

На правах рукописи



Кайгородова Екатерина Николаевна

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТО-
СУЛЬФИДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РАДУЖНОЕ
(БОЛЬШОЙ КАВКАЗ) И УСЛОВИЯ ЕГО
ФОРМИРОВАНИЯ**

Специальность 1.6.10. – Геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2022

Диссертационная работа выполнена в Федеральном Государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии, геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)

Научный руководитель:

Петров Владислав Александрович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии, геохимии РАН

Официальные оппоненты:

Савва Наталья Евгеньевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории петрологии, изотопной геохронологии и рудогенеза Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН)

Наумов Евгений Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ ЦНИГРИ)

Ведущая организация:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет

Защита диссертации состоится 05 октября в 14.00 на заседании Диссертационного совета 24.1.051.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) по адресу: 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 35.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, <http://www.igem.ru>. Автореферат диссертации также размещен на официальном сайте ВАК (<http://vak.ed.gov.ru/>)

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.051.01, к.г.-м.н.
dissovet_igem@mail.ru



А.М. Козловский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Месторождение Радужное – это уникальный золоторудный объект на Северном Кавказе, который до последнего времени оставался малоизученным: в литературе отсутствует его детальное геологическое, минералогическое и геохимическое описание. Дискуссионным также оставались вопросы об источниках вещества компонентов руд и возрасте месторождения. В настоящей работе представлены результаты минералогического, петролого-геохимического и Рb-изотопного изучения золоторудной минерализации месторождения Радужное, а также магматических и осадочных пород, распространенных на его территории.

Объект исследований – Au-рудное месторождение Радужное, расположенное в горной части Кабардино-Балкарской Республики. Оно было открыто в 1974 году (Стативкин и др., 1976) и по результатам проведенных геологоразведочных работ в 2013г. для него были утверждены запасы по категории С₁: Au 4.9 т (при среднем содержании 2.9 г/т) и Ag 96.4 т (при среднем содержании 59 г/т).

Цель работы – исследование различных аспектов генезиса месторождения Радужное, в том числе, установление пространственно-временных закономерностей формирования Au-сульфидной и Au-Ag минерализации, изучение минерального состава руд и метасоматических образований, определение основных источников рудных компонентов, а также выявление возможных генетических связей между магматической активностью и процессами рудогенеза.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели предполагалось решить следующие конкретные задачи:

1. Определение возраста, петролого-геохимических характеристик пород и границ ареала проявления магматизма хуламского вулcano-плутонического комплекса (ХВПК), с которым предположительно связано формирование минерализации на месторождении Радужное;
2. Изучение минерального состава руд, их текстурно-структурных особенностей, последовательности рудообразования на месторождении;
3. Изучение форм нахождения Au в составе рудной минерализации;
4. Исследование состава околорудных метасоматитов на месторождении;
5. Определение источников вещества рудно-магматической системы Безенгийского рудного района на основе изучения геохимических характеристик руд, а также Рb-изотопной систематики сульфидной минерализации, магматических и осадочных образований региона.

Научная новизна. В результате проведенных исследований впервые:

1. Уточнены формы нахождения золота и серебра в различных минеральных ассоциациях месторождения Радужное;
2. Впервые изучен состав сосуществующих бурнонит-зелигманитовых и теннантит-тетраэдритовых твердых растворов;

3. Детально изучена редкоземельная и редкометалльная минерализация в риолитах и трахитах ХВПК;
4. Описаны различные генетические типы брекчий, часть из которых являются рудовмещающими;
5. Проведено минералогическое исследование околорудных метасоматитов;
6. Впервые охарактеризованы минералы надгруппы алунита из зоны окисления месторождения, имеющие поисковое значение;
7. С помощью изотопно-геохронологических данных доказано сопряжение южной границы ареала развития юрского магматизма ХВПК с северной границей ареала плиоценового магматизма цанского комплекса;
8. С помощью K-Ar и U-Pb методов установлен возраст магматических образований различного состава ХВПК;
9. Сделаны выводы об источниках вещества для конкретных рудных компонентов сульфидной минерализации месторождения Радужное.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные новые геологические, изотопно-геохронологические и петролого-геохимические данные позволяют уточнить существующие представления о геологическом строении и истории развития региона и могут быть использованы для прогнозных построений и поисков золоторудной минерализации на флангах месторождения Радужное и смежных участках Безенгийского рудного района.

Фактический материал, подходы и методы исследований.

Геологические исследования и сбор каменного материала. Работа выполнена на основе изучения коллекции образцов, собранной автором в ходе полевых работ в 2011–2020 гг., а также материалы, полученные в процессе работы в составе Безенгийской партии Кабардино-Балкарской геологоразведочной экспедиции (ГП КБР «КБГРЭ») геологом I категории в 2008–2009 гг. Имеющийся каменный материал (85 образцов) был использован для изготовления прозрачно-полированных шлифов, аншлифов, а также выделения мономинеральных фракций. Сульфидная минерализация представлена 31 образцом, отобранным из рудных зон Первая, Орлиная, Лагерная, Гипсовая и Кишлык-су как из коренных выходов рудных тел, так и из керна скважин. Отбор вмещающих осадочных и магматических пород производился как на самом месторождении Радужное, так и в пределах всего Безенгийского рудного района.

Геохимические и изотопно-геохимические исследования. Данные о химическом составе пород (породообразующие оксиды) получены методом РФА в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» с использованием спектрометра Axios mAX (PANalytical) (аналитик – А.И. Якушев). Редкоземельные и микроэлементы в образцах пород определялись методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Thermo XII – Series (аналитик – Я.В. Бычкова).

Измерения изотопного состава Pb (18 проб) проведены на многоколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой

(MC-ICP-MS) NEPTUNE по методике (Чернышев и др., 2007) в ИГЕМ РАН (аналитик – А.В. Чугаев). К-Ag датирование молодых магматических образований Безенгийского рудного района, а также флогопита из основных пород ХВПК выполнено в ИГЕМ РАН (аналитик – В.А. Лебедев, при участии автора) на масс-спектрометре МИ-1201ИГ по методике (Лебедев и др., 1997; Чернышев и др., 2006). U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов (20 анализов) из пород ХВПК проведены на ионном микрозонде SHRIMP-II в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

Минералогические и петрографические исследования выполнялись в прозрачных и прозрачно-полированных шлифах (72 шт.), аншлифах (24 шт.) и шашках (12 шт.). Химический состав сульфидов и самородного золота был изучен на микрозонде JEOL JXA-8200 (EPMA) с пятью волновыми дисперсионными спектрометрами (ЦКП «ИГЕМ-Аналитика», аналитики – Е.В. Ковальчук и С.Е. Борисовский). Химический состав жильных минералов, минералов зоны окисления и других сопровождающих минералов изучен с использованием энергодисперсионного микроанализатора (СЭМ JSM-5610LV (JEOL) с ЭДС INCA (Oxford Instruments Analytical) с программным обеспечением INCA Energy 450; аналитики – А.В. Мохов и П.М. Карташов). Изучение состава редкоземельных минералов из вулканитов ХВПК проведено на модернизированном микрозондовом анализаторе Camebax-microbeam (Франция) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИМГРЭ.

Апробация работы и публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 6 статьях и 15 тезисах докладов на российских и международных научных конференциях: на IV международной студенческой геологической конференции, Брно, Чехия, 2013; Goldschmidt, Флоренция, 2013; IV, VI научной молодежной школе ИГЕМ РАН «Новое в познании процессов рудообразования». Москва, 2014, 2016; XV международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 2014; Московской международной школе наук о Земле, Москва, 2016; VIII Международной Сибирской конференции молодых ученых, Новосибирск, 2016; XXXIV Международной конференции «Магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов», Миасс, 2017; «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты». Москва, ИГЕМ РАН, 2017; VII Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», Ессентуки, 2017; «Металлогения древних и современных океанов. Вулканизм и рудообразование», Миасс, 2018; IX Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», Москва, ЦНИГРИ, 2019; V Всероссийской конференции «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных

плит», Владивосток, 2021; «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», Ессентуки–Грозный, 2021.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии при проведении всех этапов работ, включая:

- сбор и анализ фондовой и опубликованной литературы по геологическому строению изучаемой и сопряженных территорий;
- отбор образцов из обнажений и керна пробуренных скважин; выполнение минералогических исследований руд;
- пробоподготовку, проведение химических анализов и интерпретацию данных;
- обработку результатов исследований и написание научных публикаций; участие в научных конференциях с докладами.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 9 глав, заключения, перечня сокращений, рисунков и таблиц, списка литературы. Общий объем 228 страниц машинописного текста, включая 124 рисунка и 19 таблиц. Список литературы состоит из 190 наименований.

Содержание диссертации. В **главе 1** приведен геологический очерк Безенгийского рудного района. **Глава 2** является обзором истории исследования месторождения Радужное. **Глава 3** посвящена подробному рассмотрению геологического строения месторождения Радужное. В **главе 4** приведено описание фактического материала и методов, использованных при работе над диссертацией. В **главе 5** детально рассмотрены петролого-геохимические характеристики, возраст и происхождение магматических пород ХВПК. Метасоматические изменения вмещающих руды пород рассмотрены в **главе 6**. **Глава 7** посвящена описанию минерало-геохимических особенностей руд месторождения. Рассмотрены текстурно-структурные особенности, минеральные ассоциации и особенности состава основных рудных минералов месторождения; нерудные минералы и минералы зоны окисления. В **главе 8** приведены результаты Pb-изотопных данных, обсуждаются источники вещества рудной минерализации месторождения. **Глава 9** обобщает все полученные автором результаты и содержит выводы об условиях формирования месторождения Радужное.

Структура автореферата сформирована согласно защищаемым положениям.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю чл.-корр. РАН д.г.-м.н. Петрову В.А., за помощь, поддержку и полезные обсуждения при подготовке работы – к.г.-м.н. Лебедеву В.А., к.г.-м.н. Чугаеву А.В., д.г.-м.н. Самсонову А.В., Карташову П.М., к.г.-м.н. Плотинской О.Ю., к.г.-м.н. Газееву В.М., к.г.-м.н. Добровольской М.Г., к.г.-м.н. Андреевой О.В., за помощь в проведении U-Pb датирования цирконов из пород хуламского комплекса – д.г.-м.н. Кременецкому А.А., за выполнение аналитических определений – к.г.-м.н. Бычковой Я.В., Ковальчук Е.В. и к.г.-м.н. Борисовскому С.Е. Автор крайне признателен д.г.-м.н. Курбанову Н.К. и к.г.-м.н. Емжуеву А.С. за помощь в проведении полевых исследований, а

также геологам Кабардино-Балкарской геологоразведочной экспедиции Барановскому А.Ф., Давиденко В.П. и Аксаментову Е.В. – за бесценный опыт совместных полевых работ.

Геологическое строение Безенгийского рудного района и месторождения Радужное.

Месторождение Радужное расположено в центральной части Безенгийского рудного района (БРР), включающего ряд Au-рудных объектов, пространственно ассоциированных с гипабиссальными интрузиями хуламского вулканоплутонического комплекса (ХВПК). В тектоническом плане Безенгийский район находится в пределах Балкаро-Дигорского блока зоны Главного хребта (Эльбрусская подзона) (рис. 1). Наиболее крупными из тектонических нарушений являются разломы общекавказского простириания, относящиеся к Саурданской системе.



Рис. 1. Схема

- 1 – тектонического
- 2 районирования района
- 3 исследований (лист К-38- VIII), по материалам (Письменный и др., 2002) с дополнениями автора.
- 4 Прямоугольником показан Безенгийский рудный район.
- 5, 6 – палеозойский фундамент зоны Главного хребта (1 – Эльбрусская подзона, 2 – Перевальная подзона); 3 – юрские депрессии; 4 – зона
- 7 – Главного Кавказского разлома.

верхнеюрской – палеогеновой моноклинали; 5 – неоген-четвертичные вулканогенно-осадочные образования; 6 – тектоническая зона Южного склона БК (Большого Кавказа); 7 – Главный Кавказский разлом. Номера в кружках: I – Шхарский блок; II – Адайхохский блок; III – Балкаро-Дигорский блок; IV – Штулу-Харесская депрессия; V – Северная Юрская депрессия; VI – моноκлираль Скалистого хребта; VII – Верхнечегемская кальдера; VIII – Осегинская впадина; IX – зона Южного склона БК.

Кристаллический фундамент района сложен метаморфическими образованиями палеозоя (кристаллические сланцы, гнейсы, гранито-гнейсы и амфиболиты), прорванными гранитоидами D–C₁ возраста (Сомин, 2005). Нижне-среднеюрские отложения района представлены осадочными толщами, сложенными песчаниками, аргиллитами, алевролитами, глинистыми сланцами. Проявления юрского магматизма, известные на территории региона, отнесены к двум комплексам (казбекскому и

хуламскому); в его западной и южной частях распространены позднекайнозойские магматические образования трех комплексов (цанского, чегемского и эльбрусского). Магматизм ХВПК, характеризующийся повышенной щелочностью, масштабно проявился в междуречье р. Чегем – Черек Балкарский.

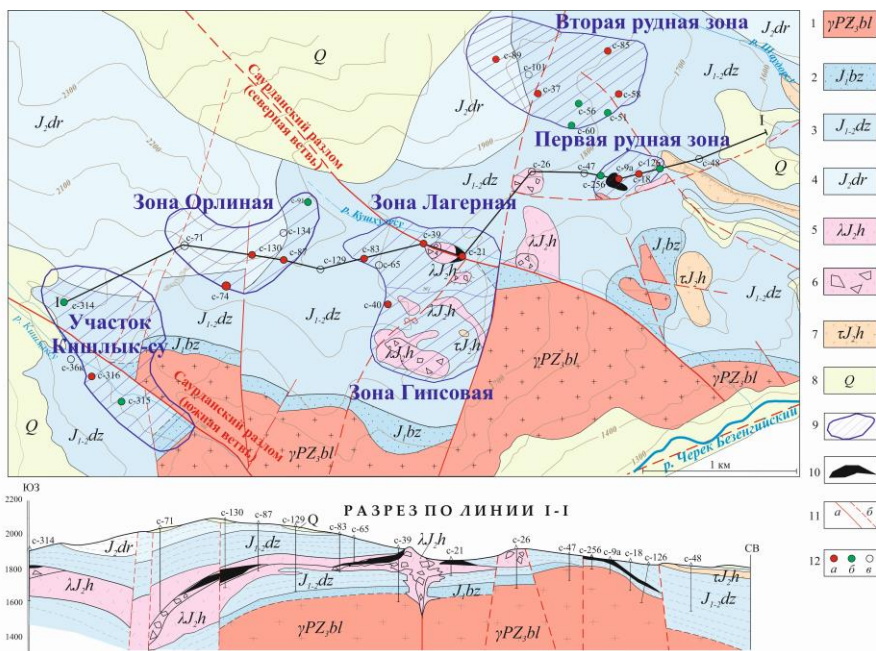


Рис. 2. Схематическая геологическая карта и разрез с вынесенными контурами рудных участков месторождения Радужное. Составлена по материалам Качурин и др., 1991; Письменный и др., 2002 с дополнениями автора.

1 – граниты белореченского комплекса (С₁₋₂); 2–4 – осадочный чехол, J₁₋₂ (2 – безенгийская свита, 3 – джигатская свита, 4 – джорская свита); 5 – риолиты ХВПК; 6 – жерловые фации риолитов; 7 – трахиты ХВПК; 8 – четвертичные отложения; 9 – проекция рудных тел на дневную поверхность; 10 – рудные тела на разрезе и выходы на дневную поверхность; 11 – разрывные нарушения (а – установленные, б – предполагаемые), 12 – поисково-разведочные скважины (а – Au >1 г/т; б – Au 0.5-1 г/т; в – Au <0.5 г/т).

В пределах рудного района широко развиты брекчии различного происхождения: тектоногенные, эруптивные магматогенные и флюидно-эксплозивные гидротермальные (рис. 3). Последние два типа связаны с проявлением среднеюрского кислого магматизма ХВПК. Эруптивные магматические брекчии развиты как в экзоконтактах гипабиссальных тел, так

и в центральных частях сложных субвулканических построек. Флюидно-эксплозивные гидротермальные брекчии представляют наибольший промышленный интерес, поскольку, чаще всего, вмещают рудную минерализацию. Для них характерна крайняя неоднородность состава обломков и цемента. Ими образованы трубки неправильной формы, линзовидные межпластовые тела. Состоят они из обломков аргиллитов, песчаников, вулканитов и сульфидных руд. Цемент карбонатно-кремнистый, кварцевый, карбонат-баритовый, гематитовый, редко сульфидный. Присутствуют признаки многократного брекчирования; при этом не наблюдается сортировки обломков по размеру. Рудная минерализация локализуется как в цементе брекчий, так и в обломках пород.

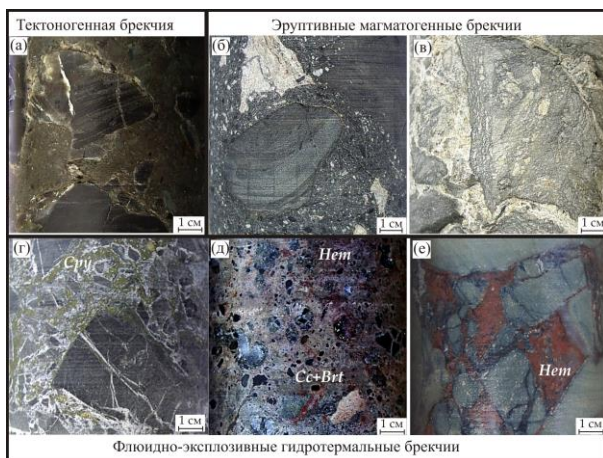


Рис. 3. Различные типы брекчий месторождения Радужное.¹
 а – тектоногенная брекчия;
 б, в – эруптивные магматогенные брекчии;
 г, д, е – флюидно-эксплозивные брекчии.

Рудные тела месторождения локализуются во флюидно-эксплозивных брекчии среди вмещающих их юрских терригенных толщ и вулканитов ХВПК. Они разнообразны по своей морфологии, преимущественно имеют линзовидную и изометричную формы, форма рудных тел обусловлена экранирующей ролью ранних фаз внедрения кислых пород ХВПК и глинистых сланцев байоса. Рудные тела на месторождении оконтурены по бортовому содержанию золота 0.5 г/т. Глубина залегания рудных тел от 0 до 400 метров. Руды месторождения имеют массивную, пятнистую, вкрапленную, прожилковую и брекчиевидную текстуры. Метаколлоидных и полосчатых текстур, характерных для классических Au-Ag месторождений, на объекте не встречено. Структуры руд, как правило, равномернoзернистые (от микро до крупнозернистых). Содержание Au в рудах колеблется от 0.1 до 215 г/т и Ag – от 1 до 4000 г/т.

¹ сокращения названий минералов – согласно Whitney et al., 2010

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Магматические породы хуламского вулканоплутонического комплекса представлены бимодальной ассоциацией габбро+трахиандезибазальты – трахиты+риолиты. Изотопно-геохронологические данные свидетельствуют о том, что породы комплекса образовались в средней юре (байос – келловей) на завершающем этапе мезозойского тектономагматического цикла развития Большого Кавказа в постколлизивной геотектонической обстановке. Магматические расплавы формировались в обогащенном мантийном источнике и имели геохимические характеристики, близкие таковым для обогащенных базальтов срединно-океанических хребтов (E-MORB).

Изученные магматические породы ХВПК относятся к контрастной бимодальной ассоциации габбро+трахиандезибазальты – трахиты+риолиты (рис. 4а); их детальное петрографическое описание приведено в диссертационной работе. Породы комплекса представлены, главным образом, полнокристаллическими разностями, что говорит об их преимущественно субвулканической природе. Эффузивные образования встречаются только среди основных по составу пород. Габброиды сложены кальциевым *Pl* и *Cpx*, второстепенные минералы – *Phl* и *Ol*. Трахиты состоят из микролитов *Pl* с крупными вкрапленниками *Kfs*. Риолиты как правило сложены *Qz* и *Pl*, в порфириновых разностях встречается *Sa-Or*.

Мафические разности пород ХВПК (плутоническая и вулканическая фации) содержат (мас. %) 48.7–56.4 SiO_2 , 4.7–6.7 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, 4.5–7.4 MgO . Это умеренно-щелочные, в различной степени дифференцированные ($Mg\#$ 0.38–0.62) умеренно- или низкокальциевые породы (рис. 4).

Трахиты ХВПК (субвулканическая фация) содержат (мас. %) 59.7–65.5 SiO_2 , 7.7–12.2 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ и относятся к умеренно-щелочной петрохимической серии. Это высококальциевые высокодифференцированные ($Mg\#$ 0.19–0.55) образования, которые заметно обогащены Zr (до 1000 г/т), в меньшей степени – Nb (до 100 г/т) и Y (до 70 г/т).

Риолиты ХВПК (субвулканическая фация) содержат (мас. %) 68.2–84.6 SiO_2 , 2.3–12.3 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ и относятся к умеренно-щелочной и известково-щелочной петрохимическим сериям. Они характеризуются существенными вариациями по соотношению кремнезема и щелочей, в том числе SiO_2 и K_2O (рис. 4а), а также отношению $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Последний параметр позволяет разделить риолиты на четыре подгруппы: ультракальциевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} >40$), высококальциевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ от 15 до 40), калиевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ от 2 до 15) и низкокальциевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} <2$) (рис. 4б). Последние аномально обогащены Zr (до 2600 г/т), Nb (до 280 г/т) и Y (до 150 г/т) по сравнению с кларками для кислых магматических пород (Соловов и др., 1990).

² Содержания порообразующих оксидов, приведенные в тексте и на диаграммах, нормализованы к 100%.

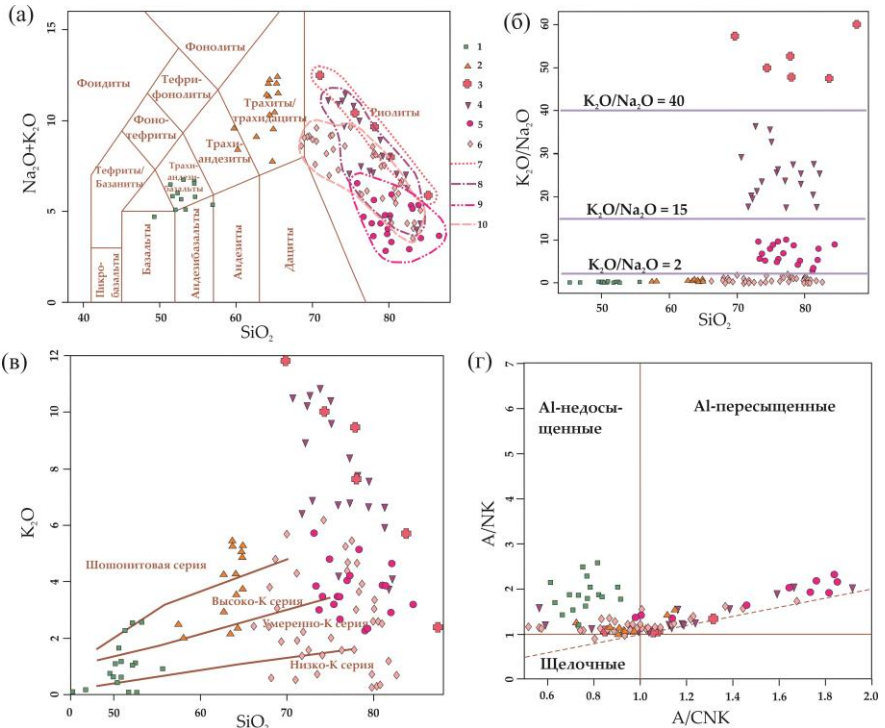


Рис. 4. Диаграммы (а) $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Le Bas et al., 1986), ТА – трахиандезиты, ТАВ – трахиандезибазальты; (б) $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$; (в) $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Rickwood, 1989); (г) ANK--ACNK (Shand, 1943) для магматических образований ХВПК (по данным автора и из работ (Газеев и др., 2019; Горохов и др., 1968; Григорчук и др., 1980; Давиденко и др., 1993; Калинин и др., 1979; Коптюх и др., 1985; Спасский и др., 1982).

1 – основные магматические породы ХВПК; 2 – трахиты ХВПК; 3–6 – риолиты ХВПК (3 – ультракалийевые, 4 – высококалийевые, 5 – умеренно-калийевые, 6 – низкокалийевые); 7–10 – поля различных типов риолитов ХВПК (7 – ультракалийевые, 8 – высококалийевые, 9 – умеренно-калийевые, 10 – низкокалийевые); 11 – поле магматических пород казбекского комплекса, J_2 (Газеев и др., 2018); 12 – поле магматических пород фиагдонского комплекса, J_1 (Гурбанов и др., 2017).

На бинарных диаграммах Харкера для породообразующих оксидов (Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , FeO и CaO) наблюдаются негативные линейные тренды, формируемые всеми точками изученных пород ХВПК вне зависимости от их состава. Для основных пород, трахитов и части низкокалийевых риолитов заметны общие слабовыраженные положительные корреляции между содержанием в них щелочей и SiO_2 .

Концентрации когерентных элементов (Ni, Co, Cr, и др.) в породах ХВПК характеризуются отрицательной корреляцией с содержанием в них

SiO₂; четкая негативная зависимость наблюдается и в отношении Sr. Концентрации высокозарядных микроэлементов (HFSE) демонстрируют положительную корреляцию с содержанием SiO₂ в породах. Распределение некогерентных элементов (LILE) в породах ХВПК характеризуется положительной корреляцией их концентраций с содержанием SiO₂. Концентрации редкоземельных элементов (REE) демонстрируют положительную зависимость от содержания SiO₂ в породах; исключением является Eu, для которого присутствует линейный негативный тренд.

На спектрах распределения микроэлементов для основных пород ХВПК, нормированных по N-MORB, заметно их существенное обогащение LILE, кроме калия, содержание которого варьирует (рис. 5а). Концентрации HFSE в целом превышают значения, характерные для N-MORB, в 5–10 раз. Породы обогащены LREE в среднем от 2 до 10 раз и при этом имеют близкие с N-MORB концентрации HREE. Для спектров заметны явные аномалии по содержаниям Li, Pb, и иногда – Cs. Характер распределения микроэлементов для основных образований ХВПК является промежуточным между таковым для базальтов океанических островов (OIB) и обогащенных базальтов срединно-океанических хребтов (E-MORB). Спектры распределения микроэлементов для трахитов и риолитов ХВПК (рис. 5б), нормированные по N-MORB, показывают еще большее по сравнению с основными породами различие их обогащения LILE, HFSE и REE. В спектрах для риолитов заметны выраженные отрицательные аномалии для Ba, Sr, P, Eu и Ti и положительная – для Pb. Трахиты также характеризуются отрицательными аномалиями по концентрациям Sr, P, Eu и Ti, однако они выражены менее заметно по сравнению с таковыми для кислых пород.

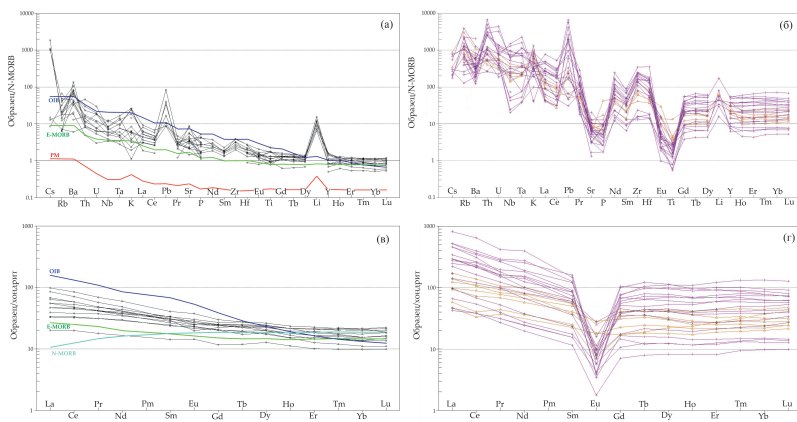


Рис. 5. Спектры распределения микроэлементов и REE для изученных магматических образований ХВПК.

(а, в – в основных породах, б, г – в трахитах (оранжевый) и риолитах (розовый), соответственно). Данные для нормирования взяты из (Sun, McDonough, 1989; Anders, Grevesse, 1989).

Спектры распределения REE для основных пород ХВПК, нормированные по отношению к хондритам, имеют пологий наклон с преимущественным обогащением LREE по отношению к HREE. Eu-аномалия отсутствует. Характер распределения REE в основных породах является промежуточным между таковым для OIB и E-MORB (рис. 5в). Трахиты характеризуются более заметным обогащением LREE, близкими с основными породами концентрациями HREE и заметной отрицательной Eu-аномалией в спектрах распределения (рис. 5г). Риолиты демонстрируют широкие вариации концентраций LREE с обогащением по отношению к хондритовому резервуару от 50 до 1000 раз, а также HREE с обогащением от 10 до 100 раз. Отрицательная Eu-аномалия в спектрах имеет отчетливый характер.

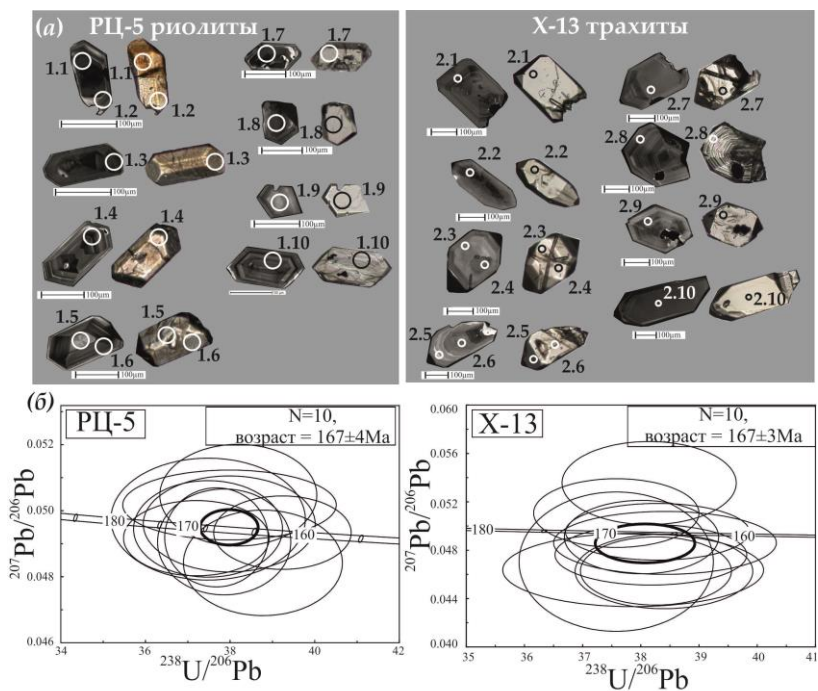


Рис. 6. Результаты U-Pb датирования цирконов из риолитов и трахитов ХВПК.

а – катодоллюминесцентные и оптические изображения кристаллов цирконов из риолитов (обр. РЦ-5) и трахитов (обр. Х-13) ХВПК; б – U-Pb-диаграммы с конкордией для цирконов из риолитов (обр. РЦ-5) и трахитов (обр. Х-13) ХВПК.

Вплоть до настоящего времени оставался открытым вопрос о возрасте вулканогенных образований ХВПК. Одни исследователи предполагали его

раннеюрским (Лебедев, 1950), другие – байосским (Безносков и др., 1959 и др.), третьи – в диапазоне от тоара до байоса (Борсук, Цветков, 1973). А.Г. Долгих (1978) силлы и дайки диабазов Чегем–Черекского района относит к ааленскому веку. С целью определения возраста пород потенциально рудоносного ХВПК автором были отобраны индивидуальные зерна цирконов из образцов риолита и трахита (рис. 6). Полученные U-Pb датировки (167 ± 4 млн лет для обр. РЦ-5 и 167 ± 3 млн лет для обр. X-13) совпадают в пределах погрешности измерений, что свидетельствует о близком времени формирования кислых и умеренно-кислых магматических образований ХВПК. Средневзвешенное значение изотопного возраста для обоих образцов соответствует середине батского века средней юры, но с учетом погрешностей датировок вероятный диапазон образования трахитов и риолитов может быть более строго оценен как байос–келловей. К-Ar датирование мономинеральной фракции флогопита из габброидов долины р. Кардан подтвердило среднеюрский возраст и для основных пород хуламского комплекса (Кайгородова, Лебедев, 2022).

Петролого-геохимические данные свидетельствуют о том, что ведущую роль в петрогенезисе пород ХВПК играли процессы кристаллизационной дифференциации (FC) с осаждением на ранних стадиях магматического процесса *O1*, *Cpx*, кальциевого *Pl*, а также *Ilm/Ti-Mag* и *Ap*. На поздней стадии ведущей фазой FC-процесса оставался основной *Pl*. Ассимиляция магматическими расплавами вещества вмещающих коровых образований не имела какого-либо заметного влияния.

REE и Nb-Ta специализация ХВПК обусловлена ведущей ролью FC-процессов в петрогенезисе пород, которая привела к заметному обогащению наиболее кислых вулканитов некоторыми некогерентными элементами, в том числе редкими и REE (Zr – до 2700 г/т, Nb – до 300 г/т, Ta – 30 г/т, Ce – до 400 г/т). В постмагматическую стадию преобразования трахитов и риолитов проявился автотаморфизм, обусловивший появление минералов ниобия и REE (ильменорутила и фторкарбонатов REE, соответственно), которые присутствуют лишь в метасоматически измененных породах.

По своим геохимическим характеристикам магматические породы (и кислые, и основные разности) ХВПК близки внутриплитным континентальным образованиям. Полученные изотопно-геохронологические и петролого-геохимические данные, в совокупности, показывают, что породы ХВПК образовались на завершающем этапе мезозойской тектономагматической активизации Большого Кавказа, скорее всего, уже в постколлизивной геотектонической обстановке (после завершения в регионе процессов субдукции и континентальной коллизии, рис. 7). Возможно, этот небольшой по площади ареал развития магматизма повышенной щелочности приурочен к локальной зоне растяжения, возникшей в тылу бывшей активной континентальной окраины. Важным моментом является то, что полученные геохронологические данные впервые позволили точно установить время окончания мезозойской магматической

активности на северном склоне Большого Кавказа, т.к. датированные образования ХВПК (а также вероятно джалпакского комплекса на территории КЧР, имеющего повышенную щелочность), относятся именно к ее заключительному этапу.

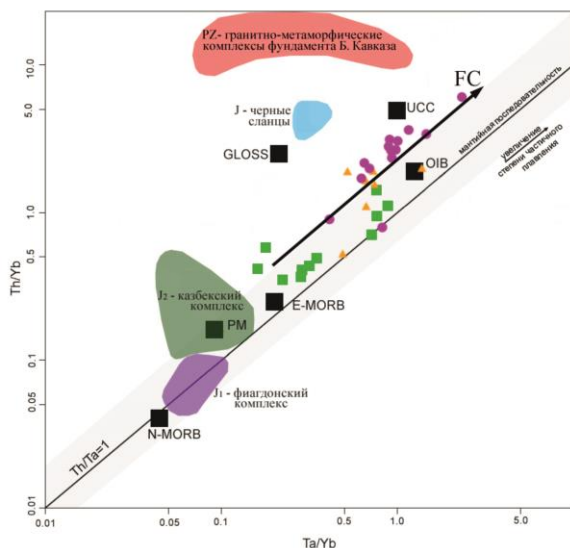


Рис. 7. Диаграмма Th/Yb – Ta/Yb (Pearce, 1982) для пород ХВПК. Использованы данные из (Гурбанов и др., 2017; Газеев и др., 2018; Лебедев и др., 2018). Условные обозначения см. рис. 4.

2. Минеральный состав руд (пирит + халькопирит + сфалерит + галенит + блеклые руды + бурнонит), их пространственная связь с бимодальным континентальным постколлизийным магматизмом повышенной щелочности, невысокая пробность золота (419–670 ‰) и характер околорудных метасоматических преобразований (формации низкотемпературных гидротермальных аргиллизитов) свидетельствуют о том, что месторождение Радужное может быть отнесено к типу эпитермальных промежуточно-сульфидизированных золоторудных месторождений.

Руды месторождения сложены тремя минеральными ассоциациями, в распределении которых наблюдается вертикальная зональность (минеральный состав выделенных рудных ассоциаций приведен в таблице 1). (1) В верхних горизонтах флюидно-эксплозивных брекчий развита Au-Ag-малосульфидная ассоциация, образованная баритом (*Br*) и карбонатами с акантитом (*Ac*), самородным Au (*Au*), галенитом (*Gn*), сфалеритом (*Sp*), халькопиритом (*Ccp*). Данная ассоциация имеет крайне ограниченное распространение в пределах месторождения и описана в центральной части месторождения (Первая рудная зона). (2) Au-сульфидная ассоциация характерна для рудных тел, пространственно связанных с лакколитами и силлами риолитов. Наряду с полиметаллической минерализацией, *Ccp* и *Au* здесь широко развит пирит (*Pu*) и сульфосоли. Жильные минералы

представлены кварцем (*Qz*), *Brt*, гипсом (*Gp*) и ангидритом. (3) В гранитах фундамента и нижнеюрских песчаниках безенгийской свиты локализована полиметаллическая (галенит-сфалерит-халькопиритовая) ассоциация, с которой не связаны промышленные концентрации золота (содержания не превышают 0.2–0.8 г/т). Рудные минералы: *Gn*, *Sp*, *Ccp*, *Pu*; жильные минералы – *Qz* и *Brt*.

По результатам проведенных поисковых и геологоразведочных работ (Мезенина и др., 1982) было установлено, что промышленными (с содержаниями Au >0.5 г/т) являются Au-Ag-малосульфидная и Au-сульфидная ассоциации минералов.

Всего в рудах месторождения Радужное установлено 40 различных минералов (включая гипергенные и минералы метасоматически измененных вмещающих пород, такие как серицит, иллит-сметтит, каолинит). Наиболее распространенными минералами на месторождении Радужное являются *Pu*, *Ccp*, *Gn*, *Sp*, *Qz*, *Brt*, *Gp*, карбонаты. К крайне редко встречаемым минералам можно отнести арсенопирит, борнит, молибденит, флюорит, кераргирит.

Таблица 1. Минеральный состав руд месторождения Радужное.

Ассоциации	Золото-серебряная малосульфидная	Золото-сульфидная	Полиметаллическая
Главные минералы	Акантит, сфалерит, галенит, гематит, барит, кальцит, доломит, железистый доломит	Пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды (тетраэдрит-(Zn), теннантит-(Fe,Zn), бурнонит), кварц, гипс, ангидрит	Кварц, халькопирит, сфалерит, галенит, барит
Редкие минералы	Самородное золото	Самородное золото, барит, кальцит, доломит	Пирит

Примечание. Жирным шрифтом выделены минералы, присутствие которых в рудах месторождения Радужное впервые установлено авторами.

Пирит присутствует практически во всех минеральных ассоциациях месторождения и весьма разнообразен по форме и размерам выделений, что, вероятно, указывает на его принадлежность к нескольким генерациям. Условно, на основе морфологии выделений, особенностей состава и условий нахождения, было выделено четыре генерации *Pu*, состав которых был изучен с помощью РСМА (38 точек). *Pu-I* и *Pu-II* являются дорудными.

Pu-I (осадочно-диагенетический) образует послойную или рассеянную вкрапленность в юрских осадочных породах, представлен фрамбоидами и мелкими кубическими кристаллами размером до 20 мкм. Для *Pu-I* характерно крайне низкое содержание примесей Cu (0.20 мас. %), отмечаются примеси (мас. %) As – 0.06–2.16, Sb – 0.05–0.23, Ni – 0.11–0.16 и Co – 0.06–0.11.

Pu-II присутствует в серицитизированных и пропилитизированных гранитах, юрских осадочных породах и вулканитах в ассоциации с серицитом и хлоритом. Для него характерна пентагон-додекаэдрическая

форма кристаллов с размерами до 200 мкм и зональное распределение примеси As (0.46–2.17 мас. %) в различных зонах роста единого кристалла. Отмечены небольшие примеси (мас. %) Cu (0.10–0.26), Sb (0.06–0.07) и Co (0.06–0.07).

Py-III является основным минералом Au-сульфидной ассоциации; он образует гипидиоморфные выделения в сульфидных и кварц-сульфидных рудах в ассоциации с *Sp*, *Ccp*, *Fhl* и *Gn*. Для данного морфологического типа характерны примеси (мас. %) As – 0.06–0.19, Cu – 0.06–1.25, Co – 0.06–0.07 и Ni – 0.06–0.09; примесей Sb не отмечено.

Py-IV образует идиоморфные кристаллы в кварц-сульфидном цементе флюидно-эксплозивных брекчий. *Py-IV* имеет тесные агрегатные сростания с *Qz*, *Brt*, *Sp*, *Ccp* и *Gn*. Для него характерны примеси (мас. %) As – 0.23–3.55, Cu – 0.13–0.42, а также Co (0.08), Ni (0.09) и Sb (0.10–0.20).

Сфалерит. Большинство выделений *Sp* находится в сростаниях с *Gn*, *Ccp*, *Py* и образует агрегаты неправильной формы. *Sp* месторождения Радужное характеризуется низким содержанием железа (≤ 0.22 мас. % Fe) и отнесен к клейофану. С помощью РСМА (35 анализов) был изучен состав *Sp* из различных ассоциаций. Для Au-сульфидной и Au-Ag малосульфидной ассоциаций согласно полученным данным характерны два незначительно различающихся по составу *Sp*.

Sp-I ассоциирует с пиритом, халькопиритом и галенитом в сульфидных рудах и кварц-сульфидных жилах. Состав сфалерита-I (мас. %): Zn – 59.19–66.58, S – 31.26–33.29. *Sp-I* характеризуется следующими примесями (мас. %): Fe – 0.11–0.98, Cd – 0.11–1.04, Cu – 0.05–0.36, In – 0.09–0.11, Hg – 0.06. *Sp-II* чаще всего ассоциирует с баритом и карбонатами (*Dol*, *Cal*). Зерна *Sp* данного типа часто покрыты тонкой пленкой акантита. Состав *Sp-II* (мас. %): Zn – 63.31–67.31, S – 32.43–33.21. Он имеет следующие примеси (мас. %): Fe – 0.01–0.05, Cd – 0.24–0.62, In – 0.07–0.09, Sn – 0.04–0.05, Cu – 0.06.

Sp малосульфидной ассоциации характеризуется минимальными содержаниями Fe по сравнению со сфалеритом Au-сульфидной ассоциации (менее 0.1 и 0.2–1.1 мол. % FeS, соответственно). При этом концентрации Cd в обеих ассоциациях лежат почти в одном диапазоне 0.1–0.6 мол. % CdS, хотя отмечаются единичные анализы *Sp* Au-сульфидной ассоциации, в которых содержания Cd достигают 0.8–1.0 мол. % CdS).

Галенит представлен единичными кристаллами и агрегатами зерен. В Au-сульфидной ассоциации *Gn* встречается с *Sp*, *Py*, *Ccp*. Исследование состава галенита с помощью РСМА показало, что состав его стехиометричен и в большинстве случаев содержания элементов-примесей (Cd, As, Se) ниже предела обнаружения. По данным 48 анализов лишь в единичных образцах отмечено присутствие (мас. %) Ag – 0.07, Sb – 0.13, Bi – 0.09–0.13, Cu – 0.19–0.60 и Fe – 0.06–3.77.

Халькопирит встречается на всех участках месторождения Радужное. Наблюдается в сростании с *Sp*, *Gn*, окаймляет кристаллы *Pu*. Совместно с *Sp*, *Gn*, *Fhl* ассоциирует с золотом. Средний состав *Csp* по данным 4 микрозондовых анализов (мас. %): Cu – 34.91, S – 35.35, Fe – 29.67.

Сульфосоли на месторождении представлены *блеклой рудой* и *бурнонитом*, которые встречаются в виде спорадических выделений в ассоциации с *Csp*, *Sp*, *Gn*, *Pu*. Их содержание в рудах не превышает 1 об. %.

Блеклая руда обнаружена в сростании с *Sp*, *Gn*, *Csp* и бурнонитом и присутствует в пирите в виде мелких изометричных включений. Содержание основных элементов (по данным 17 анализов) в *Fhl* следующее (мас. %): Cu – 33.64–39.47, Ag – 0.39–3.56, Zn – 4.09–6.83, Fe – 1.26–4.81, Pb – до 0.13, Cd – до 0.17, Sb – 12.39–27.64, As – 1.77–11.57, Bi – до 0.17, S – 25.52–27.95, Se – до 0.11. Соотношения Sb/(Sb+As) и Fe/(Fe+Zn) варьируют соответственно от 0.40 до 0.91 и от 0.58 до 0.18. В *блеклой руде* отмечается обратная зависимость между соотношениями Sb/(Sb+As) и Fe/(Fe+Zn). Согласно последней номенклатуре (Biagioni et al., 2020), *блеклая руда* на месторождении Радужное представлена главным образом Ag-содержащим тетраэдритом-(Zn), реже Ag-содержащими теннантитом-(Fe) и теннантитом-(Fe,Zn).

Бурнонит, на месторождении описан впервые, обнаружен в виде ксеноморфных выделений в *Gn* и тетраэдрите. Вероятно, бурнонит замещает последние, поскольку наблюдаются мельчайшие цепочки его выделений в галените и тонкие и короткие просечки – в тетраэдрите. По результатам РСМА исследований (8 анализов) содержание элементов в бурноните варьирует (мас. %): Pb – 39.87–46.79, Cu – 11.47–14.21, Sb – 17.90–26.09, As – 0.29–3.10, S – 19.74–20.24, Zn – 0.43–1.84, Fe – 0.23–0.82; Ag, Hg, Cd, Bi, Se – ниже предела обнаружения. Таким образом, на месторождении Радужное встречен бурнонит–зеллигманитовый твердый раствор с непрерывным изоморфизмом в интервале соотношений Sb/(Sb+As) от 0.98 до 0.79.

Для сульфидных твердых растворов месторождения Радужное выполнены расчеты рудной геотермометрии. *Блеклая руда* (тетраэдрит) и *сфалерит* имеют ровные взаимные границы и отсутствие следов коррозии, что может свидетельствовать о парагенезисе этих минералов. Состав *сфалерита*, сосуществующего с тетраэдритом, следующий (в мас. %): Zn – 61.64, Fe – 0.57, S – 37.79; FeS – 0.96 мол. %. Температура, рассчитанная для этой пары минералов по геотермометру (Sack, Loucks, 1985), составила $162 \pm 25^\circ\text{C}$.

Самостоятельные минеральные фазы Au и Ag на месторождении представлены низкопробным самородным золотом и серебром, акантитом и кераргиритом. Последний является гипергенным минералом. Акантит – основной Ag-содержащий минерал Au-Ag ассоциации, встречается в флюидно-эксплозивных брекчиях со *Sp*, *Gn*, карбонатами и *Brt*.

Самородное золото встречается в основном в *Ccp* и *Gn* (рис. 8); его пробность невысокая (419–670 ‰, среднее значение – 567 ‰, n=10). Золото образует ксеноморфные выделения размером от 5 до 15 мкм. В золоте отмечены примеси Hg до 4.6 мас. % (табл. 2). Состав твердого раствора системы Au–Ag–Hg для месторождения Радужное может быть представлен формулой $(Au_{0.571-0.791}Ag_{0.207-0.390}Hg_{0.002-0.062})$. Детальное рассмотрение твердых растворов данной системы и термодинамических условий их образований приведено в работе (Chudnenko, Palyanova, 2016). В виду относительно низкого содержания Hg, самородное золото месторождения Радужное не может быть отнесено к ртутистому золоту, а, как известно (Наумов, 2007), для близповерхностных месторождений, где широко проявлены процессы вскипания растворов, свойственно именно Au с низкими содержаниями Hg.

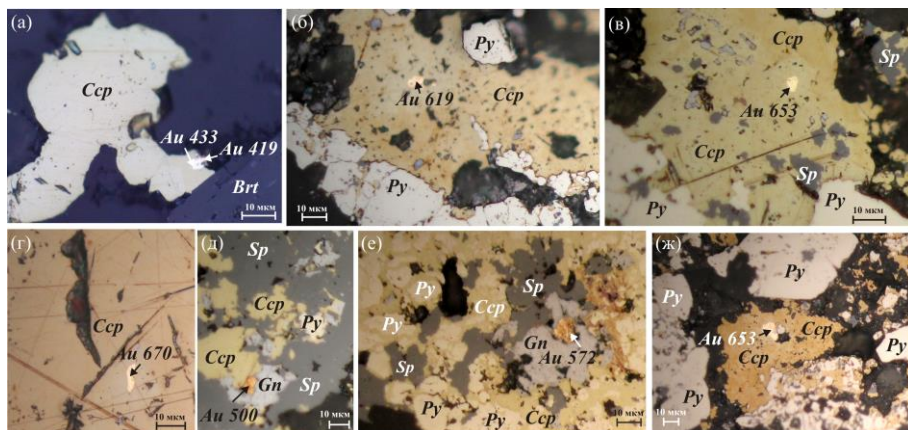


Рис. 8. Самородное золото в *Ccp* и *Gn*, Первая рудная зона, скв. 3001. Полированные шлифы. Цифры – пробность Au.

Таблица 2. Состав самородного Au и Ag месторождения Радужное (PCMA, мас. %).

№п/п	№ образца	Au	Ag	Hg	Cu	Fe	Сумма	Пробность Au, ‰
1	3001-2-1	41.91	51.98	2.62	0.00	0.00	96.51	419
2	3001-2-2	43.27	50.76	4.64	0.00	0.00	98.67	434
3	3001/4-1	64.57	32.56	0.00	0.00	0.00	97.13	646
4	3001/4-2	67.02	32.08	0.00	0.00	0.00	99.10	670
5	3001/4-3	65.30	32.05	0.00	0.00	0.00	97.34	653
6	3001/4-4	61.94	34.96	0.91	0.00	0.00	97.80	619
7	3001/4-5	65.35	32.29	0.00	0.00	0.00	97.64	653
8	3001/4-12	50.21	47.79	0.00	0.00	0.00	98.00	502
9	3001/5-6	50.03	43.98	0.00	0.72	0.41	95.15	500
10	3001/5-7	57.15	38.21	0.00	0.29	0.31	95.97	571
11	Коптюх и др., 1985)	19.32	70.12	9.93	0.00	0.00	99.37	193

Самородное серебро (единичное измерение, табл. 2) отмечено по литературным данным (Коптюх и др., 1985) в рудах Au-Ag-малосульфидной ассоциации Первой рудной зоны. Нахождение в рудах самородного серебра (формула твердого раствора может быть представлена в виде $Au_{0.285}Ag_{0.566}Hg_{0.149}$), содержащего 19.32 мас. % Au и 9.93 мас. % Hg требует дополнительного изучения, поскольку это может говорить как об изменении термодинамических условий рудообразования на самых поздних стадиях рудоотложения, так и о развитии экзогенных процессов.

Жильные и метасоматические минералы

Наиболее распространенным нерудным минералом на месторождении является *кварц*. С дорудным окварцеванием связано образование метасоматического Qz , который развивается как по осадочным, так и по магматическим породам. Qz этого типа образует зерна с неправильными зубчатыми очертаниями. Для жильного Qz можно выделить три разновидности: 1) мутно-серый жильный с гранобластовой структурой, ассоциирующий с рудными минералами Au-сульфидной и полиметаллической ассоциаций; 2) халцедоновидный Qz ; 3) поздний белый и бесцветный кварц, образующий секущие прожилки, не содержащие сульфидную минерализацию.

Карбонаты представлены Mn-содержащим кальцитом, жильным и метасоматическим доломитом и Fe-доломитом, реже сидеритом. В *Cal* и *Fe-Dol* по данным РСМА присутствует примесь MnO до 2.04 мас. %. *Cal Dol* и *Brt* являются основными минералами Au-Ag малосульфидной ассоциации.

Барит является типичным минералом цемента флюидно-эксплозивных брекчий (Au-Ag малосульфидная ассоциация) и рудных прожилков. По данным РСМА для него отмечена примесь SrO (до 7 мас. %).

Ангидрит и *гипс* широко развиты на месторождении Радужное (Первая рудная зона, Гипсовая и Орлиная зоны). Как правило, они встречаются в зонах дробления в перемятых рассланцованных аргиллитах, реже алевролитах. Эти породы пронизаны прожилками, содержат гнезда или сцементированы белым, иногда розовато-белым ангидрит-гипсовым материалом. *Gr* образует как единичные прожилки, так и сеть довольно мощных прожилков. Суммарная мощность гипсоносных толщ по данным бурения достигает 65–80 м. Характерна ассоциация гипса с первичными неизменными сульфидами, как правило пиритом Au-сульфидной ассоциации.

Смешаннослоистые (ССМ) и глинистые минералы широко развиты в пределах всего месторождения. На основании изучения петрографического состава измененных пород и рентгеноструктурного анализа ССМ, на месторождении Радужное установлены: дорудная пропицитизация (площадное развитие хлоритовых пропицитов) и предрудная серицитизация гранитов и осадочных пород, эпитермальная аргиллизация, выраженная в кислых вулканитах ХВПК настолько интенсивно, что в пределах района исследований практически не сохранились неизмененные магматические

породы. По данным рентгеноструктурного анализа ССМ представлены *Ill-Sme*. Каолинит развивается по полевым шпатам в песчаниках безенгийской свиты и гранитах фундамента в зонах интенсивной гидротермальной проработки. Каолинизированные породы, как правило, имеют очень светлый, практически белый цвет. Серицит встречается в измененных гранитах фундамента и песчаниках безенгийской свиты. Минералы группы *Ill-Sme* широко развиты в вулканических породах ХВПК, где, в результате низкотемпературной аргиллизации, они замещают как основную массу пород, так и вкрапленники *Kfs*. Селадонит развивается в контактовых частях тел риолитов и трахитов с вмещающими их аргиллитами.

Отсутствие минералов, характерных для высокосульфидизированного (HS) типа месторождений (пиррофиллит, алунит и др.), признаки замещения безэпидотовых хлоритовых пропицитов эпитермальными аргиллитами и интенсивное развитие ССМ типа *Ill-Sme* позволяет отнести околорудные метасоматиты месторождения Радужное (по классификации Русинов, 1989) к формации эпитермальных аргиллизитов, характерных для большинства месторождений низкосульфидизированного (LS) и промежуточно-сульфидизированного (IS) типов.

Мощность зоны окисления на месторождении Радужное составляет первые метры. В зоне окисления месторождения изучены минералы надгруппы алунита, *Mlc*, *Cct*, *Lm*, *Jrs*, азурит и другие минералы. Вторичные минералы Pb представлены *Cer*, *Ang* и пироморфитом, образующимися по *Gn*. Минералы надгруппы алунита выявлены автором исключительно в зоне окисления выходящих на дневную поверхность сульфидных рудных тел. Высокогорные условия в сочетании с аридным климатом и непосредственным выходом сульфидных рудных тел на поверхность способствовали высокой скорости испарения, понижению pH, что привело к образованию минералов надгруппы алунита в относительно маломощной зоне окисления руд. Изученные минералы содержат (мас. %): PbO (14.8–33.5), CuO (0.13–2.3) и As₂O₅ (0.0–7.7) и отнесены к рядам плюмбоярозит-бедантит и плюмбоярозит-кинторейт. Также в зоне окисления месторождения встречено самородное Au.

3. Совокупность полученных минералогических, петролого-геохимических и Pb-изотопных данных указывает на поступление рудных компонентов в минералообразующую систему золоторудного месторождения Радужное из нескольких источников. Главным источником Au и Ag являлись магматические расплавы, образовавшие вулканисты хуламского комплекса. Для рудного Pb источниками являлись породы палеозойского фундамента и кислые остаточные расплавы хуламского комплекса, Si извлекалась гидротермальными растворами преимущественно из палеозойских кристаллических сланцев, а Zn из черных сланцев средней юры.

С целью идентификации потенциальных источников вещества проведено Pb-изотопное изучение галенита руд месторождения Радужное (10

образцов), а также валовых проб (8 образцов) магматических и осадочных пород, наиболее широко распространенных в рудном поле (вулканиты ХВПК и вмещающие их черные сланцы). Изотопный состав Pb галенита изменяется в диапазонах для отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 18.205 до 18.360, для $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 15.593 до 15.665 и для $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 38.466 до 38.599. В вариациях обнаруживается положительная корреляция между отношениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, с одной стороны, и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, с другой. На Pb-Pb изотопных диаграммах эти зависимости выражаются в виде коротких трендов, которые интерпретируются как линии, отражающие смещение в рудообразующей системе свинца из двух источников (рис. 9).

Результаты изучения изотопного состава Pb в галенитах свидетельствуют о смешанном происхождении этого компонента в рудах месторождения Радужное. Основным источником Pb являлись палеозойские гранитоиды и метаморфические образования, слагающие в регионе верхнюю кору и в целом характеризующиеся повышенным содержанием этого элемента. Извлечение Pb из палеозойских пород, скорее всего, происходило в связи с воздействием на них гидротермальных растворов в период развития среднеюрского магматизма повышенной щелочности ХВПК. Другим источником рудного Pb, имевшим второстепенное значение, являлись собственно гидротермальные растворы, продуцированные магматизмом ХВПК, о чем свидетельствует близость изотопного состава этого элемента в трахитах–риолитах и образце галенита из сульфидной минерализации, наложенной непосредственно на вулканические породы.

Геохимические данные согласуются с результатами изотопных исследований: из таблицы видно, что из всех возможных геохимических резервуаров – потенциальных источников рудного Pb, присутствующих на месторождении Радужное, повышенными концентрациями этого элемента (по сравнению с кларковыми значениями) характеризуются только палеозойские гранитно-метаморфические образования и некоторые кислые разности пород ХВПК.

Результаты полученных химических анализов (методом ICP) показывают, что для магматических пород ХВПК (как кислых, так и основных разностей) характерны повышенные содержания Ag и Au (Ag в основных породах 0.3–1.3 г/т, в кислых – 0.6–3.6 г/т; Au 0.1–1.0 г/т), на порядки превышающие соответствующие кларковые значения (Ag – 0.1 и 0.05 г/т, Au – 0.004 и 0.004 г/т; Соловов и др., 1990).

Отмеченные закономерности могут являться важным свидетельством в пользу рудоносной роли магматических расплавов ХВПК – как основных источников Au и Ag на месторождении. Роль среднеюрских черных сланцев как еще одного источника Au и Ag остается спорной, поскольку, по результатам изучения этих пород, присутствующих на территории рудного поля, содержания этих элемента в них очень низкие, а для золота – даже ниже предела обнаружения метода ICP-MS. Однако вопрос роли черных

сланцев в образовании месторождения несомненно требует дальнейшего исследования.

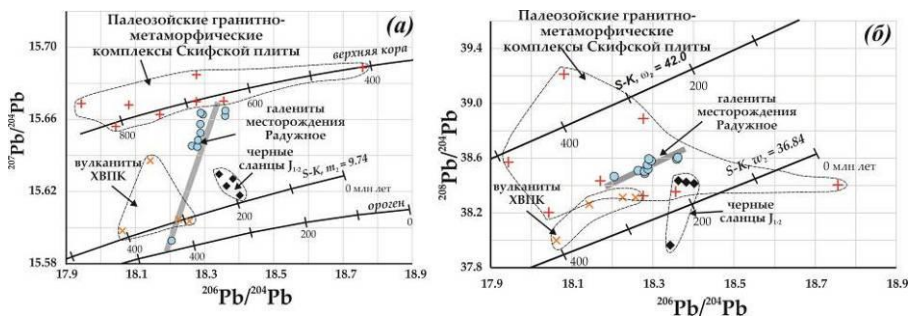


Рис. 9. Rb-изотопные диаграммы для Gn из сульфидной минерализации месторождения Радужное, а также палеозойских магматических и метаморфических образований (Лебедев и др., 2010, 2018), юрских изверженных пород ХВПК и черных сланцев. Изотопный состав Pb в породах скорректирован на предполагаемый возраст месторождения 167 млн лет.

Таблица 3. Содержания основных рудных элементов в геохимических резервуарах района месторождения Радужное и кларки для пород соответствующего состава (согласно Соловов и др., 1990).

Геохимический резервуар	Au, ppm	Ag, ppm	Pb, ppm	Zn, ppm	Cu, ppm
ХВПК (J₂), риолиты	0.4–1.7	0.3–8.9	1–60	17–93	2–22
<i>Кларк</i>	<i>0.004</i>	<i>0.05</i>	<i>20</i>	<i>60</i>	<i>20</i>
ХВПК (J₂), трахиты	0.3–0.5	1.4–3.5	2–8	18–117	5–30
<i>Кларк</i>	<i>0.003</i>	<i>0.1</i>	<i>10</i>	<i>72</i>	<i>55</i>
ХВПК (J₂), основные породы	0.1	0.4–1.3	3–10	68–82	33–75
<i>Кларк</i>	<i>0.004</i>	<i>0.1</i>	<i>8</i>	<i>110</i>	<i>100</i>
Черные сланцы (J₂)	<0.001	0.01–0.03	17–25	125–157	29–35
<i>Кларк</i>	<i>0.001</i>	<i>0.1</i>	<i>20</i>	<i>90</i>	<i>60</i>
Граниты PZ	<0.001	0.01–0.03	8– 46	20– 90	2–11
<i>Кларк</i>	<i>0.004</i>	<i>0.05</i>	<i>20</i>	<i>60</i>	<i>20</i>
Метаморфические сланцы и гнейсы PZ	<0.001	0.06	11–55	40– 170	11– 81
<i>Кларк</i>	<i>0.004</i>	<i>0.05</i>	<i>20</i>	<i>100</i>	<i>43</i>

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, значительно превышающие кларки для пород соответствующего состава.

Наиболее вероятным потенциальным источником Cu в сульфидной минерализации месторождения Радужное, аналогично ситуации с Pb, могли являться палеозойские образования, в первую очередь – кристаллические сланцы. Для Zn таким источником, скорее всего, являлись юрские черные

сланцы (в которых концентрации этого элемента заметно превышают кларки), но нельзя также исключать и участие других геохимических резервуаров – палеозойского верхнекорового и юрского, магматогенного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные автором комплексные работы по изучению месторождения Радужное позволили выявить ряд новых минералов в рудах месторождения, установить формы нахождения золота (самородное низкопробное Hg-содержащее золото) и серебра (акантит и Ag-содержащие блеклые руды), обосновать связь процессов рудогенеза с бимодальным континентальным постколлизийным магматизмом, определить тип месторождения и источники рудного вещества.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. *Кайгородова Е.Н., Петров В.А.* Мышьяковые и полиметаллические рудопоявления между речья рек Чегем – Черек Балкарский (Кабардино-Балкарская Республика) // Разведка и охрана недр. № 2. 2016. С. 3–8.
2. *Кайгородова Е.Н., Петров В.А.* Золоторудное месторождение Радужное (Кабардино-Балкарская Республика) // Разведка и охрана недр. № 8. 2018. С. 3–8.
3. *Кайгородова Е.Н., Лебедев В.А., Чернышев И.В., Якушев А.И.* Проявления неоген-четвертичного магматизма в Восточной Балкарии (Северный Кавказ, Россия): изотопно-геохронологические данные // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 36–44.
4. *Кайгородова Е.Н., Набелкин О.А., Карташов П.М., Лебедев В.А.* Редкоземельная и ниобиевая минерализация в трахитах и риолитах хуламского вулcano-плутонического комплекса, Северный Кавказ // Минералогия. 2021. Т. 7. № 4. С. 33–47.
5. *Кайгородова Е.Н., Лебедев В.А.* Возраст, петролого-геохимические характеристики и происхождение магматических пород среднеюрского хуламского вулcano-плутонического комплекса (Северный Кавказ) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 2. С. 1–28.
6. *Кайгородова Е.Н., Чугаев А.В., Лебедев В.А., Садасюк А.С., Гареев Б.И., Баталин Г.А.* Au-сульфидное месторождение Радужное (Северный Кавказ): геологическое строение, минералогические особенности и источники вещества // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 63. № 4. В печати.

Материалы конференций:

1. *Kaigorodova E., Petrov V.* Raduzhnoe – epithermal volcanic-associated breccia-hosted Au-Ag deposit (low-sulfidation type) // 4th Int. Stud. Geol. Conf. 2013. Brno. Czech Republic. P. 65.
2. *Kaigorodova E.* Raduzhnoe – epithermal breccia-hosted deposit (Northern Caucasus, Russia) // Goldschmidt. Conference Abstracts. 2013. P. 1419.
3. *Кайгородова Е.Н.* Элементы-примеси и состав галенита и сфалерита Au-Ag рудопоявления Радужное (Сев. Кавказ) // IV научная молодежная школа «Новое в познании процессов рудообразования». Москва. ИГЕМ РАН. 2014. С. 134–136.
4. *Кайгородова Е.Н.* Структурно-петрофизический и линеаментный анализ

- условий локализации Au-рудной минерализации рудопроявления Радужное, КБР // XV международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". 2014. С. 99–102.
5. Kaigorodova E.N. Anhydrite and gypsum on gold-sulphide deposit Raduzhnoe (Northern Caucasus) // Moscow International School of Earth Sciences 2016. М., GEOКНИ RAS. 2016. P. 70–71.
6. Kaigorodova E.N. Regularities in the distribution of gold-sulphide mineralization of the Raduzhnoe deposit (Northern Caucasus) // 8th International Siberian early career geoscientist conference. Материалы конференции. Новосибирск. 2016. С. 207–209.
7. Кайгородова Е.Н. Линеаментный анализ территории рудопроявления Радужное // VI научная молодежная школа «Новое в познании процессов рудообразования». ИГЕМ РАН. 2016. С. 137–138.
8. Kaigorodova E.N. Rare-earth and rare-metal mineralization in trachytes of the Khulam complex (Kabardino-Balkaria Republic, Russia) // Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits. XXXIV International Conference. Miass. 2017. P. 87–89.
9. Кайгородова Е.Н. Гидротермальный ангидрит и гипс золоторудного проявления Радужное (Северный Кавказ): индикаторы рудного процесса // «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты». Москва. ИГЕМ РАН. 2017. С. 271–274.
10. Кайгородова Е.Н. Редкоземельная и редкометалльная минерализация в трахитах хуламского комплекса (Кабардино-Балкария, Россия) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. VII. Ч. 1. 2017. С. 436–440.
11. Кайгородова Е. Н., Карташов П. М., Петров В. А. Минералы надгруппы алунита из зоны окисления золото-сульфидного месторождения Радужное (Кабардино-Балкария) // Металлогения древних и современных океанов. Вулканизм и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН. 2018. С. 179–182.
12. Кайгородова Е.Н. Рудно-генетическая модель и условия образования месторождения Радужное (КБР, Россия) // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. IX Международная научно-практическая конференция. М.: ЦНИГРИ. 2019. С. 102–103.
13. Кайгородова Е.Н. Хуламский вулcano-плутонический комплекс (средняя юра, Северный Кавказ): возраст и условия образования // V Всероссийская конференция с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». Владивосток. 2021. С. 103–106.
14. Кайгородова Е.Н., Чугаев А.В. Источники вещества золото-сульфидного месторождения Радужное (КБР) по изотопно-геохимическим данным // V Всероссийская конференция с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». Владивосток. 2021. С. 158–160.
15. Кайгородова Е.Н., Лебедев В.А. Мезозойские магматические комплексы северного склона Большого Кавказа // «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» Эссентуки–Грозный. 2021. С. 69–73.