина (восстановительная среда, связанная с глубинными слоями Земли, богатыми водородом), то его высокая чистота вполне ожидаема, так как в таких условиях железо может кристаллизоваться в более чистом виде. Отсутствие высокого содержания углерода (который является основным легирующим элементом в сталях) также соответствует гипотезе. Присутствие водорода не показано проведенными анализами, но отсутствие "стандартных" земных примесей и высокие значения Ni/Co/Mn соотношений (или их абсолютные значения) могут косвенно говорить о необычных условиях формирования.

**Заключение.** Проведённые анализы химического состава кувалды показывают, что её материал является очень чистым железом с характерным спектром примесей (Mn, Ni, Co), что необычно для промышленного железа и очень характерно для природного железа. Это подкрепляет идею, что артефакт сделан не из метеоритной или выплавленной стали, а из материала природного происхождения, что является краеугольным камнем гипотезы В.Н.Ларина. Не исключено, что подобные находки, ранее

отмеченные в самых разных частях Земли, могут быть маркёрами месторождений водорода.

*Работа выполнена по госзаданию ИФЗ РАН*

### **Литература**

1. Мезенин Н.А. Занимательно о железе. Издание 3-е. М. «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1985. 176 с.
2. Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М. «Агар» 2005. 248 с.
3. Николаев Е.Н. Некоторые вопросы классификации якутских сыродутных горнов // Вестник Томского государственного университета. – 2021. – № 465. – С. 124-132. – DOI 10.17223/15617793/465/17. – EDN ELYYLC.
4. Словарь коммерческий, содержащий познание о товарах всех стран, и названиях вещей главных и новейших, относящихся до коммерции, также до домостроительства, познание художеств, рукоделий, фабрик, рудных дел, красок, пряных зелий, трав, дорогих камней и проч./ Переведен с французского языка Васильем Левшиным. — Москва: Тип. Комп. типогр., 1787-1792.— 8°.
5. Цельмович В.А., Шельмин В.Г., Максе Л.П. Микроскопические следы Чулымского болида, падение 1984 года. // Литосфера. 2025. Т. 25. № 4. С. 961-976. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-961-976>.

### **ARCHAEOLOGICAL EVIDENCE FOR THE HYPOTHESIS OF AN ORIGINALLY HYDRIDE EARTH**

**<sup>1</sup>Tselmovich V.A., <sup>2</sup>Kamyshov A.N.**

<sup>1</sup>Geophysical Observatory "Borok" - branch of the Institute of Physics of the Earth RAS, [tselm@mail.ru](mailto:tselm@mail.ru)

<sup>2</sup>Baltic Escort Holding

Archaeological finds of tools made of chemically pure iron are known. The objects of the Scythian period have been preserved in good condition, which shows the extremely high resistance of iron to corrosion. Since finds of meteorites with iron of such purity have never been recorded, and ancient nomads did not have the technology to obtain iron of such purity, the option of finding an artifact made of pure iron is considered within the framework of V.N. Larin's hypothesis about the originally hydride Earth. It is shown that the studied artifact is not made of smelted steel, but of a material of natural origin, which is the cornerstone of the hypothesis of the hydride Earth. It is possible that such finds can be markers of hydrogen deposits.

## МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ АНТАРКТИДЫ, СОБРАННОГО МАГНИТНОЙ ЛОВУШКОЙ

<sup>1</sup>Цельмович В.А., <sup>2</sup>Кузина Д.М., <sup>3</sup>Муфтахетдинова Р.Ф., <sup>3</sup>Яковлев Г.А.,  
<sup>4</sup>Ежов В.Ф., <sup>4</sup>Четвериков Ю.О., <sup>3,4</sup>Булат С.А.

<sup>1</sup>ГО «Борок» ИФЗ РАН» [tselm@mail.ru](mailto:tselm@mail.ru), тел.7(9066327448),

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО КФУ, Казань, Россия

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО УрФУ, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ, Гатчина, Россия

**Введение.** Ежегодно на землю падает более 5200 тонн космической пыли (КП). Из них до 10% составляют частицы космического происхождения (планшет Антарктика). Изучение КП, ее состава и морфологии, важно, как для понимания происхождения пыли и истории Солнечной Системы, так и об эволюции планеты Земля.

**Объект и методы исследования.** КП в Антарктиде собирают различными методами, избегающими загрязнения земными частицами: сбор с поверхности льда, из снега, атмосферный сбор, для которого используют вентиляторы, фильтрующие приземный воздух через специальные фильтры. При этом важен выбор местоположения участка сбора – вдали от станций и против розы ветров.

Цель сбора. Сбор и исследование КП пыли в Антарктиде важны для понимания истории Земли и Солнечной системы, космоса. Результат сбора КП зависит от способа сбора. Нами были использованы ловушки из NdFeB магнитов.

Для сбора КП и микрометеоритов 27.12. 2023 г. в 4-х км от станции Восток (78.497824 S 106.748117 E) на штативах были установлены две NdFeB ловушки для месячной и годовой экспозиций. Установку производили в чистой (одетой на месте) разовой одежде в 50 метрах выше по ветру от места остановки снегохода. 23 января 2024 г. одну из двух ловушек демонтировали в чистых условиях и отправили на НЭС «Академик Трешников» для доставки в лабораторию ПИЯФ «НИЦ КИ». Вторая ловушка была оставлена для годовой экспозиции и была снята 10 февраля 2025 г. с доставкой в Санкт-Петербург. Образцы анализировали в ГО «Борок» ИФЗ РАН, УрФУ и междисциплинарном центре «Аналитическая микроскопия» КазФУ с использованием оптических металлографических микроскопов Olympus BX51M, Carl Zeiss Axiovert 40 MAT и сканирующих электронных микроскопов FE-SEM ΣIGMA VP, Tescan Mira3, Merlin компании Carl Zeiss (Германия), с детектором элементного анализа Aztec X-MAX.



**Результаты. Обсуждение и выводы.** При просмотре микрочастиц КП, обнаруженных на поверхности NdFeB магнитов, было выявлено 132 частицы размером от 0,5 мкм до 200 мкм. С наиболее пригодных для анализа частиц при помощи ЭДС было снято 54 спектра и рассчитаны составы частиц.

В результате проанализированные частицы были классифицированы:

1. Микрометеориты: частицы Fe-Ni сплавов, камасита и тэнита.
2. Компонента редкого метеорита, или техногенные частицы «чистых» Sn и Cu, сплава Fe-Ti.
3. Терригенная компонента: частицы NaCl, предположительно компонент аэрозолей морской соли; частицы алюмосиликатов, кальцитов, магнетит (Mt), кварца.
4. Фоновая космическая компонента: чистое самородное Fe.

Отметим, что обнаруженные частицы микрометеоритов схожи с ранее описанными [Бадюков и др., 2018] тонкозернистыми шлаковидными микрометеоритами из Новоземельской коллекции. Схожесть морфологии и состава образцов из Арктики и Антарктики позволяет сделать заключение о единой природе их происхождения, близких условиях накопления и сохранности. Обнаружение Sn в виде оксидов, самородного Sn и сплава Sn с Fe является неожиданным и нетипичным. В метеоритном веществе олово присутствует крайне редко, но в железистых метеоритах в виде сплавов было найдено [Wampler J. et al., 2020] а также в хондритах [Creech et al., 2019]. Незначительное содержание Sn находят в углистых CI и CM хондритах [Alexander et al., 2013]. Sn - редкий рассеянный элемент, по распространенности в земной коре олово занимает 47-е место. Кларковое содержание олова в земной коре составляет, по разным данным, от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $8 \cdot 10^{-3}$  % по массе. Основной минерал Sn — касситерит (оловянный камень)  $\text{SnO}_2$ , содержащий до 78,8% Sn. Наши находки дают основание предположить, что источником Sn и Cu могут быть либо редкие метеориты, либо разрушенные электронные компоненты сгоревших спутников. Нами было обнаружено 6 частиц, содержащих Sn в металлической или оксидной форме (при этом ранее в Антарктике таких находок нами не было сделано), в виде пленок на Fe (рис. 1 а-д).

На рис. 2. показаны терригенные частицы: а) NaCl; б)  $\text{CaCO}_3$ , Mt (магнетит); в) обломочный Mt с плёнкой Fe.

**Выводы.** В магнитных микрочастицах, собранных на станции Восток в Антарктиде при помощи NdFeB магнитных ловушек, идентифицированы частицы космогенного (Fe, FeNi), терригенного (NaCl,  $\text{CaCO}_3$ , Mt) и редкого космогенного или антропогенного (Sn,

Cu) происхождения. Исследования частиц, собранных там же магнитной ловушкой с годовой экспозицией, не обнаружили частиц Sn и Cu, что свидетельствует об уникальности находки. Найденные частицы классифицированы и могут быть использованы для других исследований.

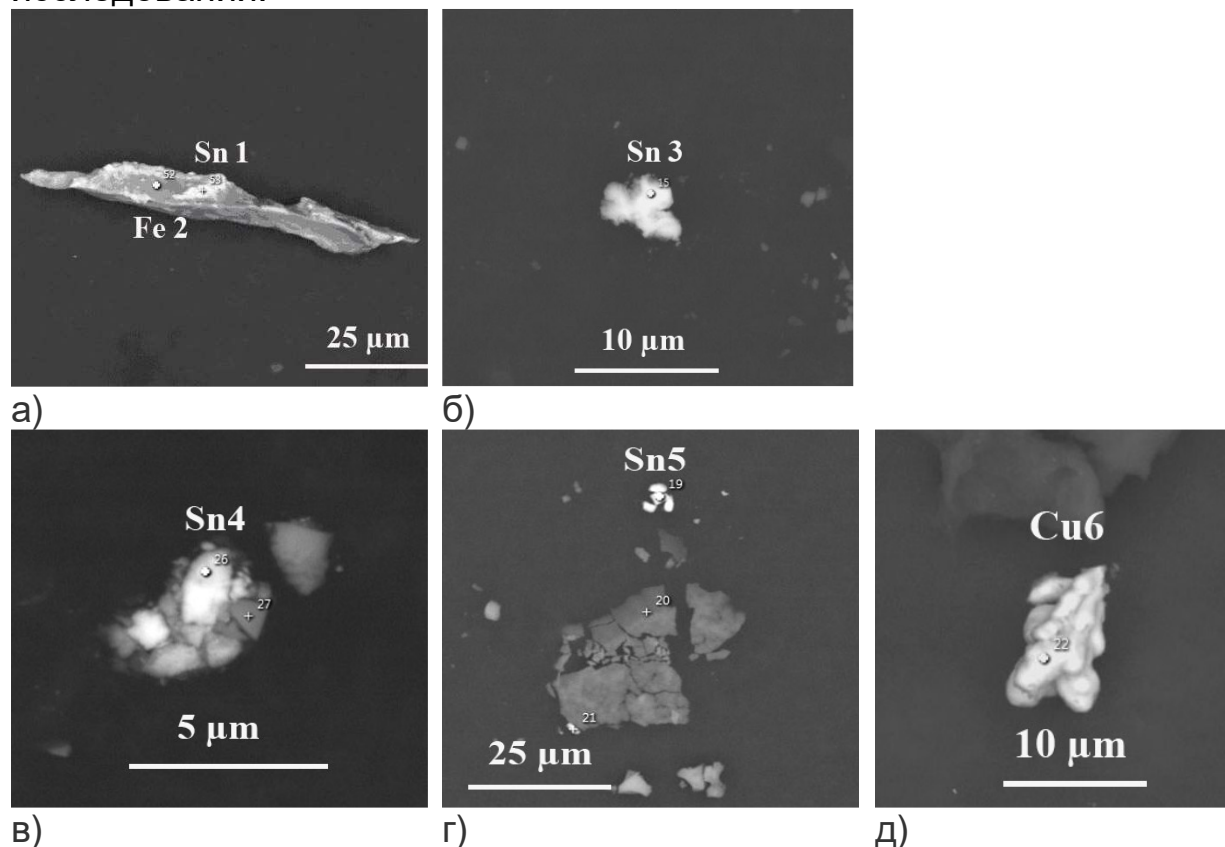


Рис.1: а) - плёнки Sn на Fe; в) - г – Sn в металлической и оксидной форме; д) частица Cu.

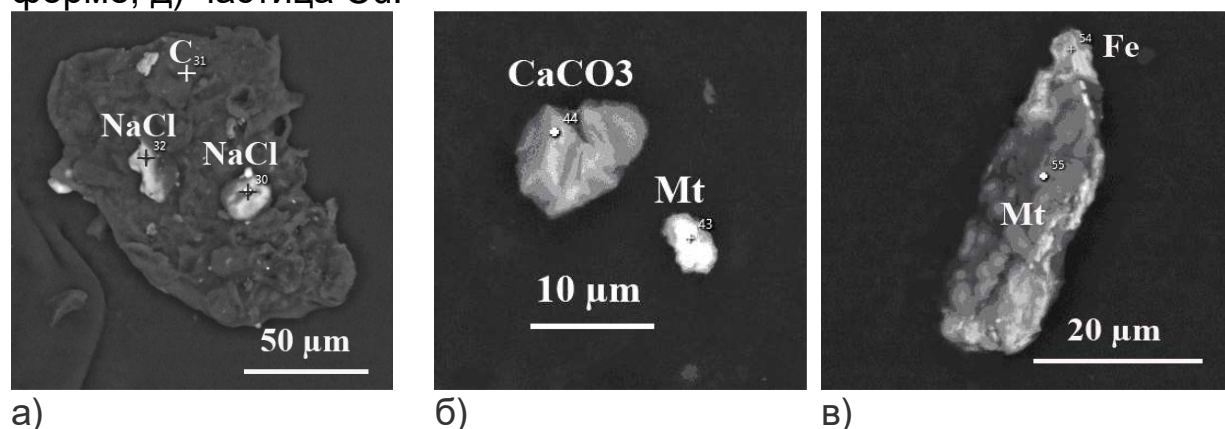


Рис. 2. Терригенные частицы: а) NaCl; б) CaCO<sub>3</sub>, Mt (магнетит); в) обломочный Mt с плёнкой Fe.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН и НИЦ КИ-ПИЯФ, а также и Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («Приоритет-2030»).*

## Литература

1. Бадюков Д.Д., Брандштеттер Ф., Топа Д. (2015) Тонкозернистые шлаковидные и непереплавленные микрометеориты: их источники и связь с космическими сферами. Геохимия. № 11, С. 1026–1039.
2. Alexander C.M.O.'D., Howard K.T., Bowden R., Fogel M.L. (2013). The classification of CM and CR chondrites using bulk H, C and N abundances and isotopic compositions // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. V. 123. P. 244–260.
3. Creech J.B. and Moynier F. (2019). Tin and zinc stable isotope characterisation of chondrites and implications for early Solar System evolution, *Chemical Geology*, 511\_81-90.
4. Wampler J., Thiemens M, Cheng S., Yimei Z., and Schullera I. (2020). Superconductivity found in meteorites. *Proceedings of the National Academy of Sciences*).

## THE FIRST DETECTION OF TIN AND COPPER PARTICLES IN THE MAGNETIC COMPONENT OF SPACE MATTER COLLECTED FROM ANTARCTICA BY A MAGNETIC TRAP

<sup>1</sup>Tselmovich V.A., <sup>2</sup>Kuzina D.M., <sup>3</sup>Muftakhetdinova R.F., <sup>3</sup>Yakovlev G.A., <sup>4</sup>Ezhov V.F., <sup>4</sup>Chetverikov Yu.O., <sup>3,4</sup>Bulat S.A.

<sup>1</sup>Geophysical Observatory "Borok" - branch of the IPE RAS,  
[tselm@mail.ru](mailto:tselm@mail.ru)

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

<sup>4</sup>National Research Center "Kurchatov Institute" - Petersburg Institute of Nuclear Physics named after B.P. Konstantinov, 188300 Gatchina, Russia

Antarctica is the best place to assess the amount and composition of incoming cosmic matter to Earth. The result of dust collection depends on the conditions and time of collection, including the trap's design. Dust collection using a trap from NdFeB magnets at Vostok station was carried out from 27.12.2023 to 23.01.2024. The microstructure and composition of 132 particles were analyzed by microscopic methods at Borok, UrFU, and KFU. Iron-containing (magnetic) particles of space dust (KP) or micrometeorites (MM) were found in the samples, similar to the same particles previously found by many authors who isolated them from various objects. The peculiarity of the particles we found in one of the samples was their content of tin (Sn) (in metallic and oxide forms) and (metallic) copper (Cu). Considering that Sn is extremely rare in meteorites, and the finds in the samples were multiple, we believe that they may be of both meteoritic and anthropogenic origin.



## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В КАССИТЕРИТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АПОСКАРНОВОГО-ОЛОВЯННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЗРАЧНОСТЬ И ЦВЕТ КРИСТАЛЛОВ

<sup>1</sup>**Чижова И.А.**, <sup>2</sup>**Петроченков Д.А.**

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), [tchijova@igem.ru](mailto:tchijova@igem.ru)

<sup>2</sup>Российский Государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), [p-d-a@mail.ru](mailto:p-d-a@mail.ru)

Месторождения апоскарнового-оловянного промышленного типа (АОПТ) развиты достаточно широко во всех оловоносных провинциях мира, составляя около 5% мировых запасов олова [Павловский, 2008]. Месторождения преимущественно комплексные, объектами добычи могут являться олово, бериллий, вольфрам, медь, мышьяк, цинк, иногда серебро, свинец, сурьма, железо.

Изучены содержания элементов-примесей в кристаллах касситерита месторождений Эренфидерсдорф (Германия), Питкяранта (Республика Карелия), Каньон (Магаданская область), относящиеся к редкометалльно-вольфрам-оловянной формации [Петроченков, 2019; Павловский, 2008]. Аналитические исследования по определению элементов-примесей в касситерите выполнены в ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт», аналитик А.М. Исмагулов. Определение содержания элементов осуществлялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, с приставкой лазерной абляции (ЛА-ИСП-МС). Полученные данные по содержанию элементов-примесей в кристаллах касситерита месторождений АОПТ обработаны методами математической статистики [Каждан и др., 2010].

Для выявления взаимосвязей между значениями содержаний элементов-примесей использовался факторный анализ (метод главных компонент), который позволил получить основные факторы, описывающие изменчивость выборки. В нашем случае получено 2 фактора, описывающих суммарно 62.8% изменчивости (рис.). Фактор 1 выделяет 2 ассоциации элементов взаимокоррелированных (Ti, V, Sb, U) и (Zr, Hf) и описывает 37.8% дисперсии выборки. Фактор 2 описывает 25% дисперсии выборки. Вдоль него происходит изменение содержаний элементов взаимокоррелированных (Ti, V, Nb) и (Fe, Sb). Это может быть рассмотрено как замещение элементов одной ассоциации на элементы другой ассоциации (модель привноса-выноса элементов).

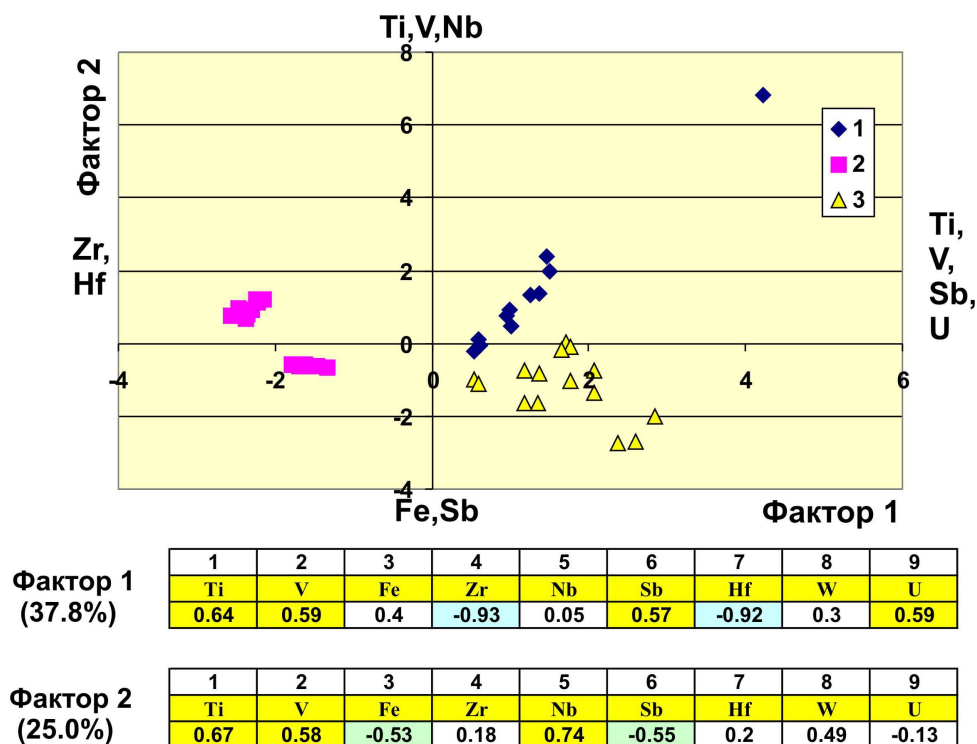


Рис. Положение кристаллов касситеритов месторождений АОПТ в пространстве факторов 1 и 2.

Месторождения: 1 – Эрэнфридерсдорф (12), 2-Питкьяранта (21), 3-Каньон (15). В скобках указано количество измерений.

На графике в координатах фактор1-фактор2 отображают наблюдаемые величины с целью представления в наглядной форме основную изменчивость выборки. На рисунке чётко видно, что кристаллы месторождения Эрэнфридерсдорф (1) и Каньон (3) расположились в правой части рисунка, что говорит о высоких содержаниях (Ti, V, Sb, U), и низких содержаниях (Zr, Hf). Одно измерение кристалла месторождения Эрэнфридерсдорф (1) имеет аномально высокие значения содержаний элементов (Ti, V, Nb) и резко отличается от остальных измерений (см. правый верхний угол рис.). Кристаллы месторождения Питкьяранта (2) расположились в левой части рисунка, что говорит о низких содержаниях (Ti, V, Sb, U) и высоких содержаниях (Zr, Hf).

*Содержание элементов-примесей в кристаллах касситерита различной прозрачности.* В непрозрачных кристаллах касситерита месторождений АОПТ сумма содержаний элементов-примесей в 3 раза, а сумма Fe и W в 7 раз, больше, чем в прозрачных. Это подчёркивает ведущую роль содержаний, в первую очередь, Fe и W (табл. 1). При этом содержания Fe в среднем отличаются в 1.8 раза, а W в 22 раза при значительных колебаниях значений.

Таблица 1. Содержание элементов-примесей в кристаллах касситерита различной прозрачности месторождений АОПТ

| Содержание элемента, мг/кг          |                    |                       |                       |                     |                   |                        |                    | Сумма элементов          | Сумма Fe, W             |
|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Ti                                  | V                  | Fe                    | Zr                    | Nb                  | Ta                | W                      | U                  |                          |                         |
| <b>Непрозрачные (9)<sup>1</sup></b> |                    |                       |                       |                     |                   |                        |                    |                          |                         |
| <u>0-7280</u> <sup>2</sup><br>1356  | <u>0-353</u><br>61 | <u>32-2433</u><br>380 | <u>24-1610</u><br>589 | <u>25-167</u><br>70 | <u>0-45</u><br>10 | <u>37-4913</u><br>1761 | <u>3-131</u><br>41 | <u>2621-9953</u><br>4277 | <u>928-5003</u><br>2141 |
| <b>Прозрачные (9)</b>               |                    |                       |                       |                     |                   |                        |                    |                          |                         |
| <u>0-1285</u><br>534                | <u>0-148</u><br>42 | <u>102-776</u><br>216 | <u>48-1140</u><br>523 | <u>0-37</u><br>9    | <u>0-21</u><br>3  | <u>0-520</u><br>79     | <u>0-58</u><br>9   | <u>1063-1853</u><br>1416 | <u>109-788</u><br>295   |

Примечание: 1 – количество точек наблюдения; 2 – над чертой крайние значения, под чертой – средние

Содержания Ti в непрозрачных зонах в среднем в 2.5 раза выше, чем в прозрачных при очень широком диапазоне отдельных значений. Содержания Nb и Ta отличаются существенно – в 8 и 3 раза, соответственно, но характеризуются низкими значениями, что ограничивает их роль. Содержания U в 4.6 раза выше в непрозрачных зонах при относительно низком содержании (табл. 1). Но при условии вхождения U в структуру кристалла, возможно, его роль на прозрачность окажется существенной.

*Содержания элементов-примесей в разноокрашенных кристаллах касситерита.* Чёрные непрозрачные зоны касситерита по сравнению с серыми прозрачными характеризуются большими значениями суммы содержаний элементов и Fe, W (табл. 2), определяющие их прозрачность. При этом в чёрных зонах содержания W высокие (в среднем 1977 мг/кг), а Fe невысокие (в среднем 124 мг/кг).

Таблица 2. Содержание элементов-примесей в кристаллах касситерита различной прозрачности месторождений АОПТ

| Содержание элемента, мг/кг                  |                    |                       |                       |                     |                   |                         |                    | Сумма элементов          | Сумма Fe, W             |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Ti  | V                  | Fe                    | Zr                    | Nb                  | Ta                | W                       | U                  |                          |                         |
| <b>Чёрные, непрозрачные (8)<sup>1</sup></b> |                    |                       |                       |                     |                   |                         |                    |                          |                         |
| <u>0-7280</u> <sup>2</sup><br>1457          | <u>0-353</u><br>63 | <u>32-398</u><br>124  | <u>24-1610</u><br>669 | <u>25-167</u><br>75 | <u>0-45</u><br>12 | <u>896-4913</u><br>1977 | <u>3-131</u><br>43 | <u>2621-9953</u><br>4419 | <u>928-5003</u><br>2100 |
| <b>Серые, прозрачные (1)</b>                |                    |                       |                       |                     |                   |                         |                    |                          |                         |
| 827   | 11                 | 191                   | 48                    | 37                  | 1                 | 520                     | 58                 | 1693                     | 711                     |
| <b>Коричневые, непрозрачные (1)</b>         |                    |                       |                       |                     |                   |                         |                    |                          |                         |
| 544   | 46                 | 2433                  | 31                    | 27                  | 1                 | 37                      | 22                 | 3141                     | 2470                    |
| <b>Оранжевые, прозрачные (8)</b>            |                    |                       |                       |                     |                   |                         |                    |                          |                         |
| <u>0-1285</u><br>497                        | <u>0-148</u><br>46 | <u>102-776</u><br>219 | <u>50-1140</u><br>582 | <u>0-25</u><br>6    | <u>0-21</u><br>3  | <u>0-108</u><br>24      | <u>0-9</u><br>3    | <u>1063-1853</u><br>1381 | <u>109-788</u><br>243   |

В серых зонах содержания W в 3.8 раза ниже, а Fe в 1.5 раза выше по сравнению с чёрными. Содержания Ti в чёрных и серых зонах относительно высокие – 1457 и 827 мг/кг, соответственно, при

очень широком диапазоне значений в отдельных точках чёрных зон (табл. 2). При этом часть из них имеют нулевые значения. Это указывает на ограниченную роль Ti на насыщенность серого цвета. Ведущая роль в насыщенности цвета от серого до чёрного принадлежит W. Определённую роль при высоких содержаниях могут оказывать Ti, Zr, U.

В коричневых непрозрачных зонах по сравнению с чёрными непрозрачными существенно возрастают содержания Fe (в 19.6 раза) и снижаются содержания W (в 53.4 раза), что указывает на ведущую роль Fe на образование красного цвета в касситерите.

В оранжевых прозрачных зонах по сравнению с коричневыми, непрозрачными существенно снижаются значения суммы элементов и Fe, W, соответственно, в 2.3 и 10.2 раза, что связано с их прозрачностью (табл. 2). Содержания Fe также существенно снижаются (в 11.1 раза), но остаются достаточно высокими (219 мг/кг). Содержания W низкие (24 мг/кг) и близки содержаниям в коричневых непрозрачных зонах. Красные оттенки касситерита определяются преимущественно содержаниями Fe. С увеличением содержания Fe от 100 мг/кг возрастает насыщенность цвета и снижается прозрачность.

### **Литература**

1. Каждан А.Б., Гуськов О.И., Шимановский А.А. Математические методы в геологии. Учебник для вузов. М.: Недра. 2010 – 251 с.
2. Петроченков Д.А. Коллекционные и ювелирные касситериты. М.: Горная книга. 2019 – 280 с.
3. Павловский А.Б. Минерально-сырьевая база мира и России: состояние, освоение и перспективы развития. «Минеральное сырьё». Серия геолого-экономическая, №27. М.: ВИМС. 2008 – 96 с.

### **FEATURES OF ELEMENTS-IMPURITY CONTENTS DISTRIBUTION IN CASSITERITE FROM APOSCARN TIN INDUSTRIAL TYPE DEPOSITS, THEIR INFLUENCE ON THE TRANSPARENCY AND COLOR OF THE CRYSTAL**

**<sup>1</sup>Chizhova I.A., <sup>2</sup>Petrochenkov D.A.**

<sup>1</sup>Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry Russian Academy of sciences (IGEM RAS), [tchijova@igem.ru](mailto:tchijova@igem.ru)

<sup>2</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), [p-d-a@mail.ru](mailto:p-d-a@mail.ru)

The elements-impurity connected to transparency and color of crystals cassiterite from aposcarn tin industrial type deposits are revealed.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В КАССИТЕРИТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОЛОВО-СИЛИКАТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЦВЕТ КРИСТАЛЛОВ

<sup>1</sup>**Чижова И.А.,** <sup>2</sup>**Петроченков Д.А.**

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), [tchijova@igem.ru](mailto:tchijova@igem.ru)

<sup>2</sup>Российский Государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), [p-d-a@mail.ru](mailto:p-d-a@mail.ru)

Олово-силикатный промышленный тип железисто-полиметалльной-оловянной формации является ведущим по разведанным запасам среди оловорудных месторождений мира. Попутными компонентами являются: медь, иногда цинк, висмут. Совместно с касситеритом в рудах присутствует также арсенопирит, халькопирит, станнин, висмутин, пирит, пирротин, галенит, сфалерит; из нерудных: кварц, карбонаты, хлорит, турмалин [Павловский, 2008].

Изучены содержания элементов-примесей в кристаллах касситерита месторождений Чурпунья (Республика Саха (Якутия)) и Валькумей (Чукотский национальный округ) [Геология, 2006]. На месторождении Чурпунья изучены 4 непрозрачных кристалла, размером около 3 мм, коричневого цвета; на месторождении Валькумей – 2 непрозрачных чёрного цвета кристалла, размером 5x8 и 8x12 мм. Аналитические исследования по определению элементов-примесей в касситерите выполнены в ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт», аналитик А.М.Исмагулов. Определение содержания элементов осуществлялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, с приставкой лазерной абляции (ЛА-ИСП-МС). Диаметр пятна лазерного луча составил 80 мкм. В каждой намеченной точке проводилось 3 измерения. Полученные данные по содержаниям элементов-примесей в кристаллах касситерита месторождений олово-силикатного промышленного типа обработаны методами математической статистики [Каждан, 2010].

Установлены устойчивые содержания элементов-примесей в касситерите обоих месторождений Ti, V, Fe, Zr, Nb, W, U. Sb фиксировалась во всех измерениях месторождения Чурпунья с содержанием от 28 до 107 мг/кг и отсутствует в касситерите месторождения Валькумей. В каждом из месторождений корреляционные связи элементов-примесей имеют свои особенности. Это может объясняться различными минеральными включениями, их количеством и различным процентом вхождения в

структуру касситерита. Установлены корреляционные связи положительные Zr и Nb; отрицательные V и Nb, Fe и Nb в целом для месторождений олово-силикатного типа.

Для выявления взаимосвязей между значениями содержаний элементов-примесей использовался факторный анализ (метод главных компонент), который позволил получить основные факторы, описывающие изменчивость выборки. В нашем случае получено 2 фактора, описывающих суммарно 77.6% изменчивости (рис.). Фактор 1 выделяет 2 ассоциации элементов взаимокоррелированных (Ti, Zr, Nb, W) и (Fe, Sb) и описывает 53.5% дисперсии выборки. Фактор 2 описывает 24.1% дисперсии выборки. Вдоль него происходит изменение содержаний элементов (W, U) и V. Это может быть рассмотрено как замещение элементов одной ассоциации на элементы другой ассоциации (модель привноса-выноса элементов).

На графике в координатах фактор1-фактор2 отображаются наблюдаемые величины с целью представления в наглядной форме основную изменчивость выборки. На рисунке чётко видно, что кристаллы месторождений Чурпунья (1) и Валькумей (2) имеют

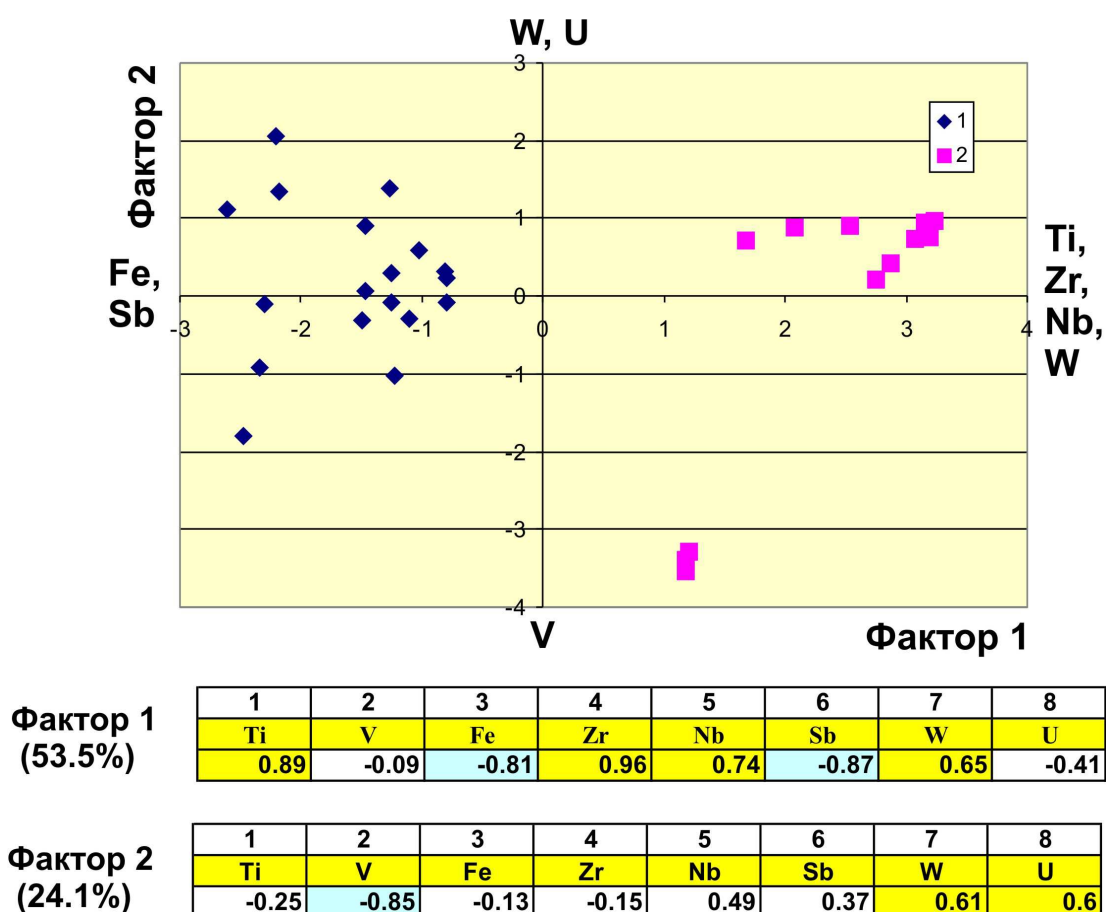


Рис. – Положение кристаллов касситерита месторождений олово-силикатного промышленного типа в пространстве факторов 1 и 2. Месторождения: 1-Чурпунья (18), 2-Валькумей (12). В скобках указано количество измерений.

различное положение: Чурпунья (1) в левой части рисунка, что говорит о низких содержаниях (Ti, Zr, Nb, W) и высоких содержаниях (Fe, Sb); Валькумей (2) в правой части рисунка, что говорит об обратной тенденции – высоких содержаниях (Ti, Zr, Nb, W) и низких содержаниях (Fe, Sb). Таким образом, отличительными геохимическими признаками различия месторождений являются высокие содержания Ti, Zr, Nb, W при низких Fe и Sb, а также высокие содержания W, U при низких V.

Приведённые данные указывают, с одной стороны, на близкий состав элементов-примесей в касситерите месторождений, с другой – на существенное различие в значениях их содержаний. Это может объясняться различными концентрациями элементов в рудообразующих растворах и условиями кристаллизации касситерита в месторождениях.

*Содержания элементов-примесей в разноокрашенных кристаллах касситерита.* В изученных кристаллах касситерита месторождений олово-силикатного типа выделены непрозрачные чёрные и коричневые зоны, которые характеризуются высокими значениями суммы содержаний элементов и суммы Fe и W (табл. 1).

Таблица 1. Содержание элементов-примесей в разноокрашенных кристаллах касситерита месторождений олово-силикатного промышленного типа

| Содержание элемента, мг/кг                  |                     |                         |                       |                    |                   |                          |                    | Сумма элементов          | Сумма Fe, W              |
|---|---------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ti  | V                   | Fe                      | Zr                    | Nb                 | Sb                | W                        | U                  |                          |                          |
| <b>Чёрные, непрозрачные (6)<sup>1</sup></b> |                     |                         |                       |                    |                   |                          |                    |                          |                          |
| <u>2743-4013</u> <sup>2</sup><br>3400       | <u>2-21</u><br>11   | <u>157-206</u><br>177   | <u>198-275</u><br>242 | <u>29-67</u><br>54 | 0                 | <u>2223-3010</u><br>2554 | <u>10-34</u><br>25 | <u>6170-6998</u><br>6463 | <u>2415-3159</u><br>2731 |
| <b>Коричневые, непрозрачные (4)</b>         |                     |                         |                       |                    |                   |                          |                    |                          |                          |
| <u>384-4160</u><br>1053                     | <u>20-165</u><br>53 | <u>283-3930</u><br>1789 | <u>6-231</u><br>43    | <u>3-28</u><br>16  | <u>0-70</u><br>48 | <u>20-901</u><br>452     | <u>3-81</u><br>41  | <u>1479-5165</u><br>3495 | <u>593-4312</u><br>2241  |

Примечание: 1 – количество точек наблюдений; 2 – над чертой крайние значения, под чертой – средние

В чёрных зонах сумма элементов в 1.8 раза выше, чем в коричневых, а суммы содержаний Fe и W близки. При этом существенно различаются средние значения содержаний отдельных элементов, при больших колебаниях в различных точках. Содержания V, Nb, U низкие, не превышающие 54 мг/кг, что позволяет считать их роль на цвет кристаллов очень ограниченной. Определяющую роль на чёрные и коричневые цвета касситерита, несомненно, оказывают Fe и W. В чёрных зонах средние содержания Fe в 10.1 раза ниже, а W в 5.7 раза выше, чем в коричневых. Таким образом, красные оттенки связаны с Fe, а чёрные с W. Определённую роль на насыщенность серого цвета



оказывают и высокие содержания Ti, средние содержания которого в чёрных зонах в 3.2 раза выше, чем в коричневых, хотя максимальное значение (4160 мг/кг) фиксируется в коричневой зоне. Отметим, что в этой точке фиксируются также повышенные содержания Zr (231 мг/кг), Fe (583 мг/кг), низкие W (20 мг/кг), а сама зона характеризуется слабой насыщенностью коричневого цвета. Роль содержания Zr на цвет кристалла ограничена. Zr оказывает влияние, по-видимому, на насыщенность серого цвета. В чёрных зонах среднее содержание Zr в 5.6 раза выше, чем в коричневых, и составляет 242 мг/кг (табл. 1).

Основными элементами, определяющими прозрачность касситерита, являются Fe и W, для которых характерны высокие содержания и, в первую очередь, их сумма. Несмотря на высокие содержания Ti, его роль на прозрачность касситерита ограничена. Также ограничена роль других элементов, в первую очередь из-за невысоких содержаний. Определяющую роль на чёрный цвет кристаллов оказывает W, а на коричневый Fe. Определённую роль на насыщенность серого цвета оказывают и высокие содержания Ti, V и Zr.

### Литература

1. Геология оловорудных месторождений СССР / Под.ред. С.Ф. Лугова. – Т.2. Кн.1. Оловорудные месторождения СССР. М.: Недра. 1986 – 429 с.
2. Каждан А.Б., Гуськов О.И., Шимановский А.А. Математические методы в геологии. Учебник для вузов. М.: Недра. 2010 – 251 с.
3. Павловский А.Б. Минерально-сырьевая база мира и России: состояние, освоение и перспективы развития. «Минеральное сырьё». Серия геолого-экономическая, №27. М.: ВИМС. 2008 – 96 с.

### FEATURES OF ELEMENTS-IMPURITY CONTENTS DISTRIBUTION IN CASSITERITE FROM TIN SILICATE INDUSTRIAL TYPE DEPOSITS, THEIR INFLUENCE ON THE COLOR OF THE CRYSTAL

<sup>1</sup>**Chizhova I.A.**, <sup>2</sup>**Petrochenkov D.A.**

<sup>1</sup>Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry Russian Academy of sciences (IGEM RAS),  
[tchijova@igem.ru](mailto:tchijova@igem.ru)

<sup>2</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), [p-d-a@mail.ru](mailto:p-d-a@mail.ru)

The elements-impurity connected to color of crystal cassiterite from tin silicate industrial type deposits are revealed.

## НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Чирков Е.Б.**

Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), [ye\\_chirkov@list.ru](mailto:ye_chirkov@list.ru)

Отличия нового взгляда на краткосрочный прогноз землетрясений можно сформулировать следующим образом: «Краткосрочный прогноз возможен, краткосрочные предвестники представляют из себя проявления распространения деформационной волны от будущего очага землетрясения, вызванной разделением консолидированной неоднородности на внутреннюю и внешнюю части и являются естественным индикатором начала распада консолидированной неоднородности (2 этапа по теории Добровольского) [Добровольский, 2009]».

Идейно данный взгляд базируется на новой парадигме краткосрочного прогноза (объясняющей природу и причину возникновения краткосрочного предвестника), метаалгоритмическом подходе (объясняющем необходимость использования серии независимых измерений для установления закономерности в геофизических данных из-за наличия неустранимой погрешности связанной с неполной известностью строения среды), аккуратном выполнении общих требований К.Клаассена [Клаассен, 2012] к измерениям (наличие измеряемого объекта, избирательности измерений и объективности измерений) для краткосрочных предвестников землетрясения и экспериментально подтверждается феноменологией проявлений краткосрочных предвестников, данными измерений SES [Чирков, 2023] и мониторинга КС в водонасыщенной скважине [Chirkov, Idarmachev, 2021].

Информация о картине пространственного хода краткосрочного предвестника должна позволить ориентировочно оценить место будущего очага (по зафиксированным направлениям распространения краткосрочных предвестников), ожидаемую магнитуду (по скорости распространения предвестников), а сам факт появления краткосрочных предвестников свидетельствует о близости момента землетрясения. В виду механического распространения волны деформации, крупные тектонические разломы могут гасить распространение предвестника с некоторых направлений. Деформационные явления другой природы являются помехой,

Главной причиной кризиса в краткосрочном прогнозе является несоответствие экспериментальным данным интуитивной модели источника предвестникового сигнала расположенного в очаге землетрясения [Чирков, 2021а].

Из-за неработоспособности критериев неосознаваемой парадигмы стало невозможным априорное выделение предвестников, осталась лишь возможность апостериорно сопоставлять ряды землетрясений и субъективно выделенных предвестников.

По этой причине нами была предложена новая парадигма краткосрочного прогноза [Чирков, 2021б]. Поскольку существование процесса подготовки, связанное с накоплением в коре упругой энергии под действием мантийной конвекции можно считать установленным фактом, также как выделение этой накопленной упругой энергии в акте землетрясения можно предположить, что предвестниковые явления имеют изначально механическую природу. В механическом плане при малых вариациях НДС именно трещиноватость среды дает наиболее сильные вариации её свойств.

Заметим, что наиболее распространённые предвестники могут быть объяснены малыми вариациями НДС трещиноватой среды (аномалии в кажущемся сопротивлении, газовых эманациях и уровне воды - изменением емкости и проницаемости трещинного пространства; аномалии в ЭМИ, акустической эмиссии и сейсмoeлектрических сигналах (SES) вариацией излучения трещин являющихся естественными концентраторами напряжений) [Чирков, 2021б].

Поскольку сам факт существования этих предвестниковых явлений и соответственно вызывающих их локальных деформационных процессов установлен по огромному массиву предвестниковых проявлений, то разумно предположить, что их распространение от очага до точки наблюдения также осуществляется механическим путем.

Бухтообразная форма краткосрочных предвестников позволяет предположить волновое распространение предвестников. Наблюдаемая большая длительность бухт и значительные сдвиги во времени проявления в разных пунктах наблюдения могут быть объяснены малой скоростью распространения возмущений отличающих распространение хорошо известных деформационных волн в Земле.

Содержательно эти представления полностью переориентируют поиск предвестников с эффектов, возникающих при разрушении образцов, на эффекты, возникающие при малых линейных деформациях трещиноватой среды и, исходя из наличия и влияния одного свойства среды – трещиноватости, объясняют весь цикл тектонического землетрясения, природу и все феноменологические проявления краткосрочных предвестников.

О существовании деформационных волн разгрузки свидетельствует стопроцентная повторяемость появления деформационных волн при промышленных взрывах, зарегистрированных мной и Шамилем Идармачевым при мониторинге SES в более чем в десяти экспериментах в Тырнаузе [Булошников и др., 1987].

Поскольку объект исследования-локальные деформации трещиноватой среды известен, все требования К.Клаассена к измерениям могут быть удовлетворены, что и было реализовано для измерения КС в водонасыщенной скважине на Чиркейском водохранилище (контроль вариации геометрии трещин) и мониторинге SES на установке профессора Варотсоса в Карымшино (контроль излучения трещин). При этом вследствие того, что мониторинг SES позволяет оценивать пространственную динамику источников на площадках в сотни метров [Chirkov, 2004] устранялись электрические помехи сходной морфологии (сигналы смены нагрузки электропоездов и внезапные начала магнитных бурь. При измерении КС в скважине контролируется геометрия трещин практически в точке. Расположение группой Шамиля Идармачева измерительной установки КС под уровнем воды в скважине позволило исключить основную помеху, влияющую на КС - изменение влажности, использовался метод главных компонент для исключения в линейном приближении влияния изменения минерализации воды, вариаций уровня воды в скважине и атмосферного давления. Для обоих методов имелись длительные ряды данных, что позволило оценить законы распределения измеряемых компонент для формализованного выделения аномалий сигналов. На Чиркейском водохранилище была получена компонента деформации, связанная с подготовкой землетрясений и в ней формально выделены аномалии от всех локальных землетрясений, причем аномалия деформации от удаленного и слабого события выделена после него [Chirkov, Idarmachev, 2021].

### **Литература**

1. Булошников А.М., Висковский А.Ю., Волкова Е.М., Гохберг М.Б., Гусева Т.В., Камшилин А.Н., Козлов А.М., Сидоров В.Л., Сквородкин Ю.П., Чирков Е.Б. Сейсмoeлектромагнитные и деформационные эффекты при активном воздействии на геофизическую среду. М.: ИФЗ АН СССР, 1987. 34 с.
2. Добровольский, И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения / И. П. Добровольский. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 240 с. — ISBN 978-5-9221-1180-5.

3. Чирков Е.Б. (2021a) Проблемы краткосрочного прогноза: содержательный аспект // Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100, № 1. С.5–24. <https://doi.org/10.21455/std2021.1-2>
4. Чирков Е.Б.(2021б) Новая парадигма краткосрочных предвестниковых исследований. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов" Петропавловск -Камчатский, 26 сентября, 2 октября 2021 г. С.125-132.
5. Клаассен К. Основы измерений. Датчики и электронные приборы: учебное пособие. Интеллект, 2012, 352 стр. УДК: 531.7+621.317.3
6. Чирков Е.Б. Метаалгоритмический подход к формализации разработки геофизических методов Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (к 105-летию МГРИ), г. Москва, 6-7 апреля 2023. Т5 С. 379-382
7. Чирков Е.Б. Формализация анализа источников SES активности для оперативного контроля вариаций НДС. Материалы Двадцать четвертой международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». г.Москва, 25-27 сентября, Борок, 29 сентября 2023г. Издательство ФГБУ "Издательство "Наука" (Москва). С.316-319.
8. Chirkov Ye. B. The study of local sources of ULF geoelectric signals with steep fronts, Annals of Geophysics, -Vol.47, N.1, February 2004, - P.213-227.
9. E.B. Chirkov and I.Sh. Idarmachev 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 929 012021 DOI 10.1088/1755-1315/929/1/01202

## A NEW LOOK AT SHORT-TERM EARTHQUAKE FORECASTING

**Chirkov E.B.**

Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (IPE RAS), [ye\\_chirkov@list.ru](mailto:ye_chirkov@list.ru)

The differences of the new view on short-term earthquake forecasting can be briefly formulated as follows: "Short-term forecasting is possible, short-term precursors are manifestations of the spread of a deformation wave from the future source of an earthquake, caused by the division of consolidated heterogeneity into internal and external parts and are a natural indicator of the beginning of the disintegration of consolidated heterogeneity". The validity of the new view on short-term forecasting is experimentally confirmed by the phenomenology of short-term precursor manifestations, SES measurement data and the results of apparent resistivity monitoring in a water-saturated well.

# СВЯЗЬ МЕЖДУ РЕЖИМОМ НАГРУЖЕНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

<sup>1,2</sup>Шихова Н.М., <sup>1,2</sup>Патонин А.В., <sup>1</sup>Фокин И.В.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук (ГО «Борок» ИФЗ РАН), пос.Борок, Ярославская обл., Россия, [patonin\\_borok@mail.ru](mailto:patonin_borok@mail.ru)

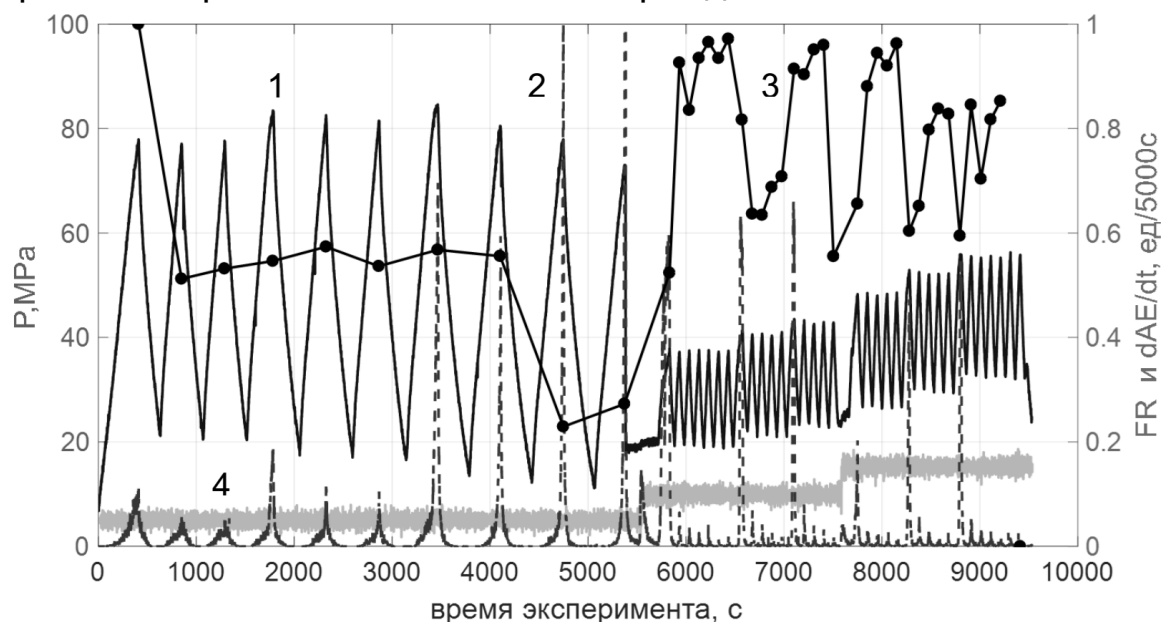
Оценка поведения горных пород под действием механических нагрузок играет ключевую роль в геомеханике и петрофизике, особенно в контексте процессов, сопровождающихся циклическими или ступенчатыми изменениями напряжённого состояния — таких как гидроразрыв пласта, индуцированная сейсмичность и эксплуатация подземных сооружений [Zoback, 2007]. Акустическая эмиссия (АЭ) позволяет отслеживать эволюцию повреждённости в реальном времени и является мощным инструментом диагностики предразрушенных состояний [Carpinteri et.al., 2006]. Большинство исследований фокусируются на отдельных параметрах, таких как b-value или коэффициент фелисити, и не сравнивают поведение различных материалов при схожих режимах нагружения [Behnia et.al., 2014]. В настоящей работе представлено сравнительное исследование динамики АЭ в экспериментах с циклическим режимом нагружения на песчаниках Buffalo и Castlegate, отличающихся своей литологией.

Эксперименты проводились на электрогидравлическом прессе Инова с программным управлением позволяющим реализовать различные режимы нагружения. Режим нагружения начинался с циклического этапа при постоянном конфайнинге (~5 МПа), затем переходил в пилообразный режим с постепенным нарастанием максимального уровня напряжения. На последующих стадиях конфайнинг ступенчато повышается до 15-20 МПа, что позволяет исследовать влияние изменения напряжённого состояния на поведение зоны разрыва.

Регистрация акустической эмиссии выполнялась с помощью 16 пьезоэлектрических датчиков, обеспечивающих высокую точность 3D-локации событий. Для каждого эксперимента в скользящем окне из 100–300 событий определялись: коэффициент фелисити (FR), среднее расстояние от событий до плоскости разрыва, доля событий в центральном кластере, интенсивность АЭ ( $dAE/dt$ ) и механизмы очагов (Т-, S-, С-типы). Корреляционная фрактальная

размерность  $Df$  оценивалась по числу пар гипоцентров с расстоянием  $d \leq r$ .

На рис. 1 показаны изменения FR при разрушении песчаника Buffalo. Уже на первом цикле нагружения FR снижается с начального значения  $\sim 1.0$  до  $\sim 0.5$ , что отражает переход от чисто упругой деформации к стадии активного микроразрушения. В момент разрушения FR достигает минимального значения ( $\sim 0.25$ – $0.3$ ), что соответствует полной деградации структуры и каскадному развитию трещин. Несмотря на рост  $P_c$  ( $5 \rightarrow 10 \rightarrow 15$  МПа), восстановления FR не происходило, что указывает на низкую способность материала к перераспределению напряжений, вероятно, из-за низкой проницаемости. После разрушения и сброса нагрузки FR восстанавливался до  $\sim 0.9$ , но это отражало лишь временную стабилизацию системы, а не восстановление прочности материала. При повторном нагружении FR снова падал (рис.1), что говорит о необратимом накоплении повреждений.



**Рис. 1.** Изменения осевой нагрузки (1), интенсивности АЕ(2), коэффициента Фелисити (3), всестороннего давления (4) в эксперименте по разрушению песчаника Buffalo.

В эксперименте на слабосцементированном песчанике Castlegate наблюдались аналогичные начальные процессы: FR также снижался с  $\sim 1.0$  до  $\sim 0.3$  уже на ранней стадии при  $P_c = 5$  МПа, что свидетельствует о быстрой активации микротрещин. Однако с каждым последующим повышением  $P_c$  (10, 15, 20, 25 МПа) FR монотонно восстанавливался и стабилизировался на уровне  $\sim 0.8$ – $0.9$ . Это свидетельствует о том, что, несмотря на слабую цементацию, высокая проницаемость породы позволяет эффективно перераспределять напряжения и закрывать трещины



под действием растущего всестороннего давления. Такое поведение характерно для пород, способных к структурной адаптации, даже при низкой прочности. Как показывают исследования [Baud et al., 2004], развитие зон уплотнения в песчаниках (включая Castlegate) под высоким конфинингом представляет собой механизм аккомодации деформации, позволяющий материалу выдерживать высокие дифференциальные напряжения без катастрофического разрушения.

Анализ пространственно-временной динамики АЭ показал, что в ходе нагружения происходит систематическая локализация повреждений. Уменьшение  $D_f$  от 2.7 до 2.0 указывает на переход от диффузного распределения микротрещин в начале эксперимента к формированию упорядоченной структуры, связанной с зарождением магистрального разрыва. Параллельно уменьшается среднее расстояние  $d$  от гипоцентров событий до аппроксимирующей плоскости разрыва, определённой в момент разрушения. Высокая корреляция между  $D_f$  и  $d$  ( $r = 0.9$ ) подтверждает, что  $D_f$  является надёжным индикатором пространственной упорядоченности повреждений, а не просто абстрактной мерой сложности.

В эксперименте на песчанике Castlegate динамика пространственной локализации отличается по характеру:  $D_f$  резко падает до 1.6, а расстояние до плоскости разрыва достигает минимальных значений уже за несколько циклов до разрушения. Это указывает на быструю и катастрофическую локализацию, типичную для слабосцементированных пород. После разрушения активность сохраняется вдоль плоскости разрыва, что проявляется в стабильно низком расстоянии до нее гипоцентров и высокой плотности событий.

Сравнительный анализ показал, что динамика FR определяется не столько степенью цементации породы, сколько её способностью к перераспределению напряжений и адаптации под изменяющимся всесторонним давлением. Несмотря на слабую цементацию, песчаник Castlegate демонстрирует восстановление FR при росте  $P_c$ , что свидетельствует о высокой проницаемости и способности к структурной адаптации. Напротив, Buffalo, несмотря на прочную цементацию, проявляет падение FR и отсутствие восстановления даже при росте  $P_c$ , что указывает на низкую проницаемость и склонность к локализации повреждений. Рассмотренные характеристики АЭ формируют единый диагностический комплекс, позволяющий надёжно выявлять приближение к разрушению: падение FR → активация и накопление микроповреждений, снижение  $D_f$  → пространственная локализация трещин, изменение типа очагов → переход от диффузного разрушения к макроразрыву.

Полученные данные подтверждают, что для надёжного прогноза устойчивости горных пород необходимо учитывать не только напряжённое состояние, но и внутренние петрофизические свойства — проницаемость и чувствительность к конфинингу. Это позволяет создать комплексные критерии мониторинга для лабораторий и промыслов — например, при гидроразрыва пласта, устойчивости скважин и прогнозе сейсмичности.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.*

### Литература

1. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2007. 461 p.
2. Carpinteri, A., Lacidogna, G., Niccolini, G. Critical behavior in concrete structures and damage localization by Acoustic Emission. *Key Engineering Materials*, 2006. V. 312. P.305–310.
3. Behnia, A., Chai, H.K., Shiotani, T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 2014. V.65. P. 282–302.
4. Baud, P., Klein, E., Wong, T.-F. Compaction localization in porous sandstones: Spatial evolution of damage and acoustic emission activity // *Journal of Structural Geology*. 2004. Vol. 26, № 4. P. 603–624.

### RELATIONSHIP BETWEEN LOADING REGIME AND SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF ACOUSTIC EMISSION IN ROCKS <sup>1,2</sup>**Shikhova N.M.**, <sup>1,2</sup>**Patonin A.V.**, <sup>1</sup>**Fokin I.V.**

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (GO Borok IPE RAS), Moscow, Russia, [patonin\\_borok@mail.ru](mailto:patonin_borok@mail.ru)

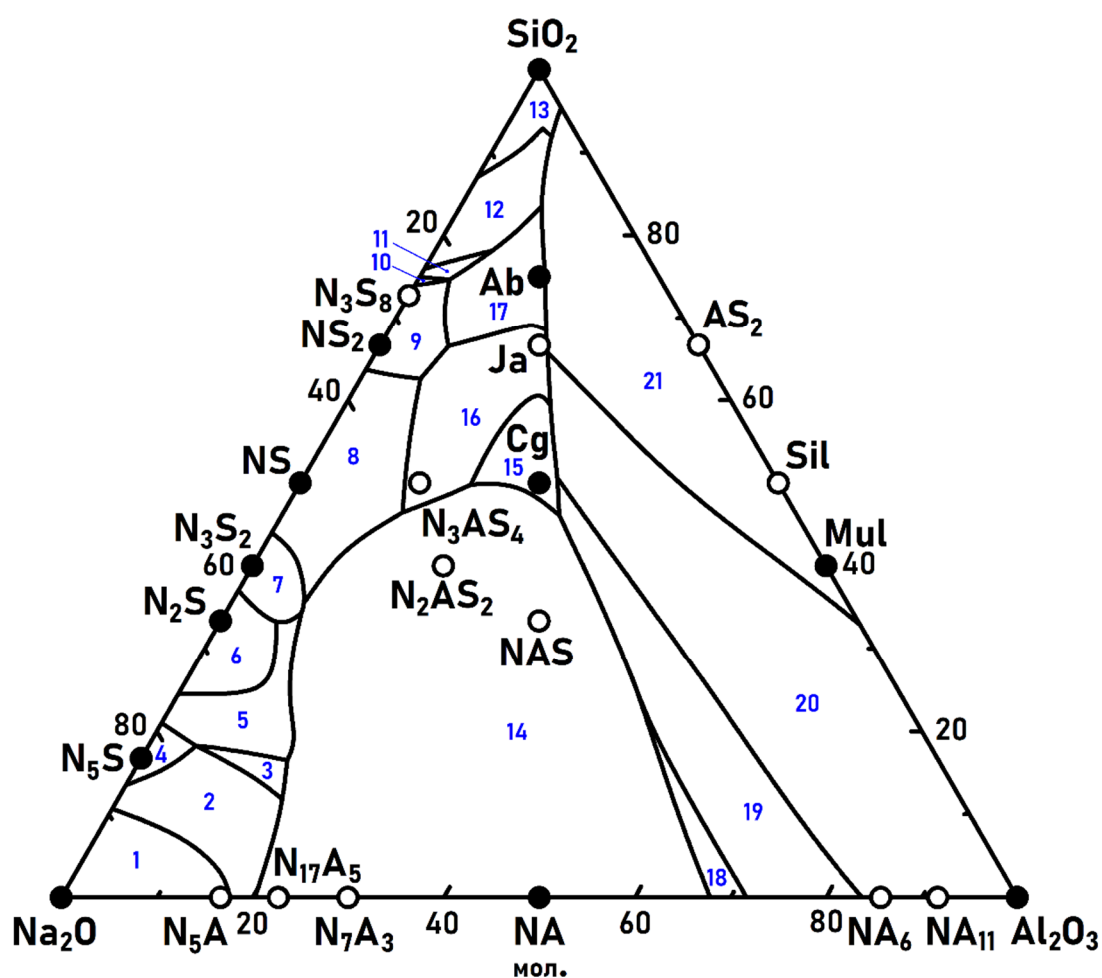
Cyclic loading tests on Buffalo and Castlegate sandstones with AE analysis reveal distinct failure behaviors. Castlegate fails rapidly at low confinement but partially recovers with increasing pressure; Buffalo degrades irreversibly despite high strength. Focal mechanism evolution (tensile → shear → collapse) tracks progressive failure. Higher confinement delays but does not prevent failure. Rock stability is critically dependent on permeability and sensitivity to confining pressure. Results are relevant for hydraulic fracturing, seismicity monitoring, and underground construction.

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

**Шорников С.И.**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
РАН, Москва, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com)

В системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  установлены карнегит (нефелин)  $\text{NaAlSiO}_4$ , альбит (натриевый полевой шпат)  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (плавятся конгруэнтно при температурах 1793 и 1393 К) и жадеит  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  (диссоциирует при температуре 771 К) (рис. 1). В литературе также упоминаются соединения  $\text{Na}_3\text{AlSi}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Na}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$  и  $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{SiO}_6$  [Торопов и др., 1972; Бережной, 1988].



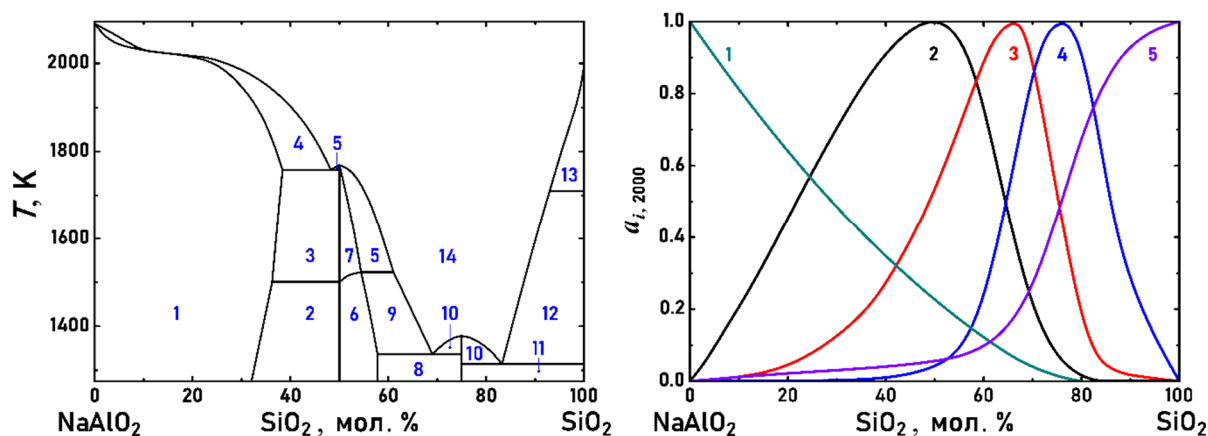
**Рис. 1.** Диаграмма состояния системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  [Nekhoroshev, 2019]:  $\alpha\text{-Na}_2\text{O}$  (1);  $\beta\text{-Na}_2\text{O}$  (2);  $\gamma\text{-Na}_2\text{O}$  (3);  $\text{Na}_{10}\text{SiO}_7$  (4);  $\beta\text{-Na}_4\text{SiO}_4$  (5);  $\alpha\text{-Na}_4\text{SiO}_4$  (6);  $\text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$  (7);  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (8);  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  (9);  $\text{Na}_6\text{Si}_8\text{O}_{19}$  (10);  $\text{SiO}_2$  (Qv) (11);  $\text{SiO}_2$  (Trd) (12);  $\text{SiO}_2$  (Crs) (13);  $\text{NaAlO}_2$  (14);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Cg) (15);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Ne) (16);  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (Ab) (17);  $\text{Na}_2\text{Al}_{12}\text{O}_{19}$  (18);  $\text{Na}_2\text{Al}_{22}\text{O}_{34}$  (19);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20);  $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$  (21). Сплошными символами обозначены конгруэнтно плавящиеся, незакрашенными – разлагающиеся при плавлении соединения.

Термодинамические данные, о соединениях и расплавах системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  рассмотрены в обзорах [Lambotte, Chartrand, 2013; Utlak, Besmann, 2018; Nekhoroshev, 2019].

В настоящей работе термодинамические свойства расплавов в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  в области температур 1300–2200 К были рассчитаны с использованием разработанной модели [Shornikov, 2019]. Параметрами модели являлись стандартные энергии Гиббса образования простых оксидов и их соединений в кристаллическом и жидком состоянии, определенные на основании экспериментальных и теоретических данных [Barin, 1995; Shornikov, 2004, 2014; Shornikov et al., 2022]. Результаты расчетов сопоставлены с имеющейся физико-химической информацией на рис. 2–5.

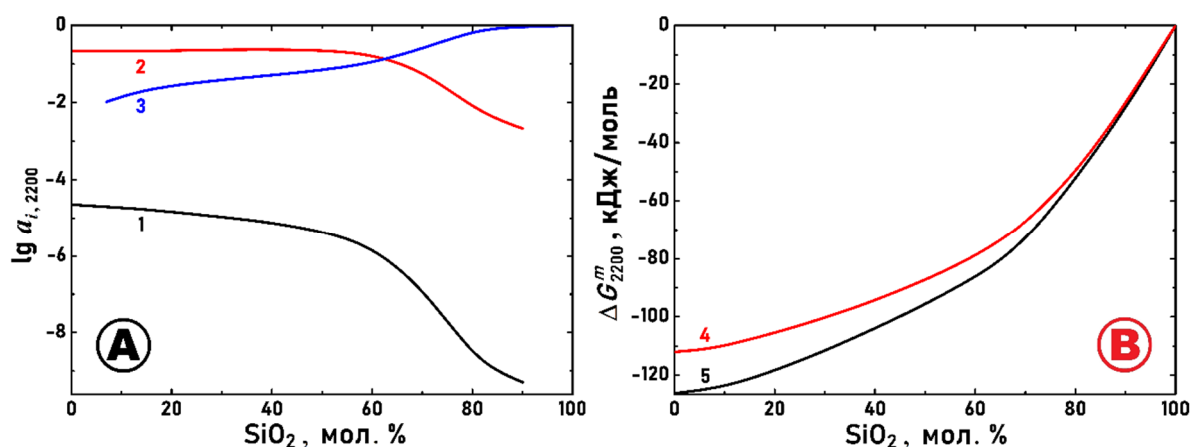
Представленной на рис. 2 диаграмме состояния системы  $\text{NaAlO}_2-\text{SiO}_2$  удовлетворительно соответствуют положения максимальных значений активностей соединений ( $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{NaAlSiO}_4$ ,  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  и  $\text{SiO}_2$ ) в расплавах (рис. 3), рассчитанных на основании величин активностей простых оксидов (рис. 4A).

Активность  $\text{Na}_2\text{O}$  в расплавах системы  $\text{NaAlO}_2-\text{SiO}_2$  низка по сравнению с активностями  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  (рис. 4A), а также симбатна активности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и антибатна активности  $\text{SiO}_2$  как и в случае расплавов системы  $\text{KAlO}_2-\text{SiO}_2$ , обладающих более низкой энергией смешения ( $\Delta G^m$ ) вследствие более сильного химического взаимодействия компонентов расплава (рис. 4B).



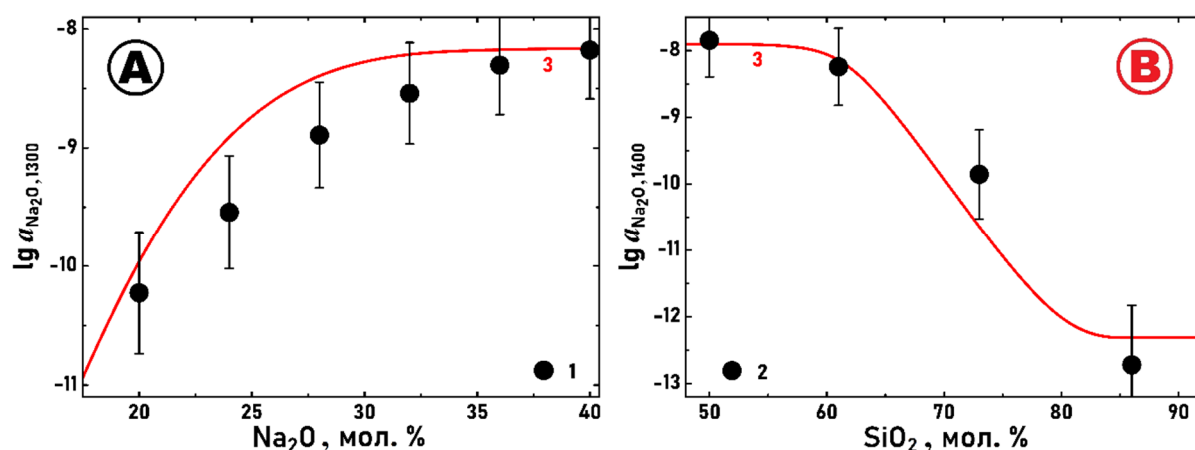
**Рис. 2.** Диаграмма состояния системы  $\text{NaAlO}_2-\text{SiO}_2$  [Nekhoroshev, 2019]:  $\text{NaAlO}_2$  (1);  $\text{NaAlO}_2 + \text{NaAlSiO}_4$  (Ne) (2);  $\text{NaAlO}_2 + \text{NaAlSiO}_4$  (Cg) (3);  $\text{NaAlO}_2 + \text{жидкость}$  (4);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Cg) + жидкость (5);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Ne) (6);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Cg) (7);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Ne) +  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (8);  $\text{NaAlSiO}_4$  (Ne) + жидкость (9);  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{жидкость}$  (10);  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{SiO}_2$  (trd) (11);  $\text{SiO}_2$  (trd) + жидкость (12);  $\text{SiO}_2$  (crs) + жидкость (13); жидкость (14).

**Рис. 3** Активности  $\text{NaAlO}_2$  (1),  $\text{NaAlSiO}_4$  (2),  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  (3),  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (4) и  $\text{SiO}_2$  (5) в расплавах системы  $\text{NaAlO}_2-\text{SiO}_2$  при температуре 2000 К.



**Рис. 4.** Активности  $\text{Na}_2\text{O}$  (1),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2) и  $\text{SiO}_2$  (3) (A) и энергия смешения (4, 5) в расплавах систем  $\text{NaAlO}_2\text{-SiO}_2$  (1–4) и  $\text{KAlO}_2\text{-SiO}_2$  (5) при температуре 2200 К.

Результаты расчетов, выполненных в настоящей работе, удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, полученным методом ЭДС [Kozhina, Shultz, 2000] и масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена [Rys, 2007], экстраполированным к температуре 1400 К (рис. 5). Проведенная в настоящей работе экстраполяция (рис. 5B) была обусловлена искажениями величин парциальных давлений атомарного натрия, определенных над расплавами системы  $\text{NaAlSiO}_4\text{-SiO}_2$  в работе [Rys, 2007] в интервале температур 1600–1900 К, вследствие фракционирования состава расплава при высоких температурах, на что также указывалось и в обзоре [Nekhoroshev, 2019].



**Рис. 5.** Активность  $\text{Na}_2\text{O}$  в расплавах систем  $\text{Na}_4\text{Si}_3\text{O}_8\text{-Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$  (A) и  $\text{NaAlSiO}_4\text{-SiO}_2$  (B) при температурах 1300 и 1400 К, определенная методом ЭДС [Kozhina, Shultz, 2000] (1) и масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена [Rys, 2007] (2), а также рассчитанная в настоящей работе (3).

## Литература

1. Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы / Киев: Наук. думка, 1988. 200 с.
2. Торопов Н.А., Барзаковский В.П., Лапин В.В., Курцева Н.Н., Бойкова А.И. Диаграммы состояния силикатных систем. Тройные силикатные системы / Л.: Наука, 1972. 448 с.
3. Barin I. Thermochemical data of pure substances / Weinheim: VCH, 1995. 1885 p.
4. Kozhina E.L., Shultz M.M. Thermodynamic properties of sodium-containing glassforming oxide melts // *Ceramics – Silikaty*. 2000. V. 44. № 3. P. 91 – 96.
5. Lambotte G., Chartrand P. Thermodynamic modeling of the ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O}$ ), ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2$ ), and ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{AlF}_3 + \text{NaF}$ ) systems // *J. Chem. Thermodyn.* 2013. V. 57. P. 306 – 334.
6. Nekhoroshev E. Thermodynamic optimization of the  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{K}_2\text{O}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{CaO}$ – $\text{MgO}$ – $\text{B}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$  system / Montreal: Ecole Polytechnique, 2019. 529 p.
7. Rys M. Investigation of thermodynamic properties of alkali metals in oxide systems relevant to coal slags / Aachen: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 2007. 132 p.
8. Shornikov S.I. Thermodynamic modelling of evaporation processes of lunar and meteoritic substance // *Geochem. Int.* 2019. V. 57. № 8. P. 865 – 872.
9. Shornikov S.I. Thermodynamic properties of sodium-silicate melts // *Experiment in Geosciences*. 2014. V. 20. № 1. P. 48 – 51.
10. Shornikov S.I. Thermodynamic properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$  melts // *Experiment in Geosciences*. 2004. V. 12. № 1. P. 15 – 16.
11. Shornikov S.I., Yakovlev O.I., Minaev V.S. Thermodynamic properties of the  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$  melts // *Experiment in Geosciences*. 2022. V. 28. № 1. P. 69 – 72.
12. Utlak S.A., Besmann T.M. Thermodynamic assessment of the pseudoternary  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$  system // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2018. V. 101. № 2. P. 928 – 948.

## THERMODYNAMIC PROPERTIES OF THE $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$ MELTS

**Shornikov S.I.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS,  
Moscow, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com)

The thermodynamic properties of the  $\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$  melts are calculated using a semi-empirical model in the temperature range of 1300–2200 K. The results obtained correspond to the available experimental and theoretical data.



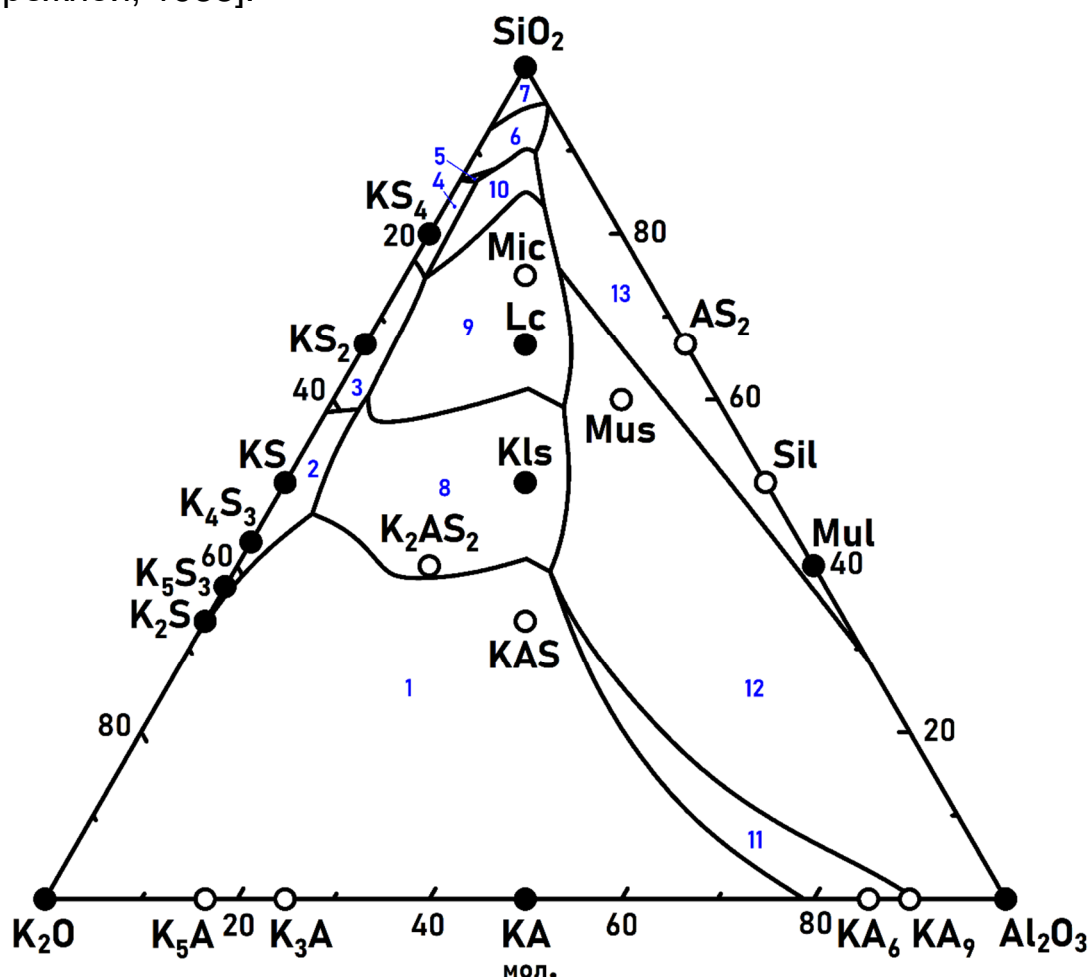
# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ K<sub>2</sub>O–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>

<sup>1</sup>**Шорников С.И.,** <sup>2</sup>**Голяпа Е.С.**

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского  
РАН, Москва, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com)

<sup>2</sup>ВОРКМИ, Санкт-Петербург, [e@workme.io](mailto:e@workme.io)

В системе K<sub>2</sub>O–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> установлены следующие соединения: плавящиеся конгруэнтно при температурах 2045 и 1967 К кальсилит KAlSiO<sub>4</sub> (K<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub>) и лейцит KAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (K<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 4SiO<sub>2</sub>), а также калиевый полевой шпат KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (K<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 6SiO<sub>2</sub>), который диссоциирует при температуре 1449 К (рис. 1). В литературе также упоминаются безводный мусковит KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>11</sub>, K<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub> и K<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>9</sub> [Бережной, 1988].



**Рис. 1.** Диаграмма состояния системы K<sub>2</sub>O–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> [Yang et al., 2024]: KAlO<sub>2</sub> (1); K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (2); K<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (3); K<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>9</sub> (4); SiO<sub>2</sub> (qv) (5); SiO<sub>2</sub> (trd) (6); SiO<sub>2</sub> (crs) (7); KAlSiO<sub>4</sub> (8); KAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (9); KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (10); K<sub>2</sub>Al<sub>12</sub>O<sub>19</sub> (11); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12); Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub> (13). Сплошными символами обозначены конгруэнтно плавящиеся, незакрашенными – разлагающиеся при плавлении соединения.

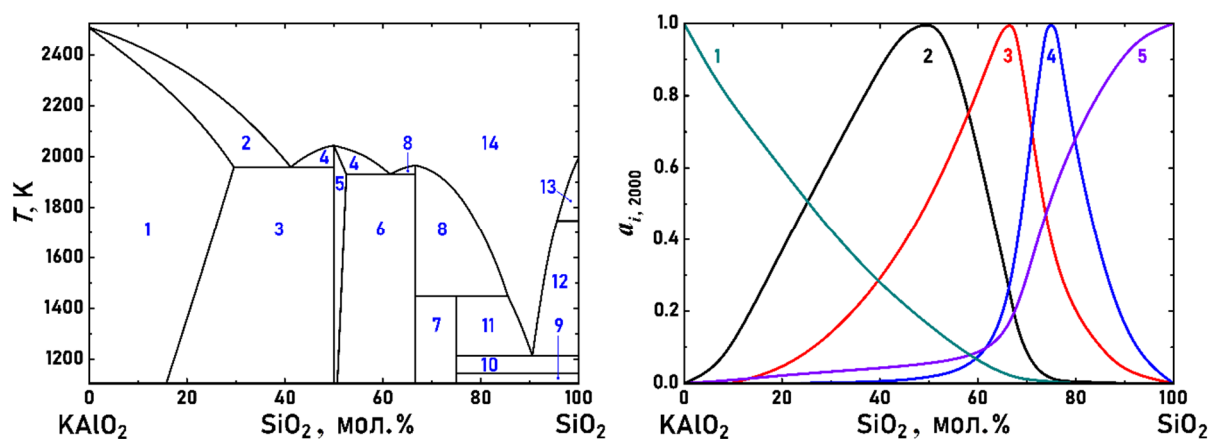


Немногочисленные термодинамические данные, о соединениях и расплавах системы  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  рассмотрены в обзорах [Yazhenskikh et al., 2011; Kim et al., 2018; Nekhoroshev, 2019; Yang et al., 2024].

В настоящей работе термодинамические свойства расплавов в системе  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  в области температур 1500–2500 К были рассчитаны с использованием разработанной модели [Shornikov, 2019]. Параметрами модели являлись стандартные энергии Гиббса образования простых оксидов и их соединений в кристаллическом и жидком состоянии, определенные на основании экспериментальных и теоретических данных [Barin, 1995; Shornikov, 2004, 2013; Shornikov, Slobodov, 2022]. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимися физико-химическими данными на рис. 2–5.

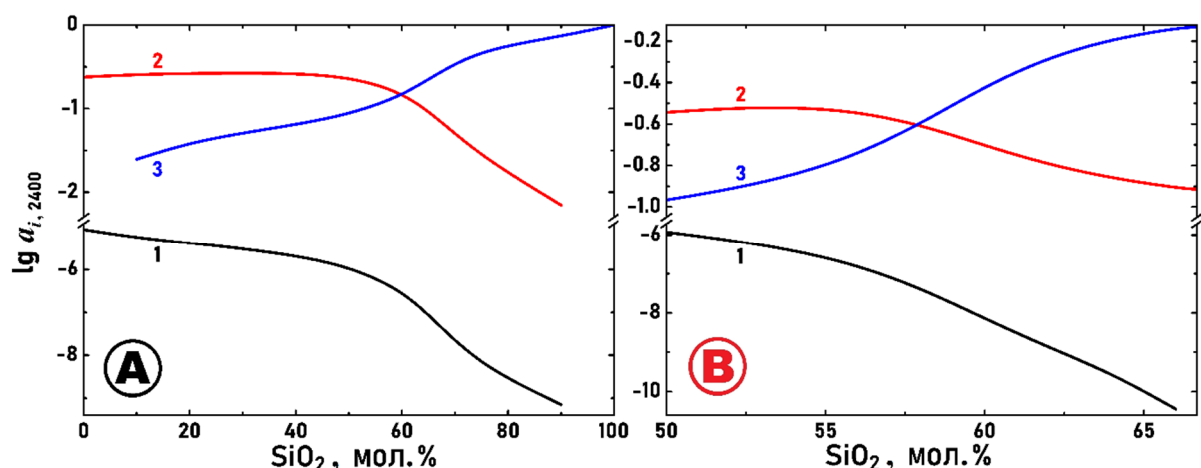
Представленной на рис. 2 диаграмме состояния системы  $KAlO_2-SiO_2$  удовлетворительно соответствуют положения максимальных значений активностей соединений ( $KAlO_2$ ,  $KAlSiO_4$ ,  $KAlSi_2O_6$ ,  $KAlSi_3O_8$  и  $SiO_2$ ) в расплавах (рис. 3), рассчитанных на основании величин активностей простых оксидов (рис. 4А).

Можно заметить, что расплавы сечений  $KAlO_2-SiO_2$  (рис. 4А) и  $KAlSiO_4-Al_2Si_2O_7$  (рис. 4В) характеризуются низкими значениями активности оксида калия (в  $10^5$  раз меньше по сравнению с активностями оксидов алюминия и кремния). Концентрационная зависимость активности  $K_2O$  симбатна таковой для активности  $Al_2O_3$  и антибатна активности  $SiO_2$  (рис. 4).



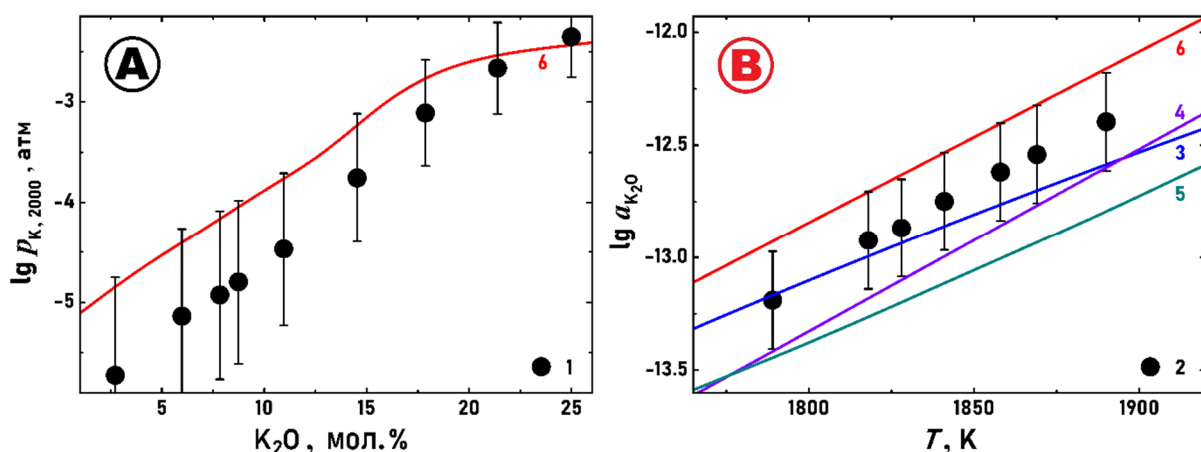
**Рис. 2.** Диаграмма состояния системы  $KAlO_2-SiO_2$  [Yang et al., 2024]:  $KAlO_2$  (1);  $KAlO_2$  + жидкость (2);  $KAlO_2$  +  $KAlSiO_4$  (3);  $KAlSiO_4$  + жидкость (4);  $KAlSiO_4$  (5);  $KAlSiO_4$  +  $KAlSi_2O_6$  (6);  $KAlSi_2O_6$  +  $KAlSi_3O_8$  (7);  $KAlSi_2O_6$  + жидкость (8);  $KAlSi_3O_8$  +  $SiO_2$  (qv) (9);  $KAlSi_3O_8$  +  $SiO_2$  (trd) (10);  $KAlSi_3O_8$  + жидкость (11);  $SiO_2$  (trd) + жидкость (12);  $SiO_2$  (crs) + жидкость (13); жидкость (14).

**Рис. 3** Активности  $KAlO_2$  (1),  $KAlSiO_4$  (2),  $KAlSi_2O_6$  (3),  $KAlSi_3O_8$  (4) и  $SiO_2$  (5) в расплавах системы  $KAlO_2-SiO_2$  при температуре 2000 К.



**Рис. 4.** Активности  $K_2O$  (1),  $Al_2O_3$  (2) и  $SiO_2$  (3) в расплавах систем  $KAIO_2-SiO_2$  (A) и  $KAlSiO_4-Al_2Si_2O_7$  (B) при температуре 2400 К.

Сопоставление результатов расчетов, выполненных в настоящей работе, с экспериментальными данными, полученными масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена [Hastie et al., 1982; Oeltjen, 1999], демонстрирует их соответствие в пределах погрешностей эксперимента (рис. 5). Результаты расчетов температурной зависимости активности  $K_2O$  в расплаве  $9.7K_2O-17.4Al_2O_3-72.9SiO_2$ , выполненные в работах [Yazhenskikh et al., 2011; Kim et al., 2018; Nekhoroshev, 2019], показывают более низкие величины активностей (рис. 5B).



**Рис. 5.** Концентрационная зависимость парциального давления атомарного калия в расплаве системы  $KAlSiO_4-Al_2Si_2O_7$  при температуре 2000 К (A) и температурная зависимость активности  $K_2O$  в расплаве  $9.7K_2O-17.4Al_2O_3-72.9SiO_2$  (B), определенные методом масс-спектрометрии [Hastie et al., 1982; Oeltjen, 1999] (1, 2) и рассчитанные в работах [Yazhenskikh et al., 2011; Kim et al., 2018; Nekhoroshev, 2019] (3–5) и в настоящей работе (6).

## Литература

1. Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы / Киев: Наук. думка, 1988. 200 с.
2. Barin I. Thermochemical data of pure substances / Weinheim: VCH, 1995. 1885 p.
3. Hastie J.W., Horton W.S., Plante E.R., Bonnell D.W. Thermodynamic models of alkali-metal vapor transport in silicate systems // High Temp. – High Press. 1982. V. 14. № 6. P. 669 – 679.
4. Kim D.-G., Konar B., Jung I.-H. Thermodynamic optimization of the  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  system // Cer. Int. 2018. V. 44. № 14. P. 16712 – 16724.
5. Nekhoroshev E. Thermodynamic optimization of the  $Na_2O-K_2O-Al_2O_3-CaO-MgO-B_2O_3-SiO_2$  system / Ecole Polytech., Montreal. 2019. P. 1 – 529.
6. Oeltjen L. Vorhersage thermodynamischer eigenschaften von kohlschlacken mittels modellrechnungen / Ber. Forschung., Julich. 1999. P. 1 – 125.
7. Shornikov S.I. Thermodynamic properties of the  $Al_2O_3-SiO_2$  melts // Experiment in Geosciences. 2004. V. 12. № 1. P. 15 – 16.
8. Shornikov S.I. Thermodynamic properties of the  $K_2O-SiO_2$  melts // Experiment in Geosciences. 2013. V. 19. № 1. P. 108 – 111.
9. Shornikov S.I. Thermodynamic modelling of evaporation processes of lunar and meteoritic substance // Geochem. Int. 2019. V. 57. № 8. P. 865 – 872.
10. Shornikov S.I., Slobodov A.A. Thermodynamic properties of the  $K_2O-Al_2O_3$  melts // Experiment in Geosciences. 2022. V. 28. № 1. P. 72 – 75.
11. Yang J., Yan L., Ye L., Xiao G., Wang K., Liu Y., Zhang L., Liu L., Du Y. Thermodynamic evaluation and optimization of the  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  system // J. Amer. Ceram. Soc. 2024. V. 107. № 12. P. 8732 – 8745.
12. Yazhenskikh E., Hack K., Muller M. Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags, Part 5: Potassium oxide – alumina – silica // CALPHAD. 2011. V. 35. № 1. P. 6 – 19.

## THERMODYNAMIC PROPERTIES OF THE $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ MELTS

<sup>1</sup>**Shornikov S.I.**, <sup>2</sup>**Golyapa E.S.**

<sup>1</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com)

<sup>2</sup>WORKME, Saint-Petersburg, [e@workme.io](mailto:e@workme.io)

The thermodynamic properties of the  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  melts are calculated using a semi-empirical model in the temperature range of 1500–2500 K. The results obtained correspond to the available experimental and theoretical data.

## РАСХОЖДЕНИЯ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА В *PT*-УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ CAIs

**Шорников С. И., Яковлев О.И.**

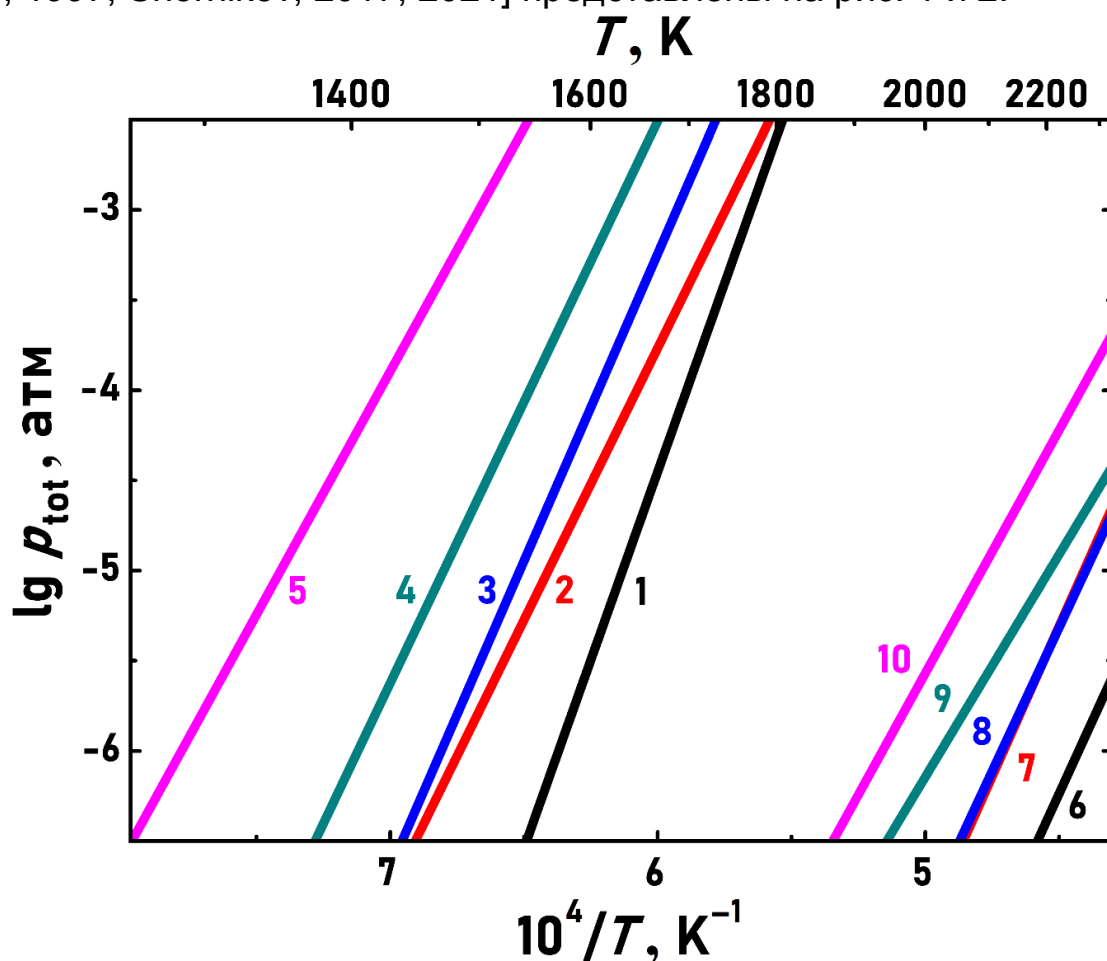
Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского  
РАН, Москва, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com), [yakovlev@geokhi.ru](mailto:yakovlev@geokhi.ru)

Ca-Al-включения хондритов являются уникальным по составу и происхождению веществом Солнечной системы с самыми древним возрастом ~4.567 млрд лет. В англоязычной литературе это вещество обозначают для краткости аббревиатурой CAIs (Ca-Al-Inclusions, т. е. включения, обогащенные кальцием и алюминием). По химическим, минералогическим и структурным признакам выделяют несколько типов CAIs, среди которых наиболее примитивным считается тип А. Он состоит из богатого геленитом мелилита (минерала ряда геленит  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  – акерманит  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) в количестве, как правило,  $\geq 80$  об. % и магнезиальной шпинели ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) в количестве 5–15 об. % [Wark, Boynton, 2001]. В состав акцессорных минералов входят особо тугоплавкие минералы, такие как корунд ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), гибонит ( $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ ), перовскит ( $\text{CaTiO}_3$ ). Этот тип включений подразделяют на FTA (Fluffy Type A) – «рыхлые» или «пушистые» образования и СТА (Compact Type A) – «компактные» образования. FTA – минеральные скопления, образовавшиеся при конденсации газа предположительно солнечного состава. СТА – частично или полностью расплавленные и перекристаллизованные конденсаты [MacPherson, Grossman, 1979, 1984].

В литературе со времени появления пионерской работы Гроссмана (1972) постоянно обсуждается вопрос о *PT*-условиях конденсации из идеальной газовой фазы вышеперечисленных минералов и, соответственно, условия образования FTA. Интересно отметить, что первые оценки *PT*-параметров почти не претерпели до сих пор существенных изменений [MacPherson, Petaev, 2025]. На рис. 1 в общем виде представлены результаты расчетов *PT*-сублимации тугоплавких минералов CAIs: корунда, гибонита, перовскита, геленита и шпинели при общем давлении  $10^{-6}$  –  $10^{-2}$  атм [Yoneda, Grossman, 1995].

В настоящее время из-за технических трудностей эксперимента по конденсации пока нет экспериментального подтверждения результатов теоретического расчета. Однако имеются данные экспериментов равновесного испарения и, соответственно, конденсации перечисленных минералов. Результаты масс-спектрометрических экспериментов по испарению минералов из

молибденовой ячейки Кнудсена [Шорников и др., 1996; Shornikov et al., 1997; Shornikov, 2017, 2021] представлены на рис. 1 и 2.



**Рис. 1.** Температуры и давления конденсации корунда (1, 6), гибонита (2, 7), перовскита (3, 8), мелилита (4, 9) и магнезиальной шпинели (5, 10) по результатам расчетов [Yoneda, Grossman, 1995] (1–5) и экспериментальным данным [Шорников и др., 1996; Shornikov et al., 1997; Shornikov, 2017, 2021] (6–10).

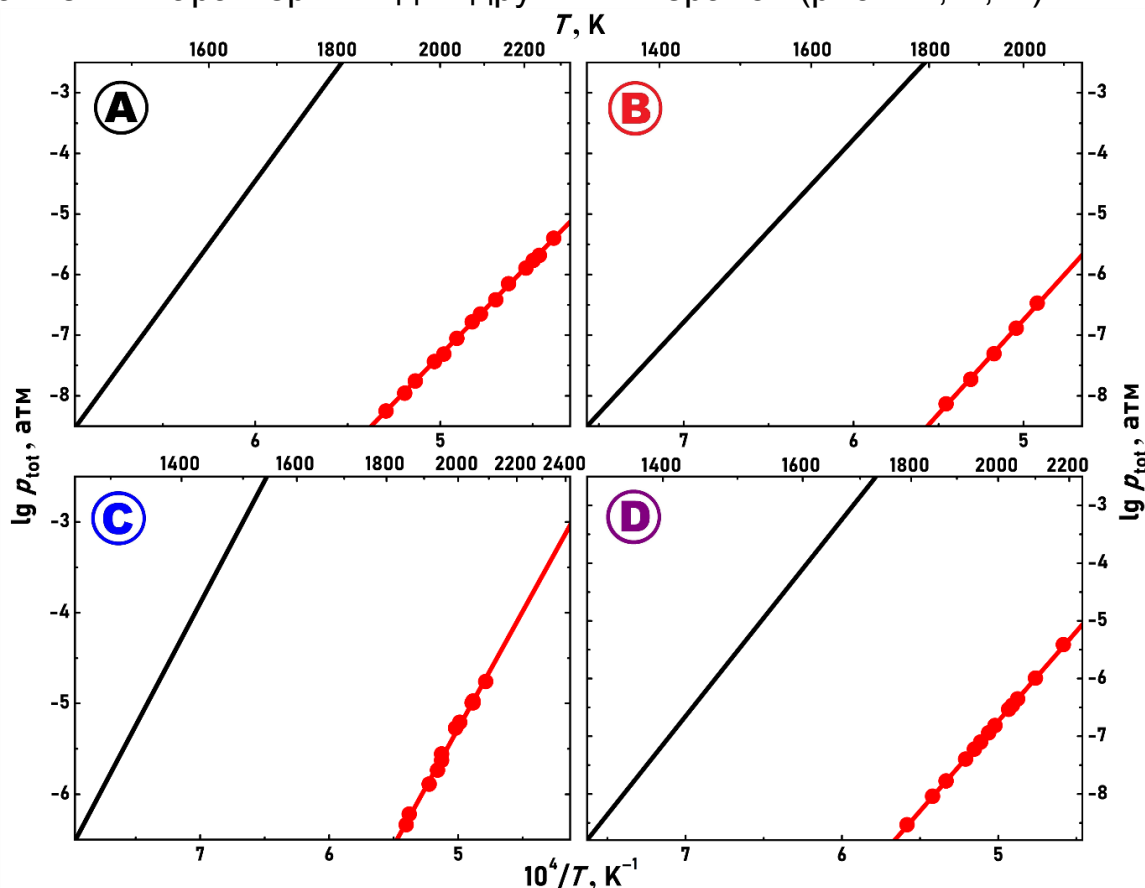
Рис. 1 свидетельствует о сохранении порядка конденсации, установленный Гроссманом (1972), и, вместе с тем показывает разительное расхождение теории и эксперимента.

Заметим, что представленные на рис 2 результаты относятся к температурным областям, находящимся ниже температуры плавления (разложения) корунда ( $2327 \pm 6$  K), гибонита ( $2148 \pm 10$  K), шпинели ( $2420 \pm 25$  K) и перовскита ( $2241 \pm 10$  K), что свидетельствует об испарении – конденсации в системе «газ – кристаллическая фаза».

На рис. 2 для сравнения теоретических и экспериментальных данных отдельно показано положение  $PT$ -зависимостей равновесного испарения – конденсации труднолетучих минералов CAIs. Можно заметить, что экспериментальные линии конденсации

на  $P$ - $T$ -диаграмме лежат в области значительно больших температур и значительно меньших давлений.

Так, например, в случае шпинели (рис. 2С) видно, что результаты эксперимента свидетельствуют о конденсации шпинели при температуре более, чем на 800 К выше, чем температура конденсации по данным расчета [Yoneda, Grossman, 1995]. Различие в величине общего давления пара над шпинелью превышает 7 порядков. Те же порядки различий температур и давлений характерны и для других минералов (рис. 2А, В, D).



**Рис. 2.** Общее давление пара над корундом (А), гибонитом (В), магнезиальной шпинелью (С) и перовскитом (D), рассчитанные в работе [Yoneda, Grossman, 1995] (черные линии), а также полученные масс-спектрометрическим методом при испарении из молибденовой ячейки Кнудсена [Shornikov et al., 1997; Shornikov, 2017, 2021] (красные символы и линии).

Представленные данные говорят о явном расхождении результатов теоретического расчета с экспериментальными данными и ставят вопрос о пересмотре параметров конденсации первичных минералов CAIs.

### Литература

1. Шорников С. И., Столярова В. Л., Шульц М. М. Масс-спектрометрическое исследование термодинамических свойств



- расплавов системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  // Техника и технология силикатов. 1996. Т. 3. № 1–2. С. 8 – 22.
2. Grossman L. Condensation in the primitive solar nebula // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1972. V. 36. № 5. P. 597 – 619.
  3. MacPherson G. J., Grossman L. Melted and non-melted coarse-grained Ca-, Al-rich inclusions in Allende // *Meteoritics*. 1979. V. 14. P. 479.
  4. MacPherson G. J., Grossman L. “Fluffy” type A Ca-, Al-rich inclusions in the Allende meteorite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1984. V. 48. № 1. P. 29 – 46.
  5. MacPherson G. J., Petaev M. I. Equilibrium condensation of a solar composition gas, revisited: the anorthite effect // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2025. V. 391. P. 248 – 261.
  6. Shornikov S. I., Stolyarova V. L., Shultz M. M. A mass-spectrometric study of vapor composition and thermodynamic properties of  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  melts // *Russ. J. Phys. Chem.* 1997. V. 71. № 1. P. 19 – 22.
  7. Shornikov S. I. Mass spectrometric investigation of evaporation processes of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2017. V. 91. № 1. P. 10 – 16.
  8. Shornikov S. I. Thermodynamics of perovskite: solid, liquid and gas phases / *Perovskite & Piezoelectric Materials*. London: IntechOpen, 2021. P. 115 – 138.
  9. Wark D., Boynton W. V. The formation of rims on calcium-aluminum-rich inclusions: Step I – flash heating // *Met. Planet. Sci.* 2001. V. 36. № 8. P. 1135 – 1166.
  10. Yoneda S., Grossman L. Condensation of  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  liquids from cosmic gases // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. № 16. P. 3413 – 3444.

## DISCREPANCIES BETWEEN THEORY AND EXPERIMENT IN *PT*-CONDITIONS OF CAIs FORMATION

**Shornikov S.I., Yakovlev O.I.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS,  
Moscow, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com), [yakovlev@geokhi.ru](mailto:yakovlev@geokhi.ru)

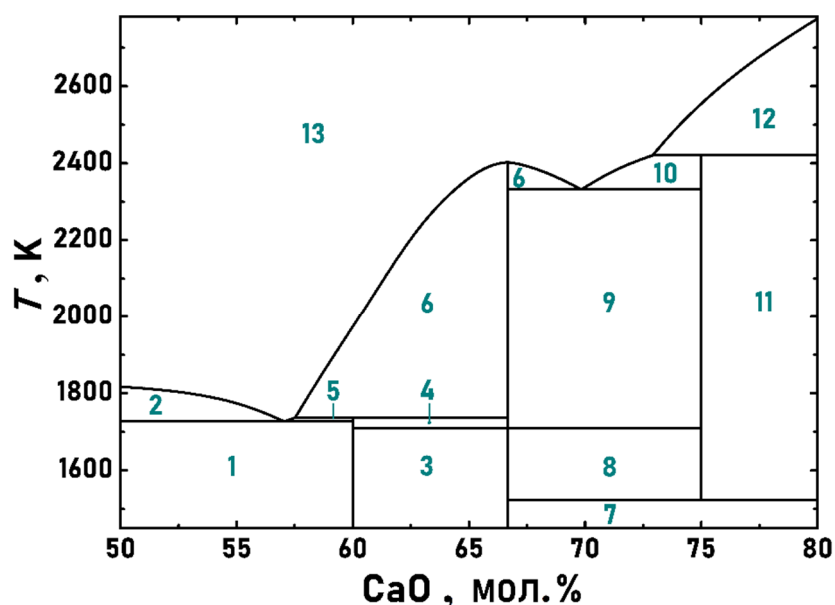
Experimental data obtained by the Knudsen mass spectrometric effusion method are compared with data from Yoneda and Grossman (1995) on the *PT*-conditions of condensation from an ideal gas phase of corundum, hibonite, perovskite, spinel, and melilite. The revealed discrepancies raise the issue of revising the condensation parameters of primary CAIs minerals.



## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРТОСИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ **Шорников С.И., Яковлев О.И.**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
РАН, Москва, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com)

Ортосиликат кальция  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  – важнейший минералогический компонент цементов, нефелинового шлама, металлургических шлаков. Помимо  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  в системе  $\text{CaO-SiO}_2$  установлено существование хатрурита  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , ранкинита  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$  и волластонита  $\text{CaSiO}_3$  (рис. 1) [DeNoirfontaine et al., 2012].



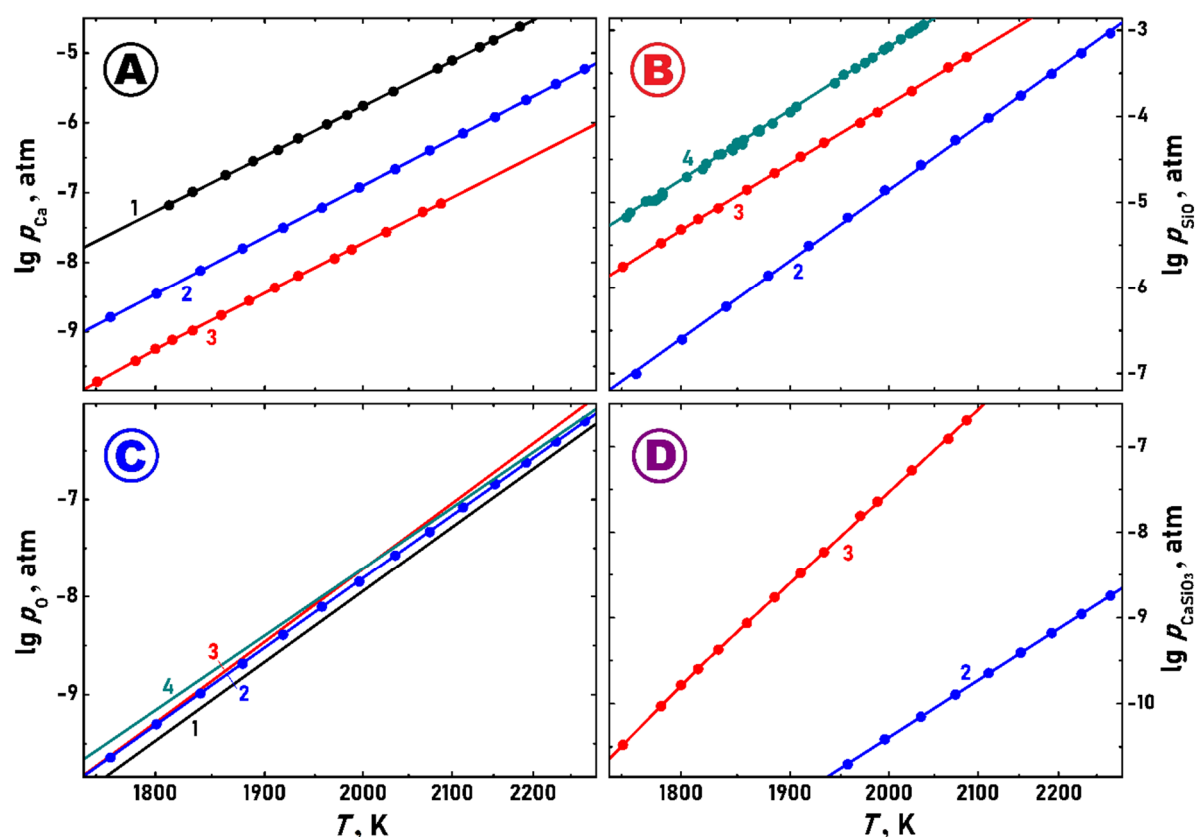
**Рис. 1.** Диаграмма состояния системы  $\text{CaO-SiO}_2$  в области соединения  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ :  $\alpha\text{-CaSiO}_3 + \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$  (1);  $\alpha\text{-CaSiO}_3 + \text{жидкость}$  (2);  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + \alpha'\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  (3);  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + \alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  (4);  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + \text{жидкость}$  (5);  $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{жидкость}$  (6);  $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaO}$  (7);  $\alpha'\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_3\text{SiO}_5$  (8);  $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_3\text{SiO}_5$  (9);  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{жидкость}$  (10);  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{CaO}$  (11);  $\text{CaO} + \text{жидкость}$  (12);  $\text{жидкость}$  (13).

Немногочисленные термодинамические данные об ортосиликате кальция недавно были рассмотрены в обзорах [DeNoirfontaine et al., 2012; Abdul et al., 2023]. Термодинамические данные о  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  противоречивы: энтальпия смешения  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  при 298 K находится в интервале от  $-54$  до  $-34$  кДж/моль, энтропия смешения – от  $-2.4$  до  $3.3$  Дж/(моль $\times$ K), что значительно превышает погрешности экспериментов. Высокотемпературные измерения энергии смешения также имеют низкую точность – до 4 кДж/моль.

В настоящей работе было изучено испарение  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  из молибденовой эффузионной ячейки масс-спектрометрическим методом в температурном интервале 1762–2269 K. Условия

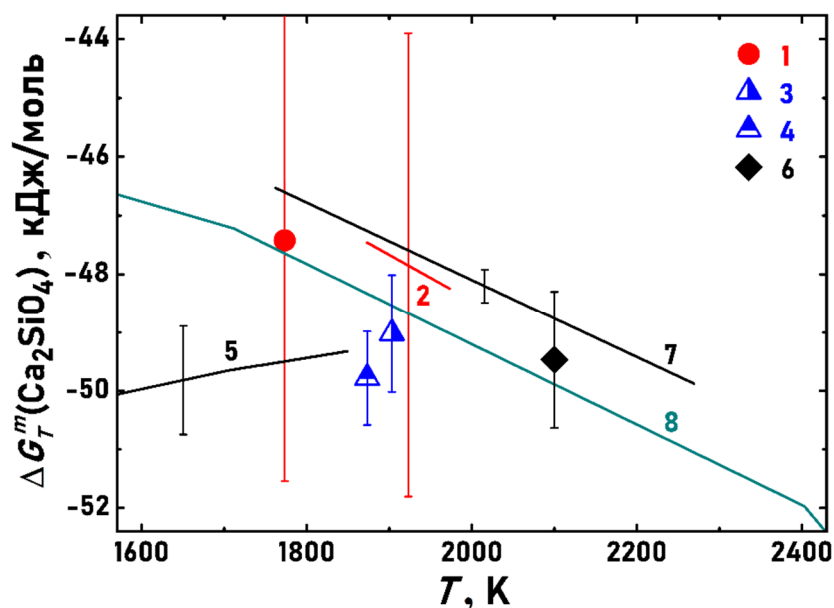
эксперимента детально описаны в работе [Shornikov, Archakov, 2000]. Образец  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  был получен многократным обжигом строго стехиометрической смеси химически чистых  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaCO}_3$  или  $\text{CaO}$  при температуре 1773–1823 К с последующим рентгенофазовым и химическим анализом образца.

Определенные величины парциальных давлений компонентов газовой фазы над ортосиликатом кальция приведены на рис. 2 в сопоставлении с таковыми над простыми оксидами и волластонитом. Зависимости парциальных давлений  $\text{Ca}$ ,  $\text{SiO}$  и  $\text{CaSiO}_3$  от обратной температуры имеют близкий наклон и соответствуют порядку содержания простых оксидов в соединении (рис. 2 А, В, D). Наблюдаемое сходство парциальных давлений кислорода (рис. 2 С) для всех рассматриваемых соединений подтверждает установленную симбатность в поведении различных по происхождению форм газовой фазы над соединениями и расплавами системы  $\text{CaO-MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  [Shornikov, 2023].



**Рис. 2.** Логарифмические зависимости парциального давления  $\text{Ca}$  (А),  $\text{SiO}$  (В),  $\text{O}$  (С) и  $\text{CaSiO}_3$  (D) от обратной температуры над  $\text{CaO}$  (1),  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  (2),  $\text{CaSiO}_3$  (3) и  $\text{SiO}_2$  (4), определенные масс-спектрометрическим методом при испарении из молибденовой эффузионной ячейки Кнудсена: [Shornikov, 2025] (1), [Shornikov, 2024] (3), [Shornikov et al., 1998] (4) и в настоящей работе (2).

Как следует из рис. 3, определенные величины энергии смешения в  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  удовлетворительно соответствует экспериментальным данным, полученным в работах [Carter, Macfarlane, 1957; Langenberg et al., 1958; Shornikov, Archakov, 2000], а также результатам термодинамических расчетов [Barin, 1995], превышая последние приблизительно на 1.5 кДж/моль. Рассчитанные энтальпия и энтропия смешения в  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  в области температур 1762–2269 К равны  $-34.90 \pm 0.20$  кДж/моль и  $6.60 \pm 0.10$  Дж/(моль·К).



**Рис. 3.** Энергия смешения в  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , определенная при изучении равновесий в шлаках [Carter, Macfarlane, 1957] (1), [Langenberg et al., 1958] (2); методом ЭДС [Sanbongi, Omori, 1961] (3), [Sawamura, 1962] (4); масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена [Zaitsev et al., 1992] (5), [Shornikov, Archakov, 2000] (6) и в настоящей работе (7), а также рассчитанная в работе [Barin, 1995] (8).

### Литература

1. Abdul W., Mawalala C., Pisch A., Bannerman M.N.  $\text{CaO-SiO}_2$  assessment using 3rd generation CALPHAD models // *Cement & Concrete Res.* 2023. V. 173. #107309. 15 p.
2. Barin I. *Thermochemical data of pure substances* / Weinheim: VCH, 1995. 1885 p.
3. Carter P.J., Macfarlane T.G. The thermodynamic properties of  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO-SiO}_2$  // *J. Iron Steel Inst.* 1957. V. 85. № 1. P. 54 – 66.
4. DeNoirfontaine M.N., Tusseau-Nenez S., Girod-Labianca C., Pontikis V. CALPHAD formalism for Portland clinker: thermodynamic models and databases // *J. Mater. Sci.* 2012. V. 47. № 3. P. 1471 – 1479.

5. Langenberg F.S., Kaplan H., Chipman J. The activity of silica in lime – alumina – silica slags at 1600 °C // The physical chemistry of steelmaking. N.Y.: MIT, 1958. P. 65 – 67.
6. Sanbongi K., Omori Y. Research on the activity of components in the fundamental system in iron blast furnace slag. IV. The activity of lime in the system  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  // Sci. Rep. Tohoku Univ. A. 1961. V. 13. № 1. P. 238 – 246.
7. Sawamura K. Activity of lime in blast-furnace type slags // Tetsu-to-Hagane Overseas. 1962. V. 2. № 3. P. 219 – 225.
8. Shornikov S.I., Archakov I.Y., Shultz M.M. Mass spectrometric study of vaporization and thermodynamic properties of silicon dioxide. I. Composition of the gas phase and partial vapor pressures of the molecular forms over silicon dioxide // Russ. J. Gener. Chem. 1998. V. 68. № 8. P. 1171 – 1177.
9. Shornikov S.I., Archakov I.Y. Mass spectrometric study of phase relations and vaporization processes in the  $\text{CaO-SiO}_2$  system // Glastech. Ber. Glass. Sci. Technol. 2000. V. 73C2. P. 51 – 57.
10. Shornikov S.I. Thermodynamic study of fractional evaporation of refractory meteorite matter melts under various redox conditions. – Advances in geochemistry, analytical chemistry, & planetary sciences: 75th Anniversary of the Vernadsky Institute of the Russian Academy of Sciences. Cham: Springer, 2023. P. 361 – 373.
11. Shornikov S.I. Mass spectrometric investigation of thermodynamic properties of  $\text{CaSiO}_3$  wollastonite // 153 ann. meet. & exhib. suppl. proc. Cham: Springer, 2024. P. 568 – 576.
12. Shornikov S.I. Thermodynamic study of calcium oxide evaporation under various redox conditions / Advances in ceramic materials & processing. Cham: Springer, 2025. P. 217 – 232.
13. Zaitsev A.I., Litvina A.D., Mogutnov B.M. Thermodynamic properties of the intermediate phases of  $\{x\text{CaF}_2 + y\text{SiO}_2 + (1 - x - y)\text{CaO}\}$  // J. Chem. Thermodyn. 1992. V. 24. № 7. P. 737 – 750.

## THERMODYNAMIC PROPERTIES OF CALCIUM ORTHOSILICATE

**Shornikov S.I., Yakovlev O.I.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS,  
Moscow, [sergey.shornikov@gmail.com](mailto:sergey.shornikov@gmail.com)

The partial pressures of the vapor species over  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  were obtained by the Knudsen mass spectrometric effusion method at 1762–2269 K. The mixing energy, as well as the enthalpy and entropy of calcium orthosilicate equal to  $-34.90 \pm 0.20$  kJ/mol and  $6.60 \pm 0.10$  J/(mol×K) were calculated.

## МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ (МИКРО)ТОМОГРАФИИ В ПРАКТИКЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

**Якушина О.А., Хозяинов М.С.**

Университет «Дубна», Дубна, [yak\\_oa@mail.ru](mailto:yak_oa@mail.ru), [mkhoz@mail.ru](mailto:mkhoz@mail.ru)

При исследовании минерального вещества – горных пород, руд, минералов и их агрегатов, продуктов переработки необходимо получать наиболее полные, объективные, достоверные данные о его морфоструктурных характеристиках, желательно с низкой трудоемкостью, затратностью и достаточно быстро. Современный комплекс физических методов исследования включает оптические и электронные микроскопы, рентгено-спектрометры, электроно-зондовые анализаторы, рентгеновские дифрактометры и другие приборы. Большинство методов требует подготовки образца к анализу. Использование рентгеновских томографов (РТ) позволяет проводить неразрушающий анализ структуры минеральных образований, геоматериалов и при этом существенно упростить анализ, получать объемные 3D модели объекта исследования [Хозяинов, 1995; 2023].

Метод рентгеновской томографии (РТ) активно внедряется в качестве лабораторного метода определения их петрофизических характеристик. Несмотря на ожидания, горные породы и минералы оказались сложным объектом для исследования методом рентгеновской томографии, причины этого как в физической природе явления (используется не монохроматическое излучение), конструкции приборов, так и генетической природе минерального вещества: поликомпонентном и изменчивом (явления изоморфизма, полиморфизма, микропримеси) фазовом составе, микровключениях других фаз. Метод все шире применяется в лабораторных петрофизических исследованиях, что частично связано с широкой расширением приборной базы CT-unit- scanner за счет разработок производителей из КНР и активной маркетинговой рекламой.

Изображения томограмм, плоскостные и трехмерные, отображают изменяющиеся значения линейного коэффициента отражения рентгеновских лучей (ЛКО) вещества, визуализируя характер распределения фаз и пустотное пространство в тонком плоском слое исследуемого объекта для получения данных о морфоструктуре (морфометрические характеристики, гранулярный состав, распределение элементов и минералов (фаз), включений), и пустотном пространстве (пористость, трещиноватость), по которым можно прогнозировать как коллекторские характеристики скоплений углеводородов, так и качество минерального сырья.

Как и любая ориентированная область, РТ имеет ряд специфических задач, успешное решение которых определяется как

используемым программным обеспечением, так и характеристиками используемых приборов.

При анализе керна методом РТ решаются разные задачи, соответственно возникают и разные требования к используемой аппаратуре. Можно выделить три задачи или направления использования РТ для анализа геовещества:

- качественные исследования полноразмерного керна для оценки его общих характеристик и выделения наиболее интересных или представительных участков керна для дальнейших детальных исследований;
- изучение количественных характеристик на уровне микроструктуры;
- исследования в процессе моделирования вытеснения нефти при разных термобарических условиях.

Обозначим важные исходные условия исследования керна нефтегазовых скважин, прежде всего это: габаритные размеры для исследования полноразмерного керна; минеральный состав пород, определяющий физические действия с рентгеновским излучением, необходимость исследования пустотного пространства и протяженных неоднородностей, моделирование реальных термобарических условий в скважине при заборе керна, изучение динамически меняющихся параметров в процессе вытеснения нефти водой и другими флюидами в образце при различных термобарических условиях.

Какие характеристики мы можем ожидать сегодня от рентгеновского томографа (далее томографа) для решения задач исследования керна нефтегазовых скважин. Во всех случаях при определении геометрии пустот и характеристик порового пространства (особенно трещиноватости) важно исследовать относительно протяжённые участки керна, порядка 5 см, минимум 3 см, и определять размеры сечений микропор и раскрытия трещин до 1 мкм (и менее), но, хотя бы не меньше 25 мм [Багринцева, Добрынин]:

- размеры рабочего поля съёмки – желательно, позволяющие исследовать полноразмерный керн, т.е. 10 см в диаметре и 100 см по длине образца, но не меньше чем 3х3 см;
- пространственное разрешение 1мкм -25 мкм;
- микрофокусная рентгеновская трубка, фокальное пятно < 25 мкм;
- рабочее напряжение рентгеновской трубки порядка 100 кэВ, что обеспечивает среднюю энергию нефилтрованного излучения, достаточную для просвечивания минерального вещества керна;
- дополнительное оборудование (предметные столики) для моделирования пластовых условий - изменение температуры,

давления (нагрузка), возможность насыщения керна жидкостями, рентгеноконтрастными веществами.

Эффективность метода РТ зависит от характеристик прибора (источника рентгеновского излучения; вида, материала детектора; пространственного разрешения) и алгоритмов расчета. Ограничения связаны с размером фокусного пятна источника рентгеновского излучения, вещества детектора, зависимостью результатов анализа от программного обеспечения конкретного прибора, от эффектов дискретизации и возможных артефактов в реконструкции изображения. Именно на совершенствовании ПО для реконструкции изображения сегодня сосредоточены усилия разработчиков.

Горные породы и минералы оказались достаточно сложным объектом для  $\mu$ РТ, в отличие от биологических и медицинских образцов. Причины – как в физической природе явления и конструкции приборов, так и в генетической природе минерального вещества: поликомпонентном и изменчивом (явления изоморфизма, полиморфизма, микропримеси) фазовом составе, микровключениях.

Применительно к изучению керна, в том числе нефтяных пород для исследования пустотного пространства, сегодня можно сформулировать несколько направлений применения РТ, работы по которым находятся в разных стадиях: полноразмерный керн для выделения наиболее представительных его участков для последующего изучения традиционными методами; анализ полноразмерного керна для количественной оценки его трещиноватости, пористости, минерального состава породы: микроРТ на специально подготовленных образцах керна для количественного определения параметров породы – пористости, трещиноватости, минерального и гранулярного состава; изучение динамически меняющихся параметров в процессе вытеснения нефти водой и др. флюидами в образце при различных термобарических условиях. Первое из перечисленных направлений реализуется, остальные – в состоянии постановки задачи.

Методом рентгеновской томографии устанавливают текстурно-структурные характеристики, неоднородность фазового состава геологических и техногенных минеральных объектов, включая их количественную оценку. РТ-анализ дает оперативную информацию об основных морфометрических и гранулярных характеристиках минералов, давать прогнозную оценку минерального сырья и рекомендации о наиболее эффективных методах рудоподготовки, обогащения руд, прогнозировать их поведение в технологических процессах, ускорить поиск рациональных схем обогащения. 3

Морфоструктурное исследование – морфология, гранулярный состав, содержание выделенных фаз – проводим по оригинальной методике (при измерениях ЛКО используется образец сравнения



(ОС) алюминий (т.к. его плотность наиболее близка к плотности силикатов и алюмосиликатов – основных породообразующих минералов) путем линейного и площадного анализов изображений томограмм на основе построения гистограмм частотного распределения амплитуды ЛКО. Известные данные повышают надежность идентификации фаз и морфоструктурных особенностей. Расчет осуществляется в предположении, что химический состав и плотность идентифицируемой фазы известны. Близость отношений измеренных амплитуд и рассчитанных величин ЛКО для конкретной фазы и образца сравнения с большой степенью вероятности свидетельствует о правильности предположения о минеральном составе диагностируемых фаз. Данный методический прием позволяет сопоставлять измерения, проведенные при разных режимах съемки, для фаз разных размеров, при меняющемся минеральном составе вмещающей среды (горной породы, минерального агрегата).

В перспективе развитие метода связано с совершенствованием аппаратной базы, сенсорной системы, конструирование микротомографов с камерой для моделирования и размерами рабочего поля размером 10 см и более при пространственном разрешении на уровне микрометров, так и специализированным программным обеспечением обработки томограмм.

## **Литература**

1. Хозяинов М.С., Руб А.К., Козорезов Е.В. Использование рентгеновской вычислительной микротомографии в прикладной минералогии // Доклады Академии наук, 1995, № 4. 516-519.
2. Хозяинов М.С., Якушина О.А. Анализ вещественного состава и микроструктуры образцов методом рентгеновской микротомографии. Москва: Кур, 2023. 198с. ISBN 978-5-907535-64-0

X-RAY (MICRO)TOMOGRAPHY AS LABORATORY RESEARCH  
METHOD TO STUDY ROCKS AND OTHE RAW MINERAL MATTER

**Yakushina O.A., Khozyainov M.S.**

Dubna University, Dubna, [yak\\_oa@mail.ru](mailto:yak_oa@mail.ru); [mkhoz@mail.ru](mailto:mkhoz@mail.ru)

Nowadays raw material usually has complicated composition, poor quality, possible presence of toxic and harmful impurities, so it is very important to obtain data on its characteristics at the early stage geological research. How to use the X-ray CT fast non-destructive method on geomaterials study for quantitative estimation is discussed.

**Научное издание**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ  
ДВАДЦАТЬ ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

Москва, 29 сентября – 1 октября, Борок, 3 октября 2025 г.

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

ISBN 978-5-88918-081-4

ISBN 978-5-88918-081-4



ISSN 2686-8938

ISSN 2686-8938



Фото на обложке сотрудников ИГЕМ РАН

Подписано к печати 18.09.25.  
Формат 60х90/16. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Уч. изд. л. 17  
Тираж 300 экз. Заказ №

ФГУП «Издательство «Наука»»  
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6



ISBN 978-5-88918-081-4



9 785889 180814

ISSN 2686-8938



9 772686 893009 >