

УДК 553.3.071

Au-СУЛЬФИДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ РАДУЖНОЕ (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ): ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА

© 2022 г. **Е. Н. Кайгородова^а*, А. В. Чугаев^а, В. А. Лебедев^а,
А. С. Садасюк^а, Б. И. Гареев^б, Г. А. Баталин^б**

^а*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия*

^б*Казанский Федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 4/5, Казань, 420008 Россия*

**e-mail: katmsu@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 11.02.2022 г.

Au-сульфидное месторождение Радужное (запасы 4,89 т Au при среднем содержании 2,9 г/т), относящееся к промежуточно-сульфидизированному (intermediate sulfidation) эпitherмальному типу, расположено на Северном Кавказе в центральной части Безенгийского рудного района (Хуламо-Безенгийское ущелье, Кабардино-Балкарская Республика), в пределах которого широко проявлен среднеюрский бимодальный умеренно-щелочной магматизм хуламского вулcano-плутонического комплекса. Золоторудная минерализация приурочена, главным образом, к флюидно-эксплозивным брекчиям, локализованным в юрских терригенных толщах, а также субвулканических телах хуламского комплекса. В настоящей статье рассмотрены результаты комплексных петролого-минералогических и изотопно-геохимических исследований золоторудной минерализации месторождения Радужное, а также вмещающих ее пород. Показано, что руды на месторождении представлены полиметаллической, Au-сульфидной и Au–Ag-малосульфидной ассоциациями. Последние две имеют промышленное значение. Самородное золото в рудах низкопробное (419–670‰), ассоциирует с сульфидами. Основными минералами серебра на месторождении являются акантит (для Au–Ag-малосульфидной ассоциации) и Ag-содержащие тетраэдрит-(Zn) и теннантит-(Fe,Zn) для Au-сульфидной ассоциации. Сопоставление Pb-изотопных данных для руд и различных по происхождению пород района месторождения свидетельствует о том, что главным источником рудного свинца являлись палеозойские гранитоиды, представляющие в пределах региона “верхнекоровый резервуар”. Второстепенным по своему значению источником Pb были остаточные, кислые по составу магмы хуламского комплекса. Они же, согласно геохимическим данным, стали основным источником Ag и Au в рудах месторождения Радужное. Низкие концентрации Cu и Zn в кислых магматических породах свидетельствуют о том, что магматизм хуламского комплекса, скорее всего, не являлся основным источником халькофильных элементов в рудах месторождения Радужное. Предположительно, они были заимствованы из вмещающих оруденение терригенных юрских толщ и метаморфических пород и гранитоидов палеозойского фундамента.

Ключевые слова: Северный Кавказ, золото, месторождение Радужное, сульфидная минерализация, хуламский комплекс, юрский вулканизм

DOI: 10.31857/S0016777022040037

ВВЕДЕНИЕ

До последнего времени на территории Северного Кавказа фактически не было известно крупных золоторудных месторождений, хотя как попутный компонент Au часто присутствует в комплексных полиметаллических (Джимидонское, Садонское, Какадур-Ханикомское), колчеданных (Урупское, Худесское, Первомайское, Быковское) и молибден-вольфрамовых (Тырныаузское) месторождениях и рудопроявлениях (ГИС-атлас, 2020). В 2021

году на баланс поставлено крупное месторождение им. Б.К. Михайлова (бывшее Гитче-Тырныаузское), перспективным также является Куруш-Мазинское рудное поле в Дагестане. Объект исследования данной работы – это мелкое по запасам, но уникальное для Большого Кавказа по происхождению и своему типу месторождение Радужное, расположенное в горной части Кабардино-Балкарской Республики. Оно было открыто в 1974 году (Стативкин и др., 1976ф¹), и по резуль-

татам выполненных в 2008–2014 гг. геологоразведочных работ, для него были утверждены запасы золота 4.89 т (C_1 , при среднем содержании Au = 2.9 г/т) и серебра 96.4 т (C_1 , при среднем содержании Ag = 58.99 г/т). Месторождение до сих пор остается малоизученным, и в научной литературе отсутствует его детальное геологическое, минералогическое и геохимическое описание. Кроме того, дискуссионным оставался вопрос об источниках минералообразующих компонентов руд. Хотя большинство исследователей предполагало прямую генетическую связь рудной минерализации с юрским бимодальным вулканизмом хуламского комплекса (Лезин и др., 1976ф; Калинин и др., 1979ф; Коптюх и др., 1985ф и др.), эти представления основывались исключительно на пространственной связи рудных тел с гипабиссальными интрузиями риолитов. При этом для месторождения нет каких-либо опубликованных изотопно-геохимических данных, которые позволили бы дать корректную оценку роли магматических расплавов как источника рудного вещества.

В настоящей статье представлены результаты минералогического, геохимического и Рb-изотопного изучения золоторудной минерализации месторождения Радужное, а также магматических и осадочных пород, распространенных на его территории. Основой этих исследований стала коллекция образцов руд и пород, отобранная Е.Н. Кайгородовой в ходе полевых работ в период 2011–2020 гг. По результатам проведенных исследований были определены минеральный состав различных рудных ассоциаций на месторождении и петролого-геохимические характеристики пород рудоносного хуламского комплекса, установлено происхождение рудного Рb, высказаны предположения об источниках других рудных компонентов (Au, Ag, Cu, Zn).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изученная коллекция включала образцы, характеризующие как золоторудную минерализацию месторождения Радужное, так и основные типы магматических и осадочных пород, распространенных в районе месторождения. Рудная минерализация была охарактеризована 14 образцами, отобранными на различных участках месторождения (зоны Первая, Орлиная, Лагерная и Кишлык-су) как в коренных обнажениях, так и из керн скважин. Отбор проб вмещающих палеозойских гранитов, юрских осадочных образований и магматических пород хуламского комплекса производился на самом месторождении Радужное, а

также в пределах других участков Безенгийского рудного района (11 образцов). Подробная характеристика изученных образцов приведена в табл. 1.

Методы изучения химического состава пород и минералов

Данные о химическом составе пород (породообразующие оксиды) получены рентгено-флуоресцентным методом в ЦКП “ИГЕМ-аналитика” с использованием спектрометра Axios mAX (PANalytical) (аналитик – А.И. Якушев). Содержания редкоземельных и рассеянных элементов в породах определены масс-спектрометрическим методом с ионизацией вещества в индуктивно-связанной плазме (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Thermo XII – Series (ЦКП “ИГЕМ-аналитика”, аналитик – Я.В. Бычкова).

Химический состав сульфидов и самородного золота был изучен на микрозонде JEOL JXA-8200 (EPMA) с пятью волновыми дисперсионными спектрометрами (ЦКП “ИГЕМ-Аналитика”, аналитик – Е.В. Ковальчук) при следующих условиях: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток в образце – 20 нА, экспозиция 10–20 с. Аналитическими линиями служили: $K\alpha$ -линия (Cu, Co, Ni, Mn, Fe, S, Zn), $L\alpha$ -линия (As, Sb, Cd, Mo, Au, Ag, Te, Se, In), $M\alpha$ -линия (Pb, Bi, Hg). В качестве стандартов применялись чистые элементы, минералы и соединения известного состава. Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF с использованием программы фирмы JEOL. Пределы обнаружения 0.01–0.05 мас. %.

Химический состав жильных минералов, минералов зоны окисления и других сопровождающих минералов анализировался с использованием энергодисперсионного микроанализа на приборе СЭМ JSM-5610LV (JEOL) с ЭДС INCA (Oxford Instruments Analytical) с программным обеспечением INCA Energy 450 (ИГЕМ РАН, аналитики – А.В. Мохов и П.М. Карташов). Ускоряющее напряжение – 25 кэВ, время измерения – 100 с, время обработки рентгеновского сигнала – 6 с. Внутренние стандарты – минералы и соединения с известным составом. Коррекция учета матрицы проводилась по процедуре XPP, учитывающей достоинства методов ZAF и Phi-Rho-Z. Предел обнаружения: ~0.п мас. % для легких химических элементов, и 0.0п мас. % – для тяжелых.

Метод изотопного анализа Рb

Изотопный состав Рb анализировался в микропробах галенита массой 0.007–0.01 г. Химическая подготовка заключалась в растворении зерен в капле концентрированной азотной кислоты. Полученный препарат в дальнейшем использовался для приготовления рабочего раствора (3%

¹ Здесь и далее буквой “ф” помечены фондовые материалы и производственные отчеты. Список фондовой литературы прилагается.

Таблица 1. Характеристика изученных образцов Безенгийского рудного района

Образец	Место отбора (система координат WGS84)	Характеристика
3001/2	Скв. 3001 (инт. 69.0 м). Первая рудная зона (43°14'19.8" N 43°18'13.4" E)	Флюидно-эксплозивная брекчия аргиллитов с карбонат-баритовым цементом (золото-серебряная малосульфидная ассоциация)
3001/4	Скв. 3001 (инт. 83–84 м). Первая рудная зона (43°14'19.8" N 43°18'13.4" E)	Сплошная сульфидная руда с карбонатным прожилком (золото-сульфидная ассоциация)
3001/5	Скв. 3001 (инт. 84–87 м). Первая рудная зона (43°14'19.8" N 43°18'13.4" E)	Алевролит с сульфидными гнездами (пирит, халькопирит) (золото-сульфидная ассоциация)
3001/7	Скв. 3001 (и нт. 93–99 м). Первая рудная зона (43°14'19.8" N 43°18'13.4" E)	Флюидно-эксплозивная брекчия аргиллитов с кварц-карбонатным цементом и сульфидами (золото-сульфидная ассоциация)
3001/12	Скв. 3001 (инт. 126 –132 м). Первая рудная зона (43°14'19.8" N 43°18'13.4" E)	Кварц-сульфидная жила в гранитах белореченского комплекса (полиметаллическая ассоциация)
РЦ-7	Участок Кишлык-су (43°13'44.9" N 43°16'10.3" E)	Песчаники джигиатской свиты с интенсивной карбонатно-сульфидной минерализацией (золото-сульфидная ассоциация)
Р-12	Канавка 407. Участок Кишлык-су (43°13'46.1" N 43°16'12.6" E)	Окварцованные алевролиты с барит-сульфидными прожилками (золото-сульфидная ассоциация)
Р-17	Скв. 3008. Первая рудная зона (43°14'21.9" N 43°18'18.9" E)	Флюидно-эксплозивная брекчия по окварцованным аргиллитам с кварц-сульфидным цементом (золото-сульфидная ассоциация)
Р-18	Скв. 3010. Первая рудная зона (43°14'20.0" N 43°18'16.3" E)	Флюидно-эксплозивная брекчия по окварцованным аргиллитам с кварц-сульфидным цементом (золото-сульфидная ассоциация)
Р-23	Скв. 3061, р. Кушхуле-су, зона Лагерная (43°14'13.0" N 43°17'52.8" E)	Кварц-сфалерит-галенитовый прожилок в окварцованных песчаниках (полиметаллическая ассоциация)
3/2-210	Зона Орлиная (43°14'25.8" N 43°16'29.3" E)	Песчаник (плинсбахский ярус, безенгийская свита) окварцованный с наложенной сульфидной минерализацией (полиметаллическая ассоциация)
3/2-181	Зона Орлиная (43°14'25.8" N 43°16'29.3" E)	Риолит аргиллизированный (хуламский комплекс) с наложенной доломит-кварц-сульфидной минерализацией (золото-сульфидная ассоциация)
2/3-187	Зона Орлиная (43°14'00.4" N 43°16'12.6" E)	Риолит аргиллизированный (хуламский комплекс) с сульфидными прожилками (золото-сульфидная ассоциация)
Х-2	Хуламский силл (43°14'24.7" N 43°18'31.9" E)	Риолит флюидальный аргиллизированный, хуламский комплекс с сульфидной минерализацией (галенит)
РЦ-3	Первая рудная зона (43°13'58.4" N 43°18'21.4" E)	Гранит (белореченский комплекс) серицитизированный зеленовато-белый с сульфидной минерализацией
3001/6	Скв. 3001 (инт. 87–88 м). Первая рудная зона (43°14'19.8" N 43°18'13.4" E)	Аргиллит (ааленский ярус, джигиатская свита) с сетью прожилков гипса
210-1/13	Участок Кардан (43°14'49.0" N 43°12'27.8" E)	Риолит аргиллизированный, хуламский комплекс
210-2/13	Участок Кардан (43°14'46.9" N 43°12'34.5" E)	Риолит, хуламский комплекс
Р-6	Первая рудная зона (43°14'21.8" N 43°17'54.7" E)	Эруптивная брекчия риолитов на риолитовом цементе
Р-10	Первая рудная зона (43°14'22.6" N 43°18'26.3" E)	Эруптивная брекчия аргиллизированных риолитов
210-5/13	Участок Кардан (43°15'02.3" N 43°12'29.7" E)	Трахиандезибаазальт (муджиерит), хуламский комплекс
Р-19	Гора Мукол-кая, нижний силл (43°12'33.2" N 43°16'02.0" E)	Габбро, хуламский комплекс

Таблица 1. Окончание

Образец	Место отбора (система координат WGS84)	Характеристика
Б-3	Штулу-Харесская депрессия, Хуламо-Безенгийское ущелье (43°04'26.0" N 43°04'49.2" E)	Черный сланец, плинсбахский–тоарский ярусы (галиатская свита)
КС-А	Северная Юрская депрессия, Хуламо-Безенгийское ущелье. Месторождение Радужное, участок Кишлык-су (43°14'00.4" N 43°16'12.6" E)	Черный сланец, ааленский ярус (джигиатская свита)
Д-1	Думалинская депрессия, Хуламо-Безенгийское ущелье. Долина р. Думала (43°08'26.9" N 43°16'32.2" E)	Черный сланец, плинсбахский–тоарский ярусы (безенгийская свита)

HNO_3) с концентрацией свинца 200–400 нг/мл. Валовые пробы магматических и метаморфических пород, навеска которых составляла 30–60 мг, разлагались в смеси концентрированных кислот $\text{HF} + \text{HNO}_3$ (3 : 1) при атмосферном давлении и температуре около 130°C в течение 24 часов. Хроматографическое выделение Рb проводилось по одностадийной методике (Чугаев и др., 2013а) и выполнялось в тefлоновых микроколонках, заполненных 0.1 мл анионита BioRadAG-1×8 (200–400 меш). Величина холостого опыта в полной химической процедуре выделения Рb не превышала 0.1 нг.

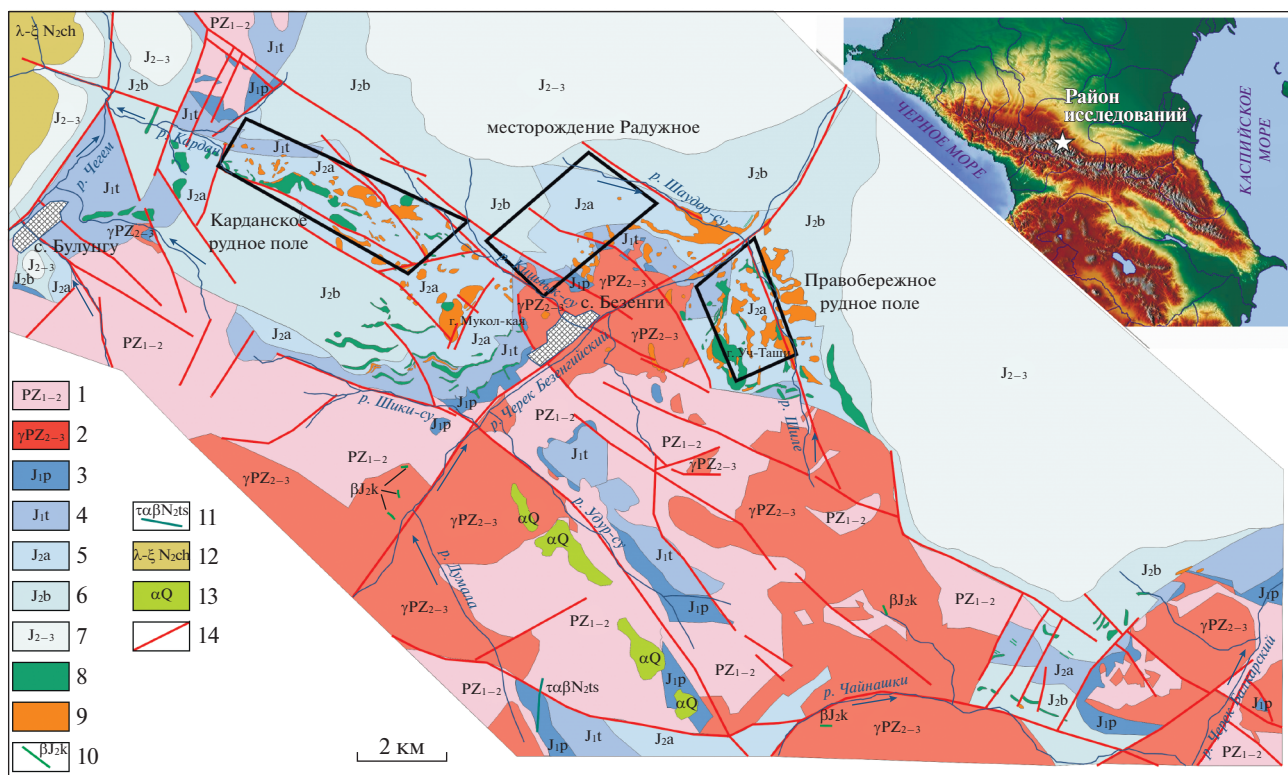
Измерения изотопного состава Рb проводились на 9-коллекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой NEPTUNE согласно методике (Чернышев и др., 2007), предполагающей коррекцию эффекта приборной масс-дискриминации изотопов свинца по опорному изотопному отношению $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl} = 2.3889 \pm 1$. Правильность получаемых данных контролировалась по результатам параллельных анализов стандарта изотопного состава Рb SRM-981 и стандартных образцов горных пород AGV-2 и BCR-1 Геологической службы США. Итоговая погрешность ($\pm 2\text{SD}$) измерения отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ при анализе галенита не превышала $\pm 0.02\%$, а для горных пород $\pm 0.03\%$.

Для коррекции измеренных отношений Рb в породах на возраст рудной минерализации были получены данные о концентрациях Рb, Th и U в тех же навесках, в которых анализировался изотопный состав Рb. Измерения содержаний этих элементов проведены методом ICP-MS из растворов на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc ICP-MS (Thermo Scientific) в лаборатории изотопного и элементного анализа ИГиНТ КФУ. Погрешность определения содержания Рb, Th и U в пробах, оцененная по результатам систематических анализов стандартных образцов горных пород BHVO-2 и AGV-2 Геологической службы США, не превышала $\pm 3\%$ ($\pm 2\text{SD}$).

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ГЕОЛОГИИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождение Радужное расположено в центральной части Безенгийского рудного района (фиг. 1). Палеозойский фундамент региона относится к тектонической зоне Главного Кавказского хребта (Балкаро-Дигорский блок) и сложен кристаллическими сланцами, гнейсами, гранито-гнейсами и амфиболитами, прорванными гранитоидами девон-каменноугольного возраста (Somín, 2011), а в южной части района также дайками диабазов среднеюрского казбекского комплекса (Курбанов и др., 2004ф). Фундамент имеет блоковое строение; горстовые поднятия разделены здесь продольными тектоническими депрессиями общекавказского простираения (Думалинская, Северная Юрская). Последние выполнены ранне-среднеюрскими осадочными отложениями (песчаники, аргиллиты, алевролиты, глинистые сланцы). Наиболее крупными тектоническими нарушениями являются Саугамская и Саурданская СЗ–ЮВ системы разломов; последняя контролирует проявление мезозойского умеренно-щелочного магматизма, преимущественно локализованного в осадочном чехле Северной Юрской депрессии. По результатам многолетних геологических исследований, проводившихся в течение всего XX столетия (Лебедев, 1950; Горохов и др., 1968ф. и др.), умеренно-щелочные предположительно среднеюрские магматические образования, распространенные в этом районе, были выделены в качестве отдельного хуламского вулканоплутонического комплекса (Долгих, 1978). Ареал максимального распространения магматических образований этого комплекса находится в горной части Балкарии между водоразделами рек Чегем–Черек Безенгийский и Черек Безенгийский–Черек Балкарский; далее к юго-востоку и северо-западу количество вскрытых эрозией гипабиссальных интрузий постепенно уменьшается (фиг. 1).

Недавно полученные нами для цирконов из риолитов и трахитов U–Рb датировки (167 ± 4 млн лет и 167 ± 3 млн лет соответственно) свидетельствуют о близком времени формирования кислых и уме-



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Безенгийского рудного района с вынесенными контурами месторождения Радужное и потенциальных рудных полей (Карданское и Правобережное). Составлена по материалам Качурин и др., 1991ф; Письменный и др., 2002ф; Кайгородова и др., 2021. 1 – палеозойские метаморфические комплексы (гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты), 2 – средне-позднепалеозойские гранитоиды, 3–6 – осадочные отложения Северной Юрской депрессии (3 – плинсбахского яруса, 4 – тоарского яруса, 5 – ааленского яруса, 6 – байосского яруса), 7 – средне-позднеюрские отложения зоны Скалистого хребта нерасчлененные, 8–9 – магматические образования среднеюрского хуламского комплекса (8 – основного состава, 9 – кислого и умеренно-кислого состава), 10 – дайки среднеюрского казбекского комплекса (диабазы, габброиды), 11 – магматические образования плиоценового цанского комплекса (трахиандезитобазальты), 12 – плиоценовые риолитовые игнимбриты чегемского комплекса, 13 – плейстоценовые андезиты эльбурсского комплекса, 14 – главные разломы.

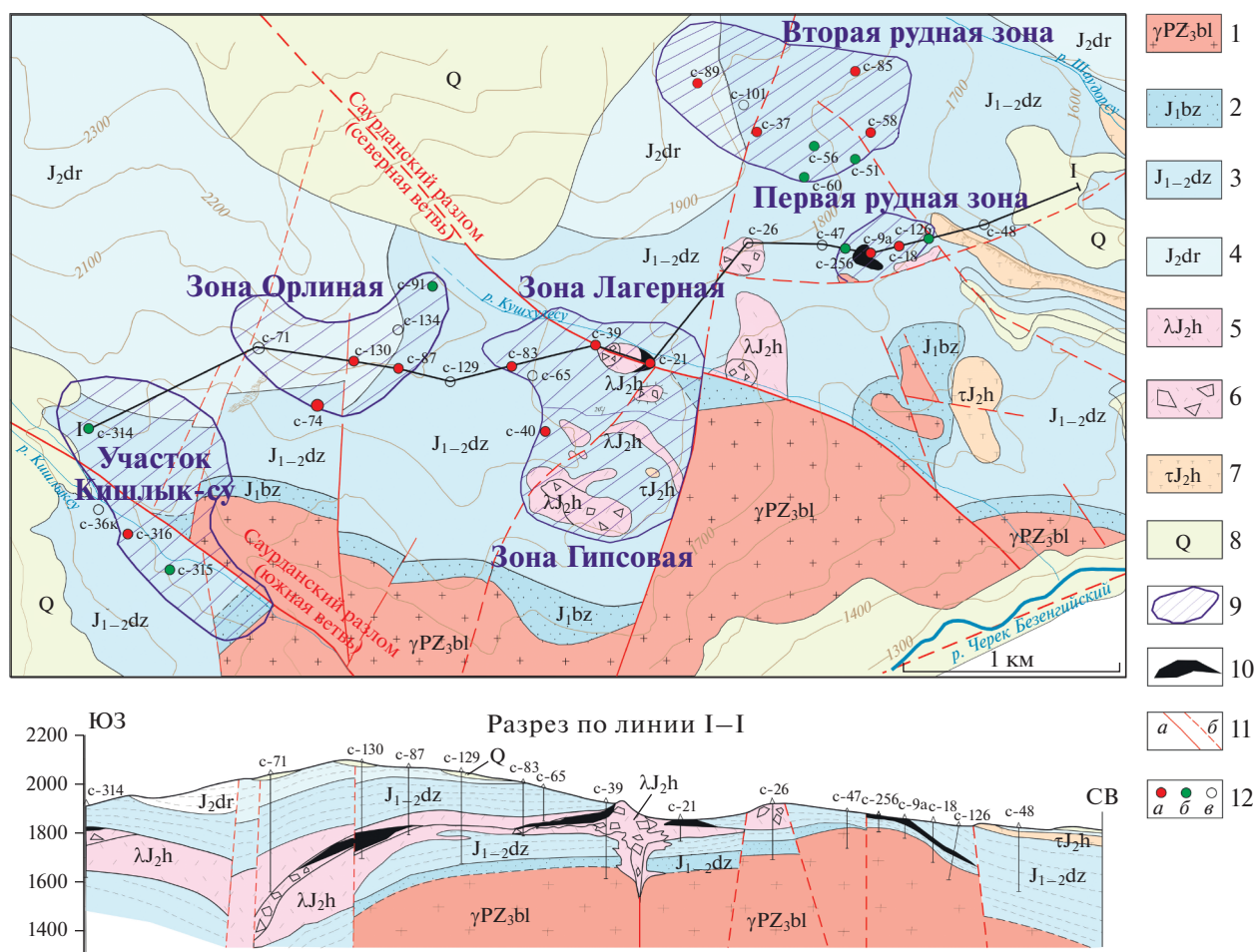
ренно-кислых магматических образований хуламского комплекса (Кайгородова, Лебедев, 2022), определяя вероятный диапазон их образования как байос–келловей (Cohen et al., 2020). К–Аг датирование мономинеральной фракции флогопита из габброидов долины р. Кардан подтвердило среднеюрский возраст и для основных пород хуламского комплекса (Кайгородова, Лебедев, 2022).

К югу и западу от Безенгийского рудного района распространены неоген-четвертичные изверженные породы различного состава, принадлежащие к трем различным комплексам (Кайгородова и др., 2021). К плиоценовому (4.7 млн лет) цанскому комплексу относятся дайки трахиандезитобазальтов в долине р. Думала. Пирокластические отложения (игнимбриты и туфы) позднелиоценового чегемского комплекса (около 3 млн лет) известны на крайней западной периферии района. На водоразделе рек Черек Безенгийский и Черек Балкарский в районе горы Чегет-Джора имеются останцы плейстоценового (около 700 тыс лет) по-

тока андезитов Удурсу, условно отнесенного к эльбурсскому комплексу.

Тектоника

Основными тектоническими структурами района являются разломы СЗ–ЮВ простирания (южная и северная ветвь Саурданской системы, фиг. 2), которые рассматриваются в качестве главных рудоуправляющих структур Безенгийского рудного района и магмоподводящих для вулканических пород хуламского комплекса. В районе месторождения Радужное присутствуют также разломы субмеридионального простирания (Бодулинский и Гипсовый), которые, по-видимому, являлись локальными магмоподводящими структурами, т.к. к ним приурочены корневые зоны двух крупных лакколитообразных построек хуламского комплекса (участки “зона Орлиная” и “Вторая рудная зона”), подсеченных разведочными скважинами.



Фиг. 2. Схематическая геологическая карта с вынесенными контурами рудных участков и разрезом месторождения Радужное. Карта составлена по материалам Качурин и др., 1991ф; Платков и др., 1991ф. 1 – гранитоиды белореченского комплекса (ранний–средний карбон); 2–4 – юрский осадочный чехол (2 – безенгийская свита, 3 – джигиатская свита, 4 – джорская свита); 5 – риолиты хуламского комплекса; 6 – жерловые фации риолитов; 7 – трахиты хуламского комплекса; 8 – четвертичные отложения; 9 – контуры рудных тел, не выходящих на поверхность; 10 – рудные тела на разрезе и на дневной поверхности; 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).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РАДУЖНОЕ

Вмещающие породы

Месторождение Радужное расположено на левом борту Хуламо-Безенгийского ущелья на высоте 1900–2300 м в районе, где образования палеозойского фундамента (гранитоиды белореченского комплекса γPZ_3bl) погружаются под чехол из ранне-среднеюрских терригенных образований (фиг. 2). Гранитоиды в основном представлены крупно- и среднезернистыми двуслюдяными и биотитовыми разностями.

Юрские осадочные отложения в районе месторождения Радужного – это песчаники, аргиллиты и алевролиты плинсбахского, тоарского, ааленского и байосского ярусов. Согласно принятой региональной стратиграфической схеме района

(Безносков и др., 1973), они подразделены на три свиты (снизу вверх): безенгийскую, джигиатскую и джорскую.

Прорывающие ниже-среднеюрские осадочные толщи вулканические породы хуламского комплекса относятся к габбро-трахиандезитобазальт – трахит-риолитовой контрастно-дифференцированной бимодальной ассоциации (Кайгородова, Лебедев, 2022). В районе месторождения наиболее широко распространены риолиты и трахиты, которые, главным образом, слагают субвулканические тела силло- и лакколитоподобной формы (наблюдаются на участках Орлиная, Кишлык-су и Вторая рудная зона), неки (в зоне Саурданского разлома, фиг. 3в), а также сложные постройки многоактного внедрения. Наиболее крупным среди них является так называемый “Хуламский силл” (фиг. 3б). Его мощность до-

стигает 200 м, а протяженность — 4.5 км. Менее распространены породы основного состава (базальтоиды), слагающие небольшие субвулканические тела (фиг. 3а).

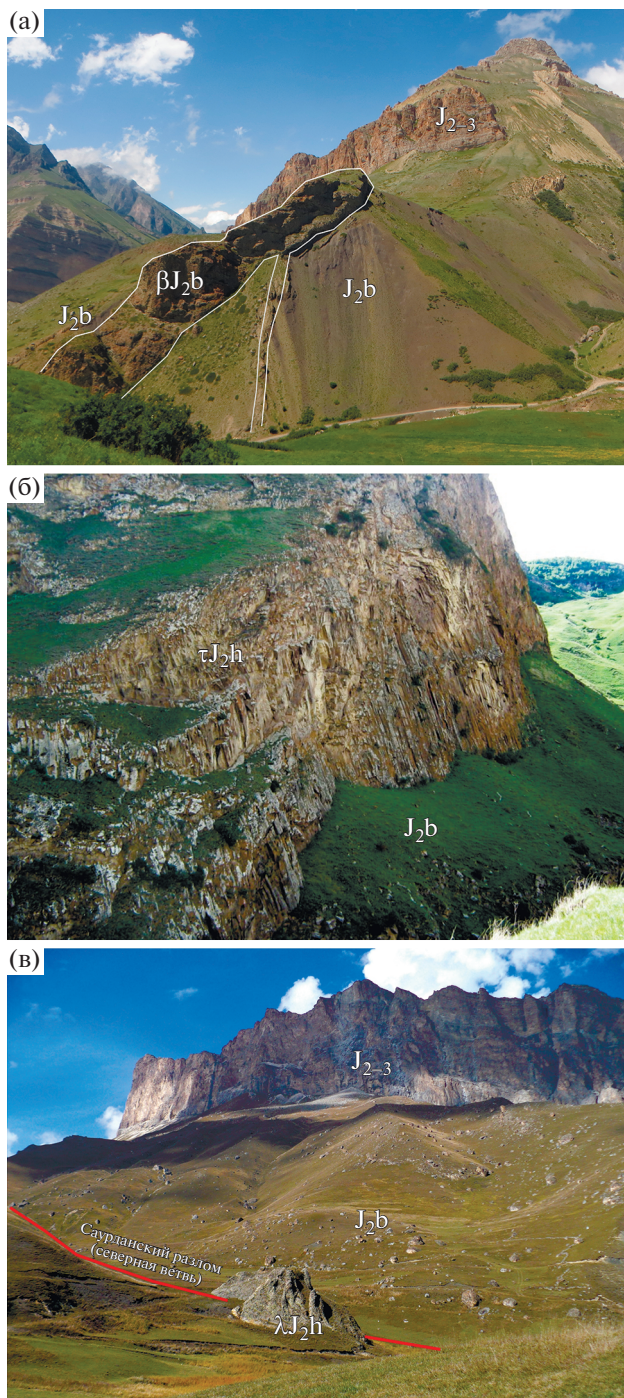
Петрографическая характеристика пород хуламского вулcano-плутонического комплекса

Риолиты представлены двумя разновидностями — афировыми (белые и беловато-серые) и порфировыми (светло-серые до серых). В порфировых породах количество вкрапленников составляет 3–10%; среди них преобладает ортоклаз, реже встречается санидин. Текстура риолитов массивная или флюидальная. Фельзитовая основная масса афировых и порфировых риолитов сложена микрокристаллами плагиоклаза (30–35 об. %), калиевого полевого шпата (до 10–15 об. %) и кварца (35–60 об. %). Стекло матрицы полностью замещено минералами группы иллит–смектита и каолинитом. Риолиты хуламского комплекса содержат 68.2–84.6 мас. % SiO_2 , 2.3–12.3 мас. % $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (при 0.3–12.1 мас. % K_2O) и относятся к умеренно-щелочной и известково-щелочной петрохимическим сериям (фиг. 4). Они характеризуются существенными вариациями по соотношению кремнезема и суммы щелочей, а также отношений $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Последний параметр позволяет разделить риолиты на четыре подгруппы: ультракалиевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 40$), высококалиевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ от 15 до 40), калиевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ от 2 до 15) и низкокалиевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 2$) (Кайгородова, Лебедев, 2022).

Трахиты имеют розовато-серую, розовато-зеленую, нередко пятнистую окраску. Они содержат большое количество вкрапленников темно-розового калиевого полевого шпата, который, по данным (Борсук и др., 1977), представлен нерешетчатым микроклином, заместившим первичный ортоклаз. Структура трахитов гломеропорфировая при трахитовой структуре основной массы. Трахиты хуламского комплекса содержат 59.7–65.5 мас. % SiO_2 , 7.7–12.2 мас. % $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (при 2.1–7.2 мас. % K_2O) и относятся к умеренно-щелочной петрохимической серии (фиг. 4). Это высокодифференцированные ($\text{Mg}\#$ от 0.19 до 0.55, $\text{Ni} < 20$ г/т, $\text{Sr} < 25$ г/т и $\text{Co} < 20$ г/т) образования, по соотношению $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ — высококалиевые.

Основные породы хуламского комплекса, широко развитые на флангах месторождения, представлены массивными полнокристаллическими габбро (мелко-, средне- и крупнозернистыми), реже интенсивно измененными базальтоидами.

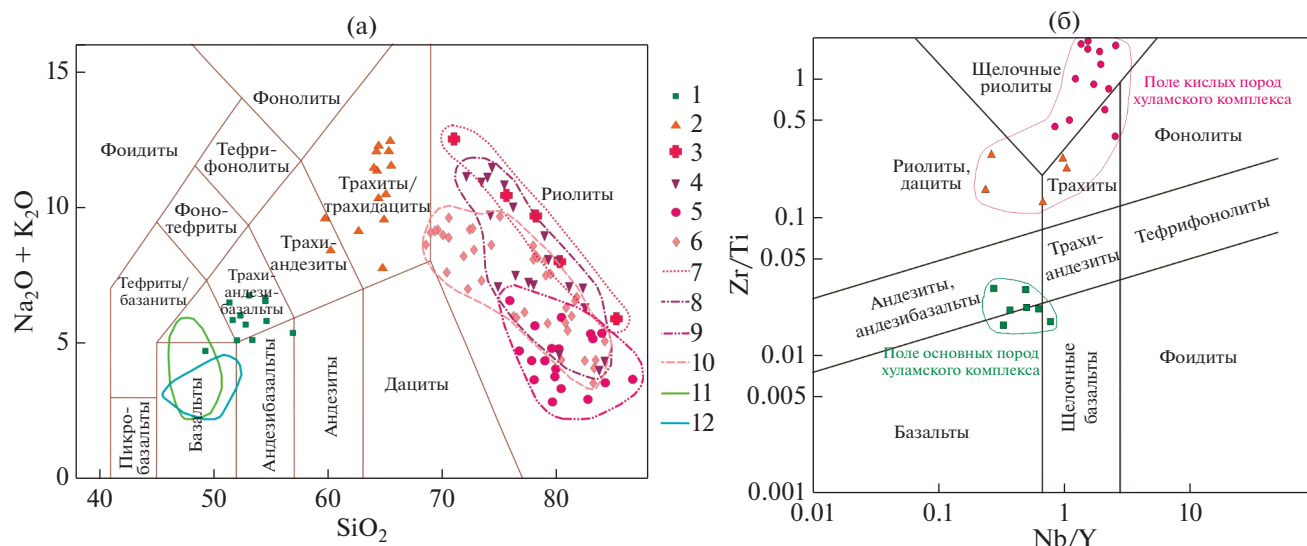
² Содержания порообразующих оксидов нормализованы к 100%.



Фиг. 3. Выходы вулканических тел пород хуламского комплекса в пределах Безенгийского рудного района. а — силл базальтоидов хуламского комплекса с подводящей дайкой, правый берег р. Кардан; б — “Хуламский силл” (трахиты и риолиты); в — неск риолитов в зоне Саурданского разлома, рудная зона Лагерная (а — фото Кайгородовой Е.Н., б, в — фото Давиденко В.П.).

Метасоматические изменения вмещающих пород

На месторождении Радужное на основании проведенных авторами геологических наблюдений, петрографического изучения шлифов и ми-



Фиг. 4. Классификационные петрологические диаграммы для изученных магматических образований хуламского комплекса (по данным автора и из работ Газеев и др., 2019; Горохов и др., 1968ф; Григорчук и др., 1980ф; Давиденко и др., 1993ф; Калинин и др., 1979ф; Коптюх и др., 1985ф; Спасский и др., 1982ф). а – SiO_2 – $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Le Bas et al., 1986), б – Nb/Y – Zr/Ti (Pearce, 1996). 1 – основные магматические породы хуламского комплекса; 2 – трахиты хуламского комплекса; 3–6 – риолиты хуламского комплекса (3 – ультракалиевые, 4 – высококалиевые, 5 – умеренно-калиевые, 6 – низкокалиевые); 7–10 – поля различных типов риолитов хуламского комплекса (7 – ультракалиевые, 8 – высококалиевые, 9 – умеренно-калиевые, 10 – низкокалиевые); 11 – поле магматических пород среднеюрского казбекского комплекса (Газеев и др., 2018); 12 – поле магматических пород раннеюрского фиагдонского комплекса (Гурбанов и др., 2017).

нерального состава смешанно-слоистых фаз методом рентгеновской дифракции из метасоматически измененных пород были выделены дорудная, предрудная и синрудная стадии развития метасоматических формаций. Дорудная стадия характеризуется широким развитием низкотемпературной пропилитизации (безэпидотовые хлоритовые пропилиты) во всей зоне развития вулканитов хуламского комплекса (междуречье рек Чегем и Черек Балкарский), а также площадное окварцевание в зоне развития разломов Саурданской системы.

Предрудная стадия проявлена более локально в центральной части Безенгийского рудного района (месторождение Радужное, Карданское и Правобережное рудные поля) широким развитием аргиллизитов. Исходя из общепринятых представлений (Метасоматизм..., 1998), нами предполагается, что растворы на этой стадии отличались близонейтральным характером, высокой концентрацией кремнезема и содержали повышенные количества калия.

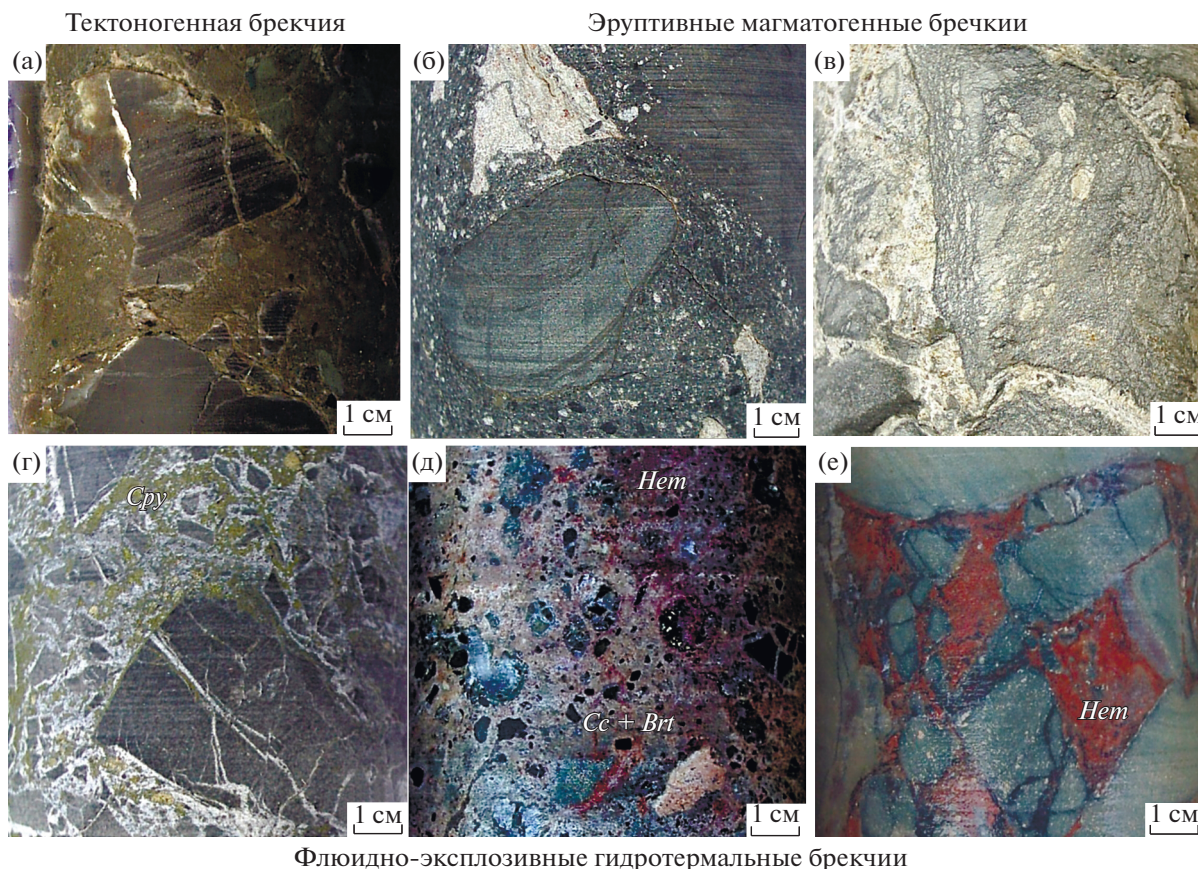
Синрудная стадия проявляется в локальном развитии наложенных процессов окварцевания (кварц, как правило, халцедоновидный) и карбонатизации вмещающих оруденение пород. Метасоматические карбонаты представлены кальцитом, железистым доломитом, доломитом, сидеритом.

Рудные тела

Месторождение Радужное представлено несколькими пространственно сближенными рудными телами, которые выделяются как отдельные участки или рудные зоны месторождения (фиг. 2). Они разнообразны по своей морфологии, однако преимущественно имеют линзовидную в разрезе и изометричную в плане формы.

Размеры рудных тел, оконтуренных по бортовому содержанию золота 0.5 г/т, характеризуются следующими параметрами (по данным Барановский и др., 2014ф): Первая рудная зона – размеры в плане 365×60 м, глубина залегания от 0 до 155 м, средняя мощность 17 м; Гипсовая зона (два рудных тела) – размеры 135×95 м, глубина залегания от 0 до 19.0 м, средняя мощность 4.4 м и 155×65 м, глубина залегания от 3.0 до 25.5 м, средняя мощность 4.7 м; Лагерная зона – размеры 95×35 м, глубина залегания от 0 до 17.0 м, средняя мощность 12.5 м. Размеры рудных тел, залегающих внутри силлов риолитов, достигают 330×240 м при средней мощности 4.3 м и глубине залегания залежи от 204 до 376 м (зона Орлиная).

Рудная минерализация на месторождении Радужное локализуется, как правило, в цементе и обломках флюидно-эксплозивных брекчий, развитых среди вмещающих их юрских терригенных толщ и вулканитов хуламского комплекса. В пре-



Фиг. 5. Различные генетические типы брекчий, развитых в пределах Безенгийского рудного района и месторождения Радужное. а – тектоногенная брекчия; б, в – эруптивные магматогенные брекchieи; г, д, е – флюидно-эксплозивные гидротермальные брекchieи: г – брекчия по окварцованным аргиллитам на кварц-барит (*Brt*)-сульфидном (*Csp+Py*) цементе; д – брекчия по аргиллитам на карбонат(*Cb*)-баритовом (*Brt*) цементе с гематитом (*Hem*), красноватый цвет вызван примесью гематита; е – брекchieи по аргиллизированным риолитам на гематитовом (*Hem*) цементе.

делах Безенгийского рудного района в связи с процессами среднеюрской тектоно-магматической активизации, развиты брекchieи различного происхождения: тектоногенные (фиг. 5а), эруптивные магматогенные (фиг. 5б, в) и флюидно-эксплозивные гидротермальные (фиг. 5г, д, е). Эруптивные магматогенные брекchieи развиты как в экзоконтактах субвулканических тел кислых и умеренно-кислых вулканитов, представляя собой угловатые обломки риолитов и трахитов, заключенных в интенсивно передробленные осадочные породы, так и в центральных частях сложных субвулканических построек. Нередко на эруптивные брекchieи накладываются флюидно-эксплозивные гидротермальные брекchieи с рудной минерализацией. Флюидно-эксплозивные брекchieи образуют трубки неправильной формы и линзовидные межпластовые тела в зонах максимальной проницаемости вмещающих пород. Флюидно-эксплозивные гидротермальные брекchieи месторождения Радужное по классификации (Шарпенюк и др., 2018) могут быть отнесены к флюидогенным крипто-эксплозивным брекchieям, которые представляют

наибольший промышленный интерес, поскольку обычно вмещают рудную минерализацию.

Для флюидно-эксплозивных брекchieй месторождения Радужное характерна крайняя неоднородность состава обломков и цемента. Обломки представлены окварцованными аргиллитами, алевролитами, песчаниками, кислыми вулканитами, редко сульфидными рудами. Цемент карбонатно-кремнистый, кварцевый (фиг. 5г), карбонат-баритовый (фиг. 5д), гематитовый (фиг. 5е), редко сульфидный. Присутствуют признаки многократного брекчирования; при этом не наблюдается сортировки обломков по размеру. Рудная минерализация локализуется как в цементе брекchieй, так и в обломках пород.

Содержание Au в рудах колеблется от 0.1 до 215 г/т и Ag от 1 до 4000 г/т. Главные рудные минералы: самородное золото и серебро, акантит, пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды. Самородное золото, как правило, находится в ассоциации с халькопиритом или галенитом (фиг. 11).

Таблица 2. Минеральный состав рудных ассоциаций месторождения Радужное

Ассоциации	Au–Ag малосульфидная ассоциация	Au-сульфидная ассоциация	Полиметаллическая ассоциация
Главные минералы	Акантит, сфалерит, галенит, гематит, барит, кальцит, доломит, <i>железистый доломит</i>	Пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды (<i>тетраэдрит-(Zn)</i> , <i>теннантит-(Fe,Zn)</i>), <i>бурнонит</i> , кварц, гипс, ангидрит	Кварц, халькопирит, сфалерит, галенит
Редкие минералы	Самородное золото	Самородное золото, барит, кальцит, доломит	Пирит

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

В пределах рудных тел минерализация развита крайне неравномерно. Поэтому подсчет запасов на месторождении проводился с учетом коэффициента рудоносности, который для самых богатых блоков руды составлял 0.83 (Калинин и др., 1979ф).

Полиметаллическое оруденение по данным предыдущих исследований (Мезенина и др., 1982ф) установлено на всех участках месторождения, достигая в скважинах Первой рудной зоны суммарных содержаний полиметаллов от 1.0 до 21.2 мас. %, при раздельном содержании свинца до 6.5 мас. %, цинка до 17.2 мас. % и меди до 5.8 мас. %. Учитывая недостаточную степень изученности попутных компонентов, ресурсы меди, свинца и цинка на рудных зонах Первая, Гипсовая и Лагерная поставлены на учет как некондиционные прогнозные ресурсы в количестве: медь – 5.96 тыс. т, цинк – 12.55 тыс. т; свинец – 8.57 тыс. т (Барановский и др., 2014ф).

Представления о возрасте месторождения Радужное основываются на геологических данных – пространственной связи рудоносных флюидно-эксплозивных брекчий с силлами и некками риолитов хуламского комплекса. Это дало основание исследователям-предшественникам предполагать синхронность развития рудообразования и среднеюрского вулканизма (Лезин и др., 1976ф; Коптюх и др., 1985ф).

Текстуры и структуры руд

Руды имеют массивную, пятнистую, вкрапленную (фиг. 6в), прожилковую и брекчиевую текстуры. Текстуры руд, как правило, зависят от строения и соотношения различных по составу минеральных агрегатов и вмещающих пород. Прожилковые текстуры (фиг. 6д, з) характерны для руд, локализованных в гранитах. Брекчиевые текстуры (фиг. 6б) являются наиболее распространенными в связи с широким развитием флюидно-эксплозивных брекчий на месторождении.

Метаколлоидных и полосчатых текстур, характерных для классических золото-серебряных

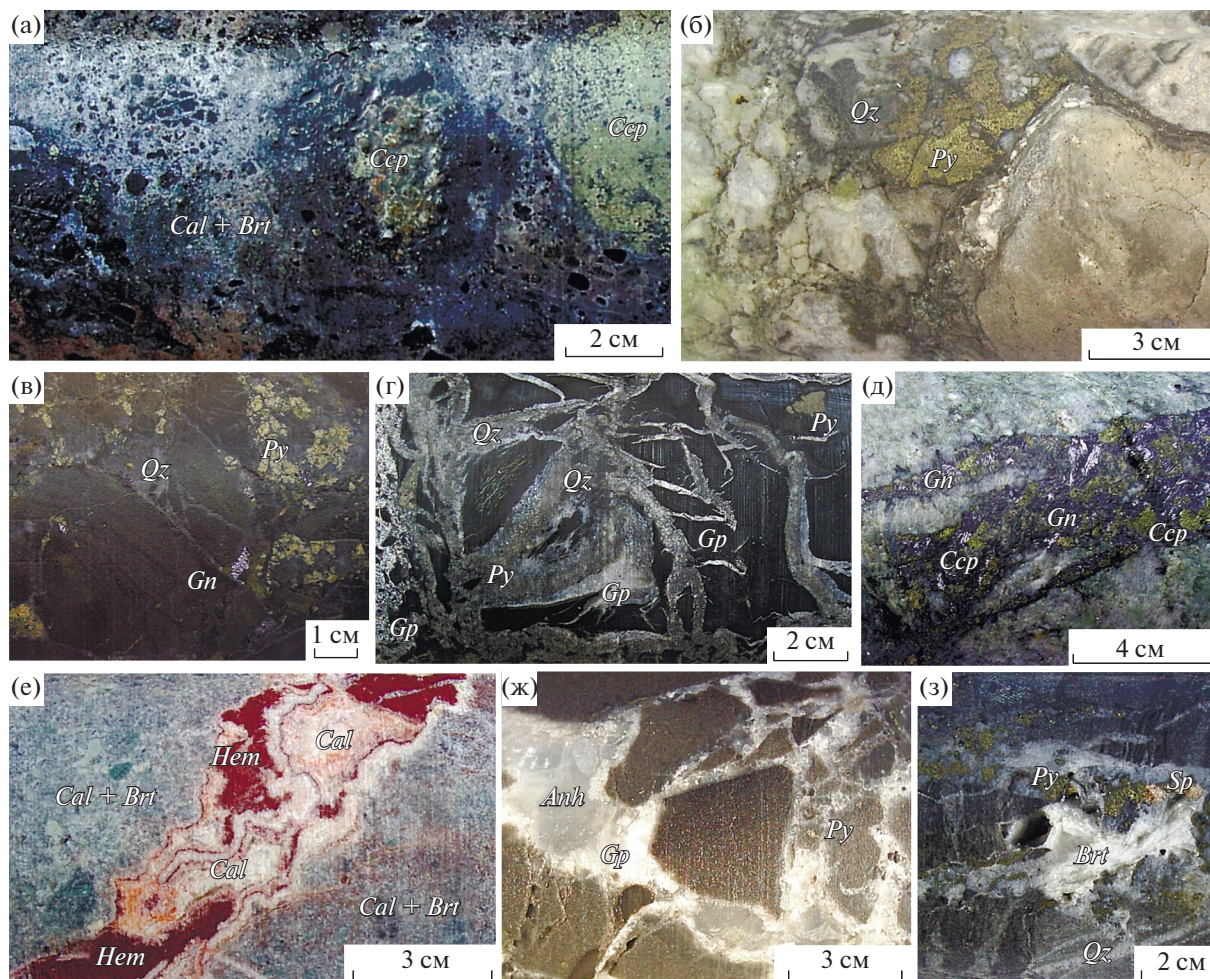
эпитермальных месторождений LS-типа, на месторождении Радужное не встречено.

Структуры руд, как правило, равномернозернистые, иногда встречаются структуры смятия (хорошо различимые в галените). В Au-сульфидных рудах наблюдаются кокардовые текстуры, хорошо различимые лишь при микроскопическом изучении шлифов (фиг. 8в).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

Руды месторождения сложены тремя минеральными ассоциациями, в распределении которых наблюдается вертикальная зональность (минеральный состав выделенных рудных ассоциаций приведен в табл. 2). (1) В верхних горизонтах флюидно-эксплозивных брекчий развита Au–Ag-малосульфидная ассоциация, образованная баритом и карбонатами с акантитом, самородным золотом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом. Данная ассоциация имеет крайне ограниченное распространение в пределах месторождения (Первая рудная зона). (2) Au-сульфидная ассоциация характерна для рудных тел, пространственно связанных с субвулканическими телами – лакколитами и силлами риолитов. Наряду с полиметаллической минерализацией, халькопиритом и золотом здесь широко развит пирит и сульфосоли. Жильные минералы представлены кварцем, баритом, гипсом 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: галенит, сфалерит, халькопирит, пирит; жильные минералы – кварц и барит.

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



Фиг. 6. Текстурные особенности руд и соотношение рудных и жильных минералов на месторождении Радужное. а – брекчии аргиллитов, цемент карбонат-баритовый с халькопиритом, скв. 3001 (инт. 69.2–69.4 м); б – брекчии риолитов на кварц-сульфидном цементе, скв. 3010 (инт. 27.5–27.8 м); в – брекчии окварцованных аргиллитов на кварц-сульфидном цементе, скв. 3010 (инт. 66.5 м); г – брекчии аргиллитов на кварц-сульфидном цементе с прожилками гипса, скв. 3012 (инт. 21.6–21.8 м); д – галенит-халькопиритовая жила в гранитах белореченского комплекса, скв. 3012 (инт. 21.6–21.8 м); е – гематит-карбонатный прожилок в флюидно-эксплозивных брекчиях, видны темные обломки аргиллитов, замещенные баритом и карбонатом, скв. 3014 (инт. 45.0 м); ж – брекчии окварцованных аргиллитов на ангидрит-гипсовом цементе с вкрапленностью пирита, скв. 3021 (инт. 111.3–111.4 м); з – брекчии по окварцованным алевритам на кварц-барит-сульфидном цементе, скв. 3012 (инт. 17.8–18.6 м).

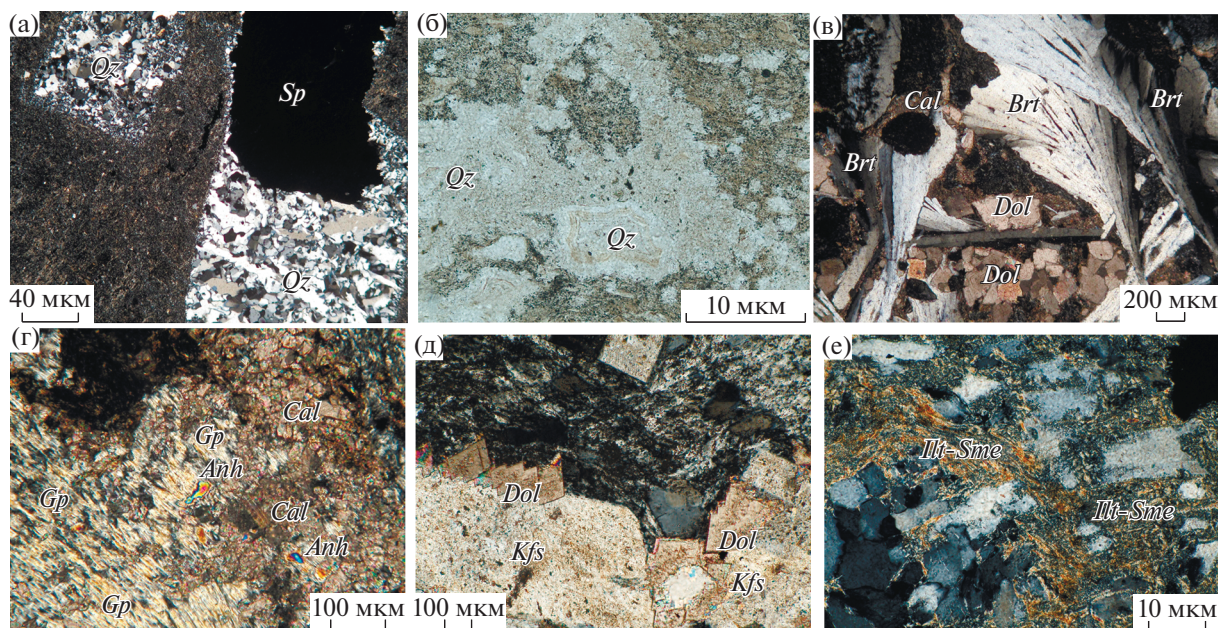
Всего в рудах месторождения Радужное установлено 40 различных минералов (включая гипергенные и минералы метасоматически измененных вмещающих пород, такие как серицит, иллит-сметтит, каолинит). Наиболее распространенными минералами на месторождении Радужное являются пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, кварц, барит, гипс, карбонаты. К крайне редко встречаемым минералам можно отнести арсенопирит, борнит, молибденит, флюорит, кергарит.

Жильные и метасоматические минералы

Наиболее распространенным нерудным минералом на месторождении является кварц. С доруд-

ным окварцеванием связано образование метасоматического кварца, который развивается как по осадочным, так и по магматическим породам. Кварц этого типа образует зерна с неправильными зубчатыми очертаниями. Для жильного кварца можно выделить три разновидности: 1) мутно-серый жильный кварц с гранобластовой структурой, ассоциирующий с рудными минералами Au-сульфидной (фиг. 6б, в) и полиметаллической ассоциаций (фиг. 7а); 2) халцедоновидный кварц (фиг. 7б); 3) поздний белый и бесцветный кварц, образующий секущие прожилки, не содержащие сульфидную минерализацию.

Карбонаты представлены Mn-содержащим кальцитом (фиг. 7г), жильным (фиг. 7в) и метасо-



Фиг. 7. Жильные и метасоматические минералы месторождения Радужное. а – сфалерит (*Sp*)-кварцевые (*Qz*) прожилки в брекчиях по окварцованным алевролитам, зона Лагерная, образец Р-22, николи скрещены; б – халцедоновидный кварц (*Qz*) в цементе брекчированных аргиллизированных риолитов; зона Орлиная, образец Р-3/2-181, николи параллельны; в – сноповидные кристаллы барита (*Brt*) в доломит (*Dol*)-кальцитовой (*Cal*) основной массе, образец 3009/15; г – ангидрит (*Anh*) и гипс (*Gp*) с более поздним наложенным кальцитом (*Cal*), Первая рудная зона, образец 3001/6, николи скрещены; д – наложенный доломит (*Dol*), замещающий вкрапленники КПШ (*Kfs*) в риолитах, рудная зона Орлиная, образец Р-3/2-181, николи скрещены; е – смешанно-слоистые иллит-сметиты (*Ill-Sme*), развивающиеся по основной массе аргиллизированных риолитов, образец Р-6, николи скрещены.

матическим (фиг. 7д) доломитом и Fe-доломитом, реже сидеритом. В кальците и железистом доломите, по данным РСМА, присутствуют примеси MnO до 2.04 мас. %. Кальцит (фиг. 7е) и доломит, наряду с баритом являются основными минералами Au–Ag малосульфидной ассоциации.

Барит (фиг. 7в) является типичным минералом цемента флюидно-эксплозивных брекчий (Au–Ag малосульфидная ассоциация) и рудных прожилков. По данным рентгеноспектрального микроанализа, для него характерна примесь стронция (SrO до 7 мас. %). Во флюидно-эксплозивных брекчиях Au–Ag малосульфидной ассоциации барит, наряду с кальцитом (фиг. 7а), доломитом и гематитом, ассоциирует с самородным золотом, халькопиритом, сфалеритом и акантитом; а в прожилках полиметаллической ассоциации (фиг. 7з) – с пиритом и сфалеритом.

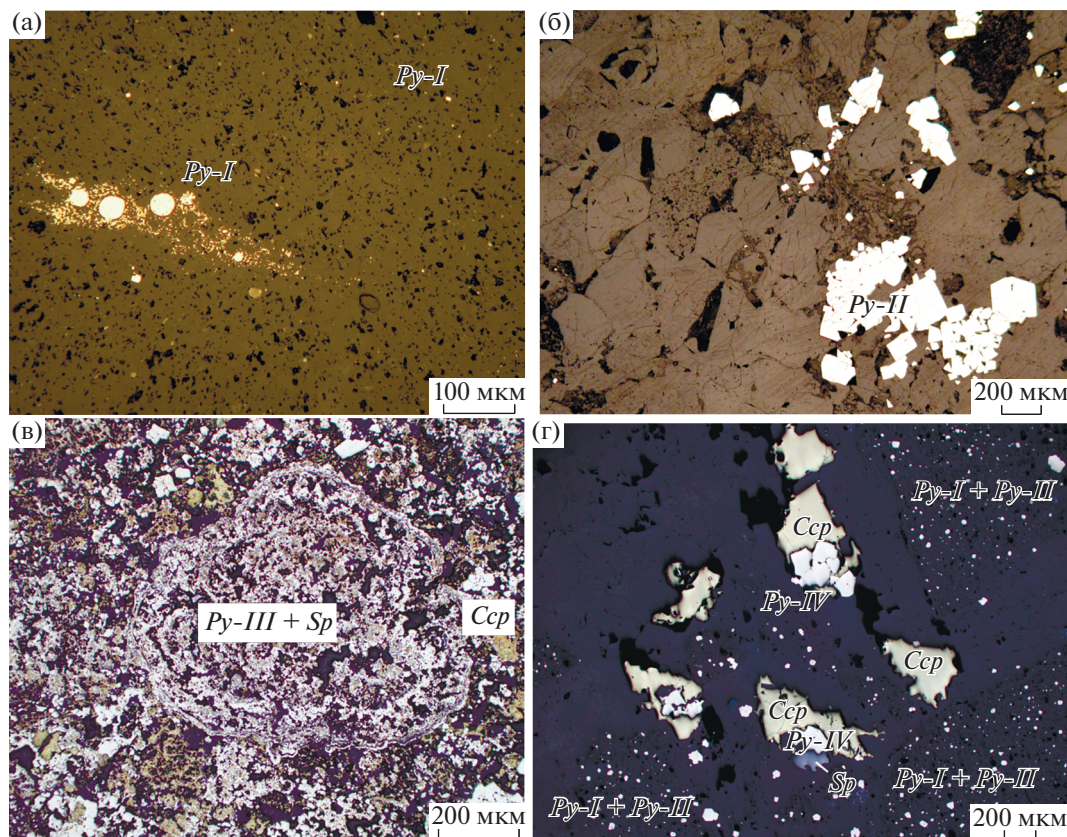
Ангидрит и гипс (фиг. 7г) широко развиты на месторождении Радужное (Первая рудная зона, Гипсовая и Орлиная зоны). Как правило, они встречаются в зонах дробления в перемятых рассланцованных аргиллитах, реже алевролитах. Эти породы пронизаны прожилками, содержат гнезда или сementированы белым, иногда розовато-белым ангидрит-гипсовым материалом. Гипс образует как единичные прожилки, так и сеть довольно мощных прожилков. Суммарная мощность

гипсоносных толщ по данным бурения достигает 65–80 метров. Характерна ассоциация гипса с первичными неизменными сульфидами (фиг. 7б, ж), как правило, пиритом Au-сульфидной ассоциации.

Смешаннослоистые и глинистые минералы широко развиты в пределах всего месторождения. 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. Серцит встречается в измененных гранитах фундамента и песчаниках безенгийской свиты. Минералы группы иллит-сметитов широко развиты в вулканических породах хуламского комплекса, где в результате низкотемпературной аргиллизации они замещают как основную массу пород (фиг. 7е), так и вкрапленники К-полевого шпата. Монтмориллонит образует тонковолокнистые агрегаты, развиваясь по плагиоклазу и остаткам стекла в аргиллизированных риолитах. Селадонит развивается в контактовых частях тел риолитов и трахитов с вмещающими их аргиллитами, часто придавая породам изумрудно-зеленую окраску.

Рудные минералы

Пирит присутствует практически во всех минеральных ассоциациях месторождения и весьма



Фиг. 8. Пирит различных генераций в микрофотографиях аншлифов. а – пирит-I и пирит-II, образец P-18; б – пирит-II в окварцованных аргиллизированных песчаниках безенгийской свиты, образец 3/2-210; в – глобулярные образования пирита-III в сростании с халькопиритом (*Ccp*), сфалеритом (*Sp*) и галенитом из сульфидных руд, участок “Первая рудная зона”, образец 3001/4; г – пирит-IV в флюидно-эксплозивных брекчиях по алевролитам, обломки алевролитов окварцованы, наблюдается рассеянная вкрапленность пирита-I и пирита-II, в сульфидно-кварцевом цементе брекчий помимо пирита наблюдается халькопирит (*Ccp*) и сфалерит (*Sp*), обр. P-17.

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, нами было выделено четыре генерации пирита (фиг. 8).

Пирит-I (осадочно-диагенетический) образует послойную или рассеянную вкрапленность в осадочных породах юрского возраста (фиг. 8а). Он представлен фрамбоидами и мелкими кубическими кристаллами размером до 20 мкм. Для пирита-I характерно крайне низкое содержание примесей Cu (0.2 мас. %), отмечаются примеси As 0.06–2.16 мас. %, Sb 0.05–0.23 мас. %, Ni 0.11–0.16 мас. % и Co 0.06–0.11 мас. %.

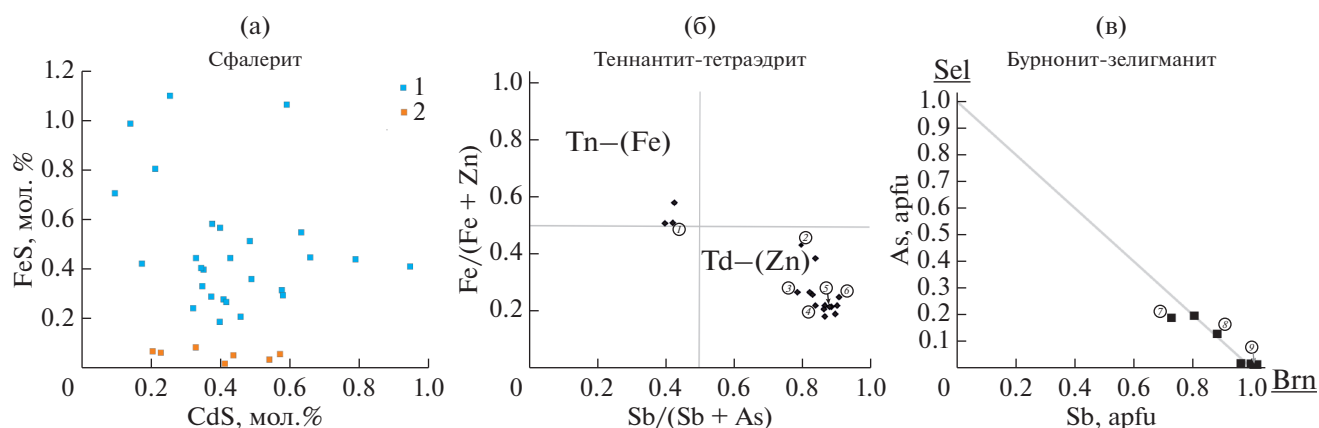
Пирит-II присутствует в серицитизированных и пропилитизированных гранитах, осадочных породах и вулканизированных юрского возраста. Для него характерна пентагон-додекаэдрическая форма кристаллов, размеры достигают 200 мкм (фиг. 8б). Рассеянная вкрапленность пирита-II развита в ассоциации с серицитом, хлоритом, анатазом.

Для пирита-II установлена примесь As (0.46–2.17 мас. %); наблюдается ее зональное распределение в различных зонах роста единого кристалла. Отмечены также незначительные примеси Cu (0.10–0.26 мас. %), Sb (0.06–0.07 мас. %) и Co (0.06–0.07 мас. %).

Пирит I и пирит II являются дорудными.

Пирит-III является основным минералом Au-сульфидной ассоциации; он, как правило, образует гипидиоморфные выделения в сульфидных и кварц-сульфидных рудах в ассоциации со сфалеритом, халькопиритом, блеклой рудой и галенитом (фиг. 8в). 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.

Пирит-IV образует идиоморфные кристаллические выделения в кварц-сульфидном цементе и прожилках флюидно-эксплозивных брекчий (фиг. 8г). Этот тип пирита имеет тесные агрегатные сростания с кварцем, баритом, сфалеритом, халькопиритом и галенитом. Для пирита-IV характерны



Фиг. 9. Соотношение некоторых изоморфных элементов в твердых растворах месторождения Радужное. а – соотношение CdS и FeS (в мол. %) в сфалерите из золото-сульфидной (1) и золото-серебряной малосульфидной ассоциаций (2). б – соотношение Sb/(Sb + As) и Fe/(Fe + Zn) в блеклой руде. в – соотношение Sb и As (в ф.к. (apfu)) в бурноните. Номера в кружках (1–9) соответствуют анализам, представленным в табл. 3.

примеси As 0.23–3.55 мас. %, Cu 0.13–0.42 мас. % и незначительные примеси Co (0.08 мас. %), Ni (0.09 мас. %) и Sb (0.10–0.20 мас. %).

Сфалерит. Большинство выделений сфалерита находится в сростании с галенитом, халькопиритом, пиритом, образуя агрегаты неправильной формы (фиг. 8г; 10в, е; 11в, е).

Сфалерит месторождения Радужное характеризуется низким содержанием железа (≤ 0.22 мас. % Fe) и отнесен к клейофану. С помощью РСМА (35 анализов) был изучен состав сфалерита из различных ассоциаций. Для Au-сульфидной и Au-Ag-малосульфидной ассоциаций, согласно полученным данным, характерны два незначительно различающихся по составу сфалерита.

Сфалерит-I ассоциирует с пиритом, халькопиритом и галенитом в сульфидных рудах и кварц-сульфидных жилах. Состав сфалерита-I: Zn 59.19–66.58 мас. %; S 31.26–33.29 мас. %. Сфалерит-I характеризуется следующими примесями: Fe 0.11–0.98 мас. %; Cd 0.11–1.04 мас. %; Cu 0.05–0.36 мас. %, In 0.09–0.11 мас. %, Hg 0.06 мас. %.

Сфалерит-II ассоциирует чаще всего с баритом и карбонатами (доломитом, кальцитом). Зерна сфалерита данного типа часто покрыты тонкой пленкой акантита. Состав сфалерита-II: Zn 63.31–67.31 мас. %; S 32.43–33.21 мас. %. Сфалерит-II характеризуется следующими примесями: Fe 0.01–0.05 мас. %; Cd 0.24–0.62 мас. %; In 0.07–0.09 мас. %, Sn 0.04–0.05 мас. %, Cu 0.06 мас. %.

Сфалерит Au-Ag-малосульфидной ассоциации характеризуется минимальными содержаниями Fe (менее 0.1 мол. % FeS) по сравнению со сфалеритом Au-сульфидной ассоциации (0.2–1.1 мол. % FeS). При этом концентрации Cd в обеих ассоциациях лежат почти в одном диапазоне 0.1–0.6 мол. % CdS (фиг. 9а), хотя отмечаются еди-

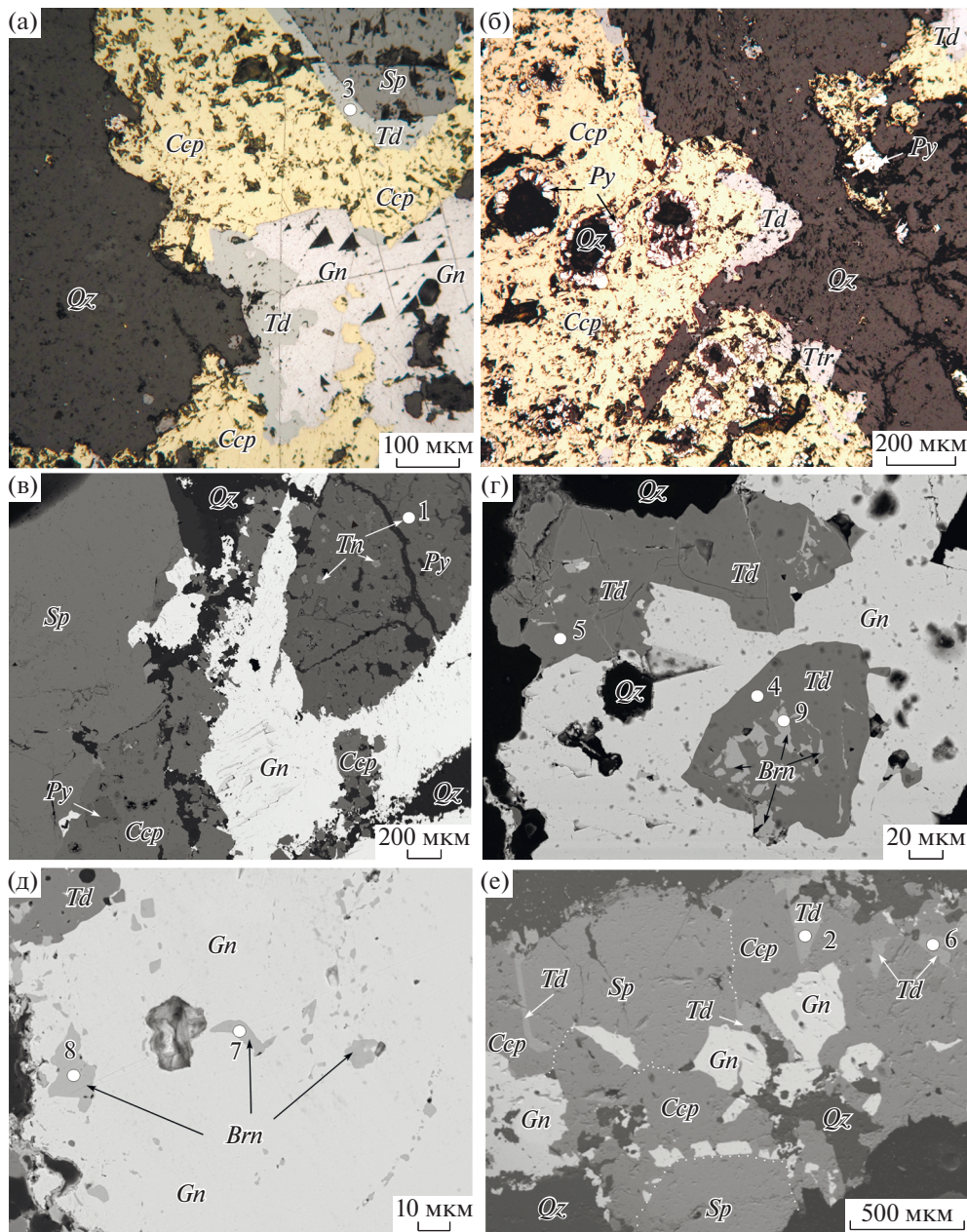
ничные анализы сфалерита Au-сульфидной ассоциации, в которых они достигают 0.8–1.0 мол. % CdS.

Галенит наблюдается как в виде единичных кристаллов, так и агрегатов зерен. Образует тесные сростания с халькопиритом. Размеры кристаллов обычно от десятых мм до 1–3 мм, в цементе флюидно-эксплозивных брекчий – от первых микрон до 0.1 мм, в мономинеральных выделениях встречаются кристаллы до 2 см. В Au-сульфидной ассоциации галенит встречается со сфалеритом, пиритом, халькопиритом (фиг. 8в). 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 Ag 0.07 мас. %, Sb 0.13 мас. %, Bi 0.09–0.13 мас. %, Cu 0.19–0.60 мас. % и Fe 0.06–3.77 мас. %.

Халькопирит встречается на всех участках месторождения Радужное. Наблюдается в сростании со сфалеритом, галенитом, окаймляет кристаллы пирита, галенита, выполняет интерстиции в катаклазированном пирите, сфалерите. Совместно со сфалеритом, галенитом, и блеклыми рудами ассоциирует с самородным золотом.

Сульфосоли на месторождении представлены в основном *блеклой рудой* и редко *бурнонитом*, которые обнаружены практически во всех рудных зонах и встречаются в незначительном количестве в виде спорадических выделений в ассоциации с халькопиритом, сфалеритом, галенитом и пиритом (фиг. 10). Их содержание в рудах не превышает 1 об. %. Нами были изучены образцы сульфидных руд зон Орлиная и Кишлык-су и впервые приведен состав сульфосолей, диагностированный с помощью РСМА.

Блеклая руда обнаружена в сростании со сфалеритом, галенитом, халькопиритом и бурнони-



Фиг. 10. Взаимоотношение сульфосолей с другими минералами в сульфидных рудах участков “Орлиная зона” и Кишлык-су. а – срastание сфалерита (*Sp*), тетраэдрита (*Td*), галенита (*Gn*) и халькопирита (*Ccp*). Тетраэдрит нарастает на сфалерит и образует взаимные срastания с галенитом. Халькопирит выполняет интерстиции между зернами указанных минералов, замещая и проникая в сфалерит и галенит; б – срastание халькопирита, тетраэдрита и пирита (*Py*). Тетраэдрит развивается по контакту халькопирита и кварца (*Qz*). В халькопирите присутствуют кольцевые выделения, сложенные мелкими зернами пирита по периферии и кварцем в центральной части; в – срastание сфалерита, пирита, галенита и халькопирита. Пирит содержит мелкие изометричные включения теннантита (*Tn*); г – срastание галенита и тетраэдрита, в котором наблюдаются ксеноморфные выделения бурнонита (*Brn*); д – ксеноморфные включения бурнонита и цепочки мелких округлых включений в галените; е – срastание сфалерита, халькопирита, галенита и тетраэдрита. Тетраэдрит и галенит развиваются по контакту сфалерита и халькопирита. Номера точек анализов на рисунке соответствуют номерам анализов в таблице 3. Образец А-2/2-187 (а, б, в, е) и КС-2/4 (г, д). Фотографии в отраженном свете (а–б) и BSE-фото (в–е).

том и присутствует в пирите в виде мелких изометричных включений (фиг. 10).

Содержание основных элементов (по данным 17 анализов) в блеклой руде 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 (табл. 3, ан. 1–6). Соотношения Sb/(Sb + As) и

Таблица 3. РСМА- и СЭМ-ЭДС-анализы блеклой руды и бурнонита месторождения Радужное

№ ан.	Минерал	Ag	Cu	Zn	Fe	Pb	Sb	As	Bi	S	Сумма	Sb/(Sb + As)	Fe/(Fe + Zn)
1	Tn-(Fe,Zn)	1.29	39.47	4.49	3.99	н.о.	12.89	10.94	0.07	27.88	101.09	0.420	0.509
		(Cu _{9.50} Ag _{0.18}) _{Σ9.69} (Zn _{1.05} Fe _{1.09}) _{Σ2.14} (Sb _{1.62} As _{2.23}) _{Σ3.85} S _{13.30}											
2		3.35	35.55	4.52	2.95	н.о.	23.69	3.73	н.о.	26.21	100.00	0.796	0.433
		(Cu _{9.14} Ag _{0.51}) _{Σ9.65} (Zn _{1.13} Fe _{0.86}) _{Σ1.99} (Sb _{3.18} As _{0.81}) _{Σ3.99} S _{13.36}											
3		3.11	34.34	5.50	1.70	н.о.	24.02	4.06	н.о.	27.29	100.02	0.785	0.266
		(Cu _{8.77} Ag _{0.47}) _{Σ9.24} (Zn _{1.37} Fe _{0.49}) _{Σ1.86} (Sb _{3.20} As _{0.88}) _{Σ4.08} S _{13.82}											
4	Td-(Zn)	0.44	37.76	6.01	1.45	0.06	24.96	2.96	0.12	25.80	99.61	0.838	0.220
		(Cu _{9.75} Ag _{0.07}) _{Σ9.82} (Zn _{1.51} Fe _{0.43}) _{Σ1.93} (Sb _{3.36} As _{0.65}) _{Σ4.01} S _{13.21}											
5		0.41	38.08	6.12	1.45	0.07	25.05	2.10	0.16	26.13	99.63	0.880	0.217
		(Cu _{9.80} Ag _{0.06}) _{Σ9.86} (Zn _{1.53} Fe _{0.42}) _{Σ1.95} (Sb _{3.37} As _{0.46}) _{Σ3.82} S _{13.33}											
6		2.95	33.92	5.52	1.55	н.о.	27.64	1.77	н.о.	26.64	99.99	0.906	0.247
		(Cu _{8.82} Ag _{0.45}) _{Σ9.27} (Zn _{1.40} Fe _{0.46}) _{Σ1.86} (Sb _{3.75} As _{0.39}) _{Σ4.14} S _{13.73}											
7		н.о.	11.71	0.06	0.16	46.79	17.90	2.92	н.о.	19.74	99.39	0.791	
		Pb _{1.11} Cu _{0.91} (Sb _{0.73} As _{0.19}) _{Σ0.92} S _{3.04}											
8	Brn	н.о.	12.73	0.07	н.о.	41.01	22.20	2.02	н.о.	20.24	98.44	0.871	
		Pb _{0.96} Cu _{0.97} (Sb _{0.88} As _{0.13}) _{Σ1.01} S _{3.05}											
9		н.о.	14.16	0.38	н.о.	40.16	25.79	0.29	н.о.	20.02	100.90	0.982	
		Pb _{0.92} Cu _{1.06} (Sb _{1.01} As _{0.02}) _{Σ1.03} S _{2.96}											

Примечание. Tn-(Fe,Zn) – теннантит-(Fe,Zn), Td-(Zn) – тетраэдрит-(Zn), Brn – бурнонит-зелигманит, н.о. – ниже предела обнаружения. Анализы 2, 3 и 6 выполнены на сканирующем электронном микроскопе, остальные – на рентгеноспектральном микроанализаторе. В таблице приведены анализы для представительной выборки образцов (№ анализы соответствуют номерам на фиг. 9). Точки всех проанализированных образцов показаны на фиг. 9б, в.

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) (фиг. 9б). 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). Предшествующими исследователями блеклая руда была отнесена по рентгенометрическим данным к серебросодержащему тетраэдриту (Коптюх и др., 1985ф; Кряжев, Двуреченская, 2014ф).

Бурнонит на месторождении, впервые описанный нами, обнаружен в виде ксеноморфных выделений в галените и тетраэдрите (фиг. 10г–д). Вероятно, бурнонит замещает последние, поскольку наблюдаются мельчайшие цепочки его выделений в галените (фиг. 10д) и тонкие и короткие просечки – в тетраэдрите (фиг. 10г). По результатам рентгеноспектральных микроанализов (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 (табл. 3, ан. 7–9). Таким образом, на месторождении Радужное встречен бурнонит-зелигманитовый твердый раствор с непрерывным изоморфизмом в интервале соотношений Sb/(Sb + As) от 0.98 до 0.79 (фиг. 9в).

Была предпринята попытка применения рудной геотермометрии к сульфидным твердым растворам на месторождении Радужное. Блеклая руда (тетраэдрит) и сфалерит имеют ровные взаимные границы и отсутствие следов коррозии (фиг. 10а, е), что может свидетельствовать о парагенезисе этих минералов. Состав сфалерита, сосуществующего с тетраэдритом (табл. 3, ан. 3), следующий (в мас. %): Zn – 61.64, Fe – 0.57, S – 37.79; 0.96 мол. % FeS. Температура, рассчитанная для этой пары минералов по геотермометру (Sack, Loucks, 1985), составила $162 \pm 25^\circ\text{C}$. Температура кристаллизации сфалерит-тетраэдритового парагенезиса не противоречит условиям отложения этих минералов, поэтому могла бы считаться достоверной и характеризовать условия отложения этой ассоциации на месторождении.

Взаимоотношения блеклой руды и бурнонита в рудах месторождения не установлены. Включения бурнонита в тетраэдрите могут свидетель-

Таблица 4. Состав самородного золота и серебра месторождения Радужное по данным РСМА (мас. %)

№п/п	№ образца	Au	Ag	Hg	Cu	Fe	Сумма	Пробность золота, ‰
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	Данные из (Коптюх и др., 1985ф)	19.32	70.12	9.93	0.00	0.00	99.37	193

ствовать как об одновременном отложении этих минералов (захват зерен бурнонита при кристаллизации тетраэдрита), так и о более позднем образовании бурнонита относительно тетраэдрита (замещение тетраэдрита бурнонитом, приуроченное к мелким порам и трещинкам). Температура отложения бурнонит-блеклорудных ассоциаций, рассчитанная по геотермометру (Sack, Ebel, 1993), оказалась нереальной. Это свидетельствует о том, что равновесие между этими твердыми растворами не было достигнуто или было нарушено и подтверждает предположение о более позднем отложении бурнонита.

Гематит образует тонкодисперсные массы и встречается не только в зоне окисления месторождения, но и на его глубоких горизонтах в цементе флюидно-эксплозивных брекчий (фиг. 5г, 6е).

Самостоятельные минеральные фазы Au и Ag на месторождении представлены низкопробным самородным золотом и серебром, акантитом и кераргиритом. Кераргирит является редким гипергенным минералом, развивающимся по акантиту.

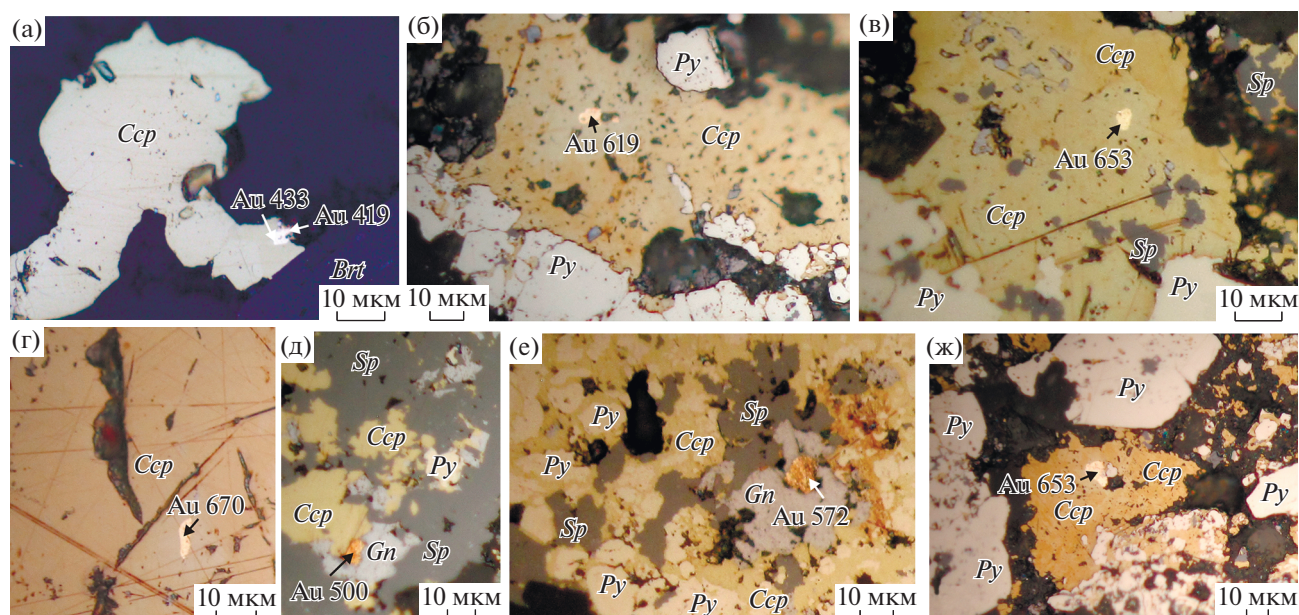
Акантит – основной серебросодержащий минерал Au–Ag-малосульфидной ассоциации; встречается в флюидно-эксплозивных брекчиях со сфалеритом, галенитом, карбонатами и баритом. Содержание акантита во флюидно-эксплозивных брекчиях колеблется от долей до 5 об. %.

Самородное золото встречается в основном в халькопирите и галените (фиг. 11), образует выделения неправильной формы размером от 5 до 15 мкм, его пробность невысокая (419–670‰ по 10 анализам на микрозонде). В золоте отмечены примеси Hg – до 4.6 мас. % (табл. 4). Состав твердого раствора системы Au–Ag–Hg для месторождения Радужное может быть представлен формулой ($Au_{0,571-0,791}Ag_{0,207-0,390}Hg_{0,002-0,062}$) при содержаниях Au 41.91–67.02 мас. %, Ag 32.05–51.98 мас. % и Hg 0.15–4.64 мас. %. Детальное рассмотрение

твердых растворов данной системы и термодинамических условий их образования 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 золото с низкими содержаниями ртути. *Самородное серебро* (единичное измерение, табл. 4) отмечено по литературным данным (Коптюх и др., 1985ф) 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 оно может говорить как об изменении термодинамических условий рудообразования на самых поздних стадиях рудоотложения, так и о развитии экзогенных процессов.

Гипергенные минералы

В зоне окисления месторождения, мощность которой составляет первые метры, выявлены минералы надгруппы алунита, малахит, азурит, халькозин, лимонит, ярозит, церуссит, англезит. Вторичные минералы свинца представлены церусситом, англезитом и пироморфитом, образующимися по галениту. На месторождении Радужное впервые описаны минералы надгруппы алунита, встречающиеся исключительно в маломощной зоне окисления. Пломбоярозит встречается в зоне окисления выходящих на дневную поверхность рудных тел. Минералы ряда пломбоярозит–кинторейт образуют корочки и рыхлые массы, выполняющие полости растворения сульфидов в кварцевом цементе флюидно-эксплозивных брекчий в сростании с ли-



Фиг. 11. Самородное золото в халькопирите (*Ccp*) и галените (*Gn*), золото-сульфидная ассоциация (халькопирит, пирит *Py*, галенит, сфалерит *Sp*). Участок “Первая рудная зона”, скважина 3001. Полированные шлифы. Цифры – пробаемость золота. а – обр. 3001/2; б, в, г, ж – обр. 3001/4; д, е – обр. 3001/5.

монитом, реже сростки ромбоэдрических кристаллов. 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 сульфидных руд. Изученные минералы содержат Pb (14.84–33.46 мас. % PbO), Cu (0.13–2.27 мас. % CuO) и As (0.0–7.68 мас. % As₂O₃), по составу могут быть отнесены к рядам плюмбоярозит–бедантит и плюмбоярозит–кинтореит. Существенные примеси Cu, Pb, As в минералах надгруппы алунита в зоне окисления сульфидных руд месторождения Радужное говорят о том, что они возникли при окислении сульфидных руд, а не являются эндогенными, синхронными рудоотложению. В пользу гипергенной природы алунита и ярозита свидетельствует и отсутствие этих минералов в экзоконтактной зоне неокисленных частей рудных тел.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА Pb В РУДАХ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РАДУЖНОЕ

Изотопный состав свинца в рудах месторождения Радужное

Pb-изотопные данные получены для 10 образцов галенита, которые были отобраны из всех описанных выше трех минеральных ассоциаций месторождения Радужное. Измеренные значения изотопных отношений Pb изменяются в диапазо-

нах: для отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb от 18.205 до 18.360, для ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb от 15.593 до 15.665 и для ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb от 38.466 до 38.599 (табл. 5). В целом масштаб выявленных вариаций изотопного состава Pb на месторождении является небольшим. Максимальное значение коэффициента вариации ($v_{6/4} = 0.24\%$) получено для отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, тогда как для отношений ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb величины этого параметра почти в два раза меньше ($v_{7/4} = 0.14\%$ и $v_{8/4} = 0.13\%$) и близки между собой. При этом корреляция между изотопным составом Pb в образце, с одной стороны, и местом его отбора или его принадлежности к минеральной ассоциации, с другой, отсутствует. Таким образом, месторождение Радужное обладает достаточно однородным изотопным составом Pb. Такой особенностью, как правило, характеризуются золотоносные рудообразующие системы, генетически связанные с проявлениями магматической активности (Чугаев и др., 2013б, 2021; Лебедев и др., 2016, 2018; Чернышев и др., 2018).

Изотопный состав свинца в породах

Изотопный состав Pb был изучен в магматических и осадочных породах, которые наиболее широко распространены в районе месторождения. Они представлены среднеюрскими субвулканическими породами различного состава хуламского комплекса (4 пробы) и черными сланцами (4 пробы). Содержания Pb, Th и U, а также изо-

Таблица 5. Изотопный состав Pb в галените золоторудного месторождения Радужное по данным MS-ICP-MS метода, а также модельные параметры источника Pb по модели Стейси-Краммерса (Stacey, Kramers, 1975)

№ п/п	Номер образца	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ ₂	Tm	ω ₂	Th/U
1	P-17	18.2879	15.6574	38.5512	9.96	370	40.1	4.03
2	3001/7	18.3589	15.6622	38.5922	9.97	327	39.9	4.00
3	X-2	18.2050	15.5928	38.4663	9.70	302	38.9	4.01
4	2/3-187	18.3601	15.6648	38.5988	9.98	332	40.0	4.01
5	PЦ-7	18.2812	15.6485	38.5067	9.93	357	39.7	4.00
6	3001/12	18.2944	15.6628	38.5834	9.99	376	40.4	4.04
7	PЦ-3	18.2883	15.6525	38.5203	9.94	360	39.9	4.01
8	3/2-181	18.2633	15.6453	38.5096	9.92	364	39.8	4.02
9	P-12	18.2794	15.6449	38.4915	9.91	351	39.6	4.00
10	P-23	18.2894	15.6635	38.5929	9.99	381	40.5	4.05

Примечание. Погрешность измерения изотопных отношений Pb в галените не превышала ±0.02% (2SD).

Таблица 6. Pb–Pb изотопные данные, а также содержания U, Th и Pb в валовых пробах юрских магматических пород хуламского комплекса и черных сланцах месторождения Радужное

№	Номер образца/ Характеристика	Pb, мкг/г	Th, мкг/г	U, мкг/г	Измеренные			Скорректированные на возраст 167 млн. лет		
					²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t
1	210-1/13/риолит	7.19	12.31	2.04	18.6258	15.6612	39.2104	18.373	15.638	38.241
2	210-2/13/то же	5.14	6.40	0.88	18.3497	15.6124	38.6796	18.143	15.637	38.265
3	210-5/13/трахиандезибазалт	2.63	1.01	0.30	18.4481	15.6131	38.5242	18.062	15.598	38.000
4	P-19/габбро	6.80	0.97	0.25	18.2868	15.6076	38.3898	18.256	15.604	38.315
5	Ур-30/14*/черный сланец	3.50	13.00	2.20	19.4356	15.6837	40.0594	18.225	15.605	38.312
6	Б-3/то же	17.31	12.17	2.62	18.6190	15.6357	38.8206	18.342	15.630	37.963
7	КС-А/то же	20.3	12.0	2.6	18.6181	15.6285	38.7395	18.363	15.623	38.435
8	Д-1/то же	25.5	11.9	2.6	18.5535	15.6355	38.6791	18.402	15.618	38.415

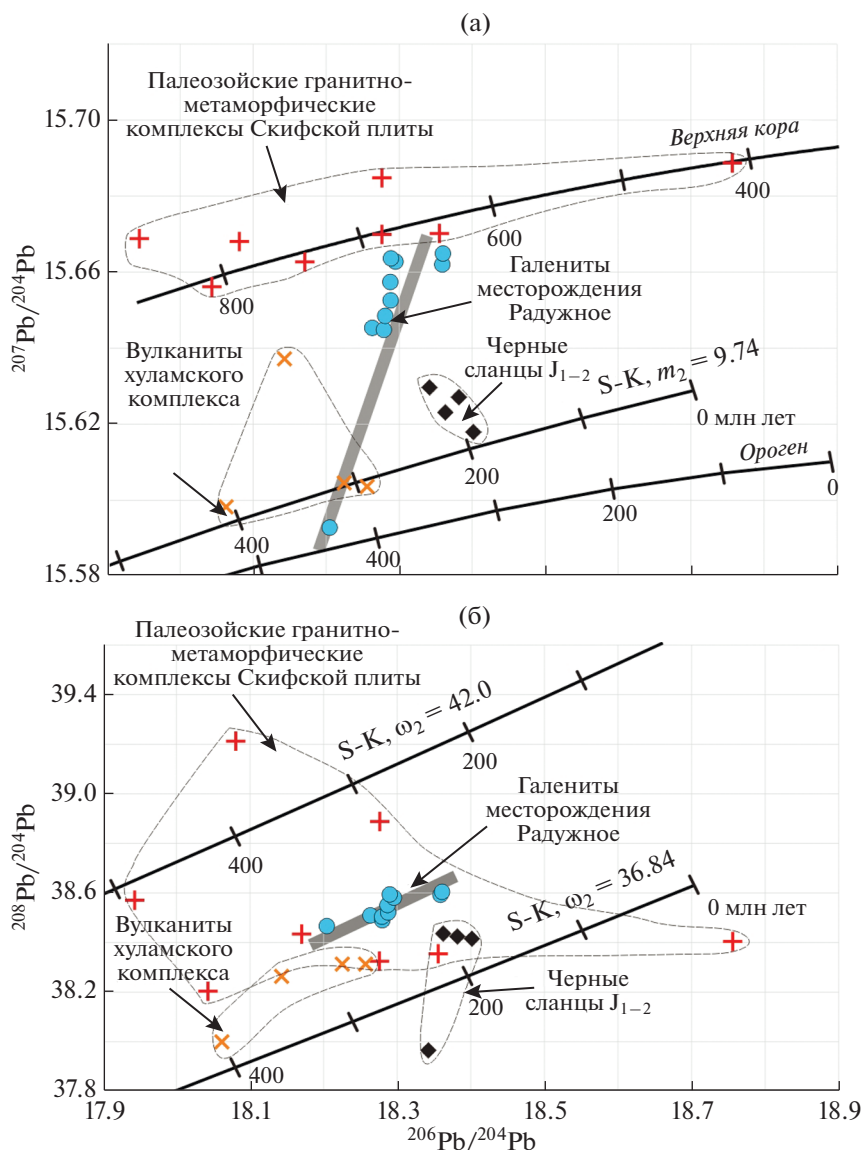
Примечание. * – данные из работы (Лебедев и др., 2018).

топный состав Pb анализировались в валовых пробах (табл. 6).

Содержания Pb, Th и U в изученных породах варьируют в широких пределах: от 2.6 до 25.5 мкг/г, от 1 до 13 мкг/г и от 0.25 до 2.6 мкг/г соответственно. Образцы характеризуются высокими как ²³⁸U/²⁰⁴Pb, так и ²³²Th/²⁰⁴Pb отношениями, которые изменяются в диапазонах от 2.3 до 42 и от 9.3 до 253. При этом минимальные значения ²³⁸U/²⁰⁴Pb и ²³²Th/²⁰⁴Pb отношений получены для габброидов хуламского комплекса (образец P-19), а максимальные – для черных сланцев. Вследствие столь высоких и сильно варьирующих ²³⁸U/²⁰⁴Pb и ²³²Th/²⁰⁴Pb отношений величина коррекции ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb на возраст 167 млн лет (U–Pb возраст пород хуламского комплекса; Кайгородова, Лебедев, 2022) была значительной и достигала величины 6.4% для отношения

²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и 4.5% для отношения ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb. В целом, скорректированные на возраст изотопные отношения Pb в породах лежат в относительно узких диапазонах. Для юрских вулканитов хуламского комплекса ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.06–18.37, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.60–15.64 и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.00–38.32, тогда как для черных сланцев ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.23–18.40, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.61–15.63 и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 37.96–38.344 (табл. 6).

Сопоставление Pb-изотопных данных для галенитов месторождения Радужное, а также скорректированного на возраст месторождения изотопного состава Pb юрских вулканитов и черных сланцев приведено на изотопных диаграммах (фиг. 12). На них также показаны кривые эволюции изотопного состава Pb в глобальных резервуарах Земли – “верхняя кора” и “ороген” по модели Зартмана-Доу (Zartman, Doe, 1981) и эволюции



Фиг. 12. Pb-изотопные диаграммы для галенита из золоторудной минерализации Au-сульфидного месторождения Радужное, а также вмещающих руды палеозойских магматических и метаморфических образований, юрских вулканических пород хуламского комплекса и черных сланцев. Для палеозойских пород кристаллической зоны Главного Кавказского хребта использованы данные (Лебедев и др., 2010, 2018).

онные кривые по модели Стейси-Краммерса (Stacey, Kramers, 1975).

На диаграмме в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ большинство точек галенита находятся существенно выше среднекоревой эволюционной кривой Стейси-Краммерса и вблизи кривой, описывающей эволюцию изотопного состава Pb в верхнекоревом геохимическом резервуаре, что свидетельствует о высоком значении U/Pb отношения в источнике рудного свинца (фиг. 12а). Исключением является лишь точка образца X-2 (галенит из трахитов хуламского комплекса), которая лежит ниже основной группы рядом с кри-

вой “орогена”. В целом, точки галенита с большим разбросом (СКВО = 75) образуют субвертикальный тренд, отражающий наличие положительной корреляционной ($r = 0.82$) зависимости между величинами $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. В свою очередь, изученным нами юрским породам соответствуют два самостоятельных поля, лежащих вблизи среднекоревой эволюционной кривой. Одно из них образовано точками вулканитов хуламского комплекса, часть из которых попадают на тренд изотопного состава Pb галенита. Второе поле, отвечающее черным сланцам, смещено правее относительно тренда как рудного свинца, так и свинца вулканитов.

На диаграмме в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ точки галенита расположены между среднекоровой ($\omega_2 = 36.84$) эволюционной кривой и кривой со значением $\omega_2 = 42$ по модели Стейси-Крамера. Это указывает на повышенные Th/Pb и Th/U отношения в источнике рудного свинца (фиг. 12б). Как и на диаграмме с ураногенными изотопами ^{206}Pb и ^{207}Pb , точки галенита с большим разбросом (СКВО = 66) лежат вдоль линейного тренда. Величина коэффициента корреляции между отношениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ составляет 0.81. Поля изотопного состава Pb вулканитов хуламского комплекса и черных сланцев лежат несколько ниже тренда и тяготеют к среднекоровой эволюционной кривой. При этом поле вулканитов расположено на нижнем продолжении тренда рудного свинца.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

О возрасте месторождения Радужное

В рамках настоящей работы не проводилось прямого датирования рудно-метасоматических образований Au-сульфидного месторождения Радужное, однако заключение о его возрасте можно сделать на основе сопоставления полученных нами ранее изотопно-геохронологических данных и опубликованных результатов геолого-стратиграфических исследований региона.

Недавно проведенное нами U—Pb датирование умерено-кислых и кислых образований хуламского вулcano-плутонического комплекса, широко распространенных в пределах Безенгийского рудного района (Кайгородова, Лебедев, 2022), позволило установить, что они были извержены в период с байоса по келловей (167 ± 3 млн лет). Отметим, что интрузии хуламского комплекса повсеместно прорывают терригенные отложения байоса, но нигде не встречаются среди толщ келловей, также присутствующих на месторождении. В течение батского века территория региона была приподнята выше уровня моря, и осадочные отложения этого времени здесь отсутствуют (Гаврилов, 2005). В совокупности стратиграфические и геохронологические данные позволяют сузить возрастной диапазон проявления магматизма хуламского комплекса до позднего байоса—бата, т.е. 169—166 млн лет.

Как было отмечено выше, рудная минерализация на Au-сульфидном месторождении Радужное непосредственно наложена на палеозойские гранитоиды, терригенные толщи байоса и трахиты—риолиты гипабиссальных интрузий хуламского комплекса. Следовательно, нижний возрастной предел для возраста месторождения также должен быть принят как поздний байос—бат. С другой стороны, отложения келловей, присутствующие на территории региона, не затронуты метасоматическими преобразованиями. Соответственно, фор-

мирование руд месторождения Радужное произошло до келловейского века.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что месторождение Радужное образовалось в позднем байосе—бате, синхронно с проявлением умеренно-щелочного магматизма хуламского комплекса или непосредственно сразу после его окончания.

Тип рудной минерализации

Существуют различные точки зрения на генезис месторождения Радужное. Согласно (Лезин и др., 1976ф; Курбанов и др., 2004ф), месторождение отнесено к золото-серебряному эпитеермальному типу. Одним из главных критериев отнесения к данному типу было нахождение в аргиллизированных риолитах адуляра. Проведенные нами петрографические исследования не выявили наличие гидротермального адуляра в рудах месторождения. Также от типичных золото-серебряных месторождений, относимых в настоящее время к LS-типу, месторождение Радужное отличается довольно широкое распространение сульфидов в рудах (для LS-типа <2 об. %) и отсутствие типичных колломорфных структур.

Интенсивное развитие гипс-ангидритовой минерализации, существенно сульфидный состав руд и субпластовая форма рудных тел позволяют некоторым авторам (Кряжев, Двуреченская, 2014ф) отнести Радужное к колчеданно-полиметаллическому типу Куроко. Однако колчеданные месторождения на северном склоне Большого Кавказа (Уруп, Худес и др.), относимые Г.В. Рябовым и И.А. Богущем (Рябов, Богущ, 2012) к уральскому типу, пространственно и генетически связаны исключительно с девонским вулканизмом и расположены севернее Тырныауз-Пшекишской шовной зоны в тектонической зоне Передового хребта. Также известно, что ангидрит (Hedenquist et al., 2000) относится к типичным жильным минералам IS-типа месторождений.

Отсутствие среди метасоматитов минералов, характерных для высокосульфидизированного (HS) типа месторождений (пирофиллит, алунит и др.), признаки замещения безэпидотовых хлоритовых пропилитов эпитеермальными аргиллизитами и широкое развитие смешанно-слоистых минералов типа иллит-сметкита позволяет отнести околорудные метасоматиты месторождения Радужное к эпитеермальным аргиллизитам, характерным для большинства месторождений низкосульфидизированного (LS) и промежуточно-сульфидизированного (IS) типов (Einaudi et al., 2003).

Учитывая минеральный состав руд (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, Ag-содержащие тетраэдрит-(Zn) и теннантит-(Fe,Zn)), пространственно-временные и, как показано ниже, генетические связи с бимодальным континентальным

постколлизийным магматизмом, а также низкую пробность самородного золота, месторождение Радужное может быть отнесено к промежуточно-сульфидизированному (IS) эпиптермальному типу (Sillitoe et al., 2003). Подобные объекты, как правило, характеризуются более низкими содержаниями золота, чем месторождения низкосульфидизированного (LS) типа (Wang et al., 2019).

По классификации (Wang et al., 2019) месторождения IS-типа подразделяются на два подтипа: NC (Neutral-Compressional)-подтип и E (Extensional)-подтип. NC-подтип в основном образуется в условиях сжатия или в обстановках околонеотральных напряжений, которые предоставлены магматическими дугами субдукционной стадии (особенно континентальными дугами и зрелыми островными дугами). Для E-подтипа характерна тесная связь с высокодифференцированными кислыми магматическими породами (что характерно и для Безенгийского рудного района, где оруденение связано с кислыми магматическими породами хуламского комплекса), в то время как NC-подтип ассоциирует с более мафическими вулканическими породами. Таким образом, можно предположить, что Безенгийский рудный район и месторождение Радужное в частности относятся к E-подтипу промежуточно-сульфидизированных месторождений.

Согласно существующим представлениям (Корольков, 2007), для постколлизийной геотектонической обстановки, в которой предположительно формировалось месторождение Радужное, характерно проявление блоковых перемещений по зонам разломов и активная вулканическая деятельность с формированием рудоносных умеренно-щелочных магматических комплексов различного состава. Тектоническое развитие в этот этап обычно описывается как тектоника смещений (strike-slip), при которой складчатые деформации имеют подчиненное значение; в некоторых случаях возникают локальные зоны растяжения с начальной рифтогенной обстановкой. К примеру, постколлизийный высококалийный магматизм описан (Nie et al., 2015) в металлогенической провинции Улан-Джиавула (Восточная Азия); с ним парагенетически связаны крупные Ag–Pb–Zn месторождения (например, месторождения Цав, Нойон-Тологой и др. (Гантумур и др., 2010; Чугаев и др., 2013)). Месторождение Цав можно назвать наиболее близким по генетическому типу, характеру магматизма и минералогическому составу руд к месторождению Радужное.

Источники свинца золоторудной минерализации месторождения Радужное

Наличие для свинца галенита корреляционных зависимостей 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, которые на Pb–Pb диаграммах (фиг. 12) выражаются в виде коротких трендов, указывает на участие как минимум двух источников, отличающихся по своим Pb-изотопным характеристикам. Наиболее отчетливо эти различия выражены по величинам $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и параметру μ_2 .

В рамках двухстадийной модели Стейси–Крамерса, полученные для галенитов Pb-изотопные данные позволяют дать оценку некоторых параметров источников свинца золоторудной минерализации месторождения Радужное.

Согласно этим оценкам, основной источник обладал повышенными (относительно среднекоровых) величинами $\mu_2 = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 9.91–9.99$, $\omega_2 = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb} = 38.9–40.5$ и $\text{Th}/\text{U} = 4.00–4.05$ (табл. 5). Приведенные характеристики типичны для пород сиалической континентальной коры. В свою очередь, Pb–Pb модельный возраст (T_m), отражающий время отделения свинца от U–Th–Pb изотопной системы источника, оказался почти в 2 раза более древним ($T_m = 302–381$ млн лет), чем предполагаемый по геологическим данным возраст месторождения. Это расхождение свидетельствует о сложной (многостадийной) эволюции рудного свинца в данном резервуаре, в течение которой происходило изменение (понижение) U/Pb отношения в нем. В целом полученные величины модельных параметров μ_2 , ω_2 , Th/U и T_m дают основание предполагать поступление свинца в рудообразующую систему из источника корового типа.

Рассматриваемый источник рудного Pb, отличающийся высокими значениями параметров $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (≥ 15.67) и μ_2 (≥ 9.9), по своим характеристикам близок к палеозойскому верхнекоровому резервуару, согласно модели Зартмана–Доу (фиг. 12). Черные сланцы по своим свинцово-изотопным характеристикам существенно отличаются от предполагаемого источника. Поле этих пород на обеих Pb-диаграммах лежит в стороне (правее) от тренда точек галенита из рудных образований (фиг. 12), что позволяет исключить их из дальнейшего обсуждения.

В пределах тектонической зоны Главного Кавказского хребта широко распространены выходы гранитных и метаморфических пород палеозойского возраста, которые, по мнению ряда исследователей (Леонов и др., 2007), относятся к кристаллическому фундаменту эпигерцинской Скифской плиты. По геофизическим данным, в районе месторождения Радужное под чехлом из вулканических и осадочных комплексов юры палеозойские образования слагают верхнюю кору и имеют среднюю мощность около 30 км (Шемпелев и др., 2005), что позволяет рассматривать их в качестве

потенциального источника рудного свинца. Для оценки роли этого резервуара в генезисе Au-сульфидной минерализации, на Pb-диаграммы (фиг. 12) были вынесены ранее полученные нами данные об изотопном составе свинца в палеозойских гранитоидах и метаморфических сланцах зоны Главного Кавказского хребта (Лебедев и др., 2010, 2018), скорректированные на возраст 167 млн лет назад. На диаграммах отвечающие им точки демонстрируют существенный разброс, что свидетельствует о неоднородности пород кристаллического фундамента по изотопному составу Pb, а также по Th/U и, в меньшей степени, по U/Pb отношению (фиг. 12). На диаграмме с ураногенными изотопами Pb (фиг. 12) поле палеозойских пород вытянуто вдоль верхнекоревой эволюционной кривой модели Зартмана-Доу и расположено на верхнем продолжении тренда изотопного состава Pb галенита золоторудной минерализации. На диаграмме в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ точки палеозойских пород образуют широкое поле между эволюционными кривыми Стейси-Крамерса с параметрами $\omega_2 = 36.84$ при Th/U = 3.78 и $\omega_2 = 42$ при Th/U = 4.31. В пределах этого поля также находятся все точки галенита, а также большая часть точек вулканитов хуламского комплекса и черных сланцев. Таким образом, наблюдаемое на графиках соотношение изотопного состава Pb руд и пород палеозойского фундамента дает основание рассматривать последние в качестве ведущего источника свинца на месторождении Радужное.

В пользу такого вывода также свидетельствуют отмеченные выше характеристики источника рудного свинца — высокие $\mu_2 \geq 10$, $\omega_2 \geq 41$ и Th/U ≥ 4.1 , а также более древние, чем возраст месторождения, Pb—Pb модельные датировки. Эти особенности характерны для континентальной коры, претерпевшей метаморфическое преобразование, а также частичное плавление, сопровождавшееся генерацией гранитоидных расплавов. В результате этих процессов в коре происходит повышение Th/U и Th/Pb отношений и снижение U/Pb отношения (Taylor, McLennan, 1985). Понижением U/Pb отношения в коре незадолго до развития рудообразующих процессов объясняются позднепалеозойские модельные Pb—Pb возраста, полученные для данного источника свинца.

Другой, второстепенный по своему значению источник рудного Pb обладал относительно низкими величинами отношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (≤ 15.60) и параметра μ_2 (≤ 9.7). Ближе всего к этому источнику по указанным характеристикам соответствуют вулканиты хуламского комплекса. Кроме того, как отмечено выше, на обеих диаграммах отвечающие им поля лежат на нижнем продолжении тренда рудного свинца. В совокупности отмеченные особенности соотношения изотопного состава Pb руд и вулканитов позволяют заклю-

чить, что при формировании золоторудной минерализации и магматических расплавов хуламского комплекса мог принимать участие один и тот же источник свинца.

Наблюдаемый повышенный разброс точек вдоль тренда смешения на Pb-изотопных диаграммах (фиг. 12), прежде всего, является следствием первичной свинцово-изотопной неоднородности пород кристаллического фундамента и, в меньшей степени, вулканитов хуламского комплекса, рассматриваемых в качестве двух основных источников рудного свинца. Такое объяснение не предполагает поступление свинца из других дополнительных резервуаров.

Геохимические данные согласуются с результатами Pb-изотопных исследований: из табл. 7 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 хуламского комплекса.

Роль среднеюрского вулканизма хуламского комплекса в генезисе золоторудной минерализации

Как показано выше, во многих случаях в пределах Безенгийского рудного района Au-сульфидная минерализация наложена непосредственно на кислые породы субвулканических тел хуламского комплекса (как на риолиты, так и на трахиты) и образовалась или синхронно, или сразу после окончания эндогенной активности в регионе. Нередко оруденение локализовано именно в контактовых зонах интрузий, что может указывать, по крайней мере, на парагенетические связи процессов формирования Au-сульфидной минерализации с вулканической деятельностью. Наконец, полученные нами и детально рассмотренные изотопно-геохимические данные демонстрируют, что рудный свинец на месторождении Радужное имеет смешанное происхождение (фиг. 12). При этом не исключено единство источника Pb для магматических пород хуламского комплекса и руд, что позволяет с большой долей уверенности говорить именно о синхронности образования Au-сульфидной минерализации с проявлениями среднеюрского магматизма хуламского комплекса (около 167 млн лет назад).

Как показано нами (Кайгородова, Лебедев, 2022), по своим петролого-геохимическим характеристикам магматические породы (как кислые, так и основные разности) хуламского комплекса близки к типичным внутриплитным континентальным образованиям. Концентрации в них большинства рудных элементов (Ni, Co, Cr, V, Mo, W,

Таблица 7. Содержания основных рудных элементов в геохимических резервуарах на месторождении Радужное и кларки для пород соответствующего состава (согласно Соловов и др., 1990)

Геохимический резервуар	Au, ppm	Ag, ppm	Pb, ppm	Zn, ppm	Cu, ppm
Хуламский комплекс (J ₂), кислые породы	0.4–1.7 (n = 12)	0.3–8.9 (n = 16)	1– 60 (n = 17)	17– 93 (n = 18)	2–22 (n = 17)
<i>Кларк</i>	0.004	0.05	20	60	20
Хуламский комплекс (J ₂), умеренно-кислые породы	0.3–0.5 (n = 3)	1.4–3.5 (n = 4)	2–8 (n = 4)	18– 117 (n = 5)	5–30 (n = 4)
<i>Кларк</i>	0.003	0.1	10	72	55
Хуламский комплекс (J ₂), основные породы	0.1 (n = 1)	0.4–1.3 (n = 4)	3–10 (n = 8)	68–82 (n = 8)	33–75 (n = 8)
<i>Кларк</i>	0.004	0.1	8	110	100
Черные сланцы (J ₂)	<0.001 (n = 5)	0.01–0.03 (n = 5)	17–25 (n = 5)	125–157 (n = 5)	29–35 (n = 5)
<i>Кларк</i>	0.001	0.1	20	90	60
Граниты PZ	<0.001*	0.01–0.03 (n = 6)	8– 46 (n = 11)	20– 90 (n = 11)	2–11 (n = 11)
<i>Кларк</i>	0.004	0.05	20	60	20
Метаморфические сланцы и гнейсы PZ	<0.001*	0.06 (n = 1)	11–55 (n = 4)	40– 170 (n = 4)	11– 81 (n = 4)
<i>Кларк</i>	0.004	0.05	20	100	43

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

* Содержания Au в породах палеозойского фундамента приведены по литературным данным (Стативкин, Стативкина, 1976ф и др.).

Sn, Sb, Zn, Cd) находятся на уровне кларковых значений (Соловов и др., 1990). Исключение составляют Ag и Au (табл. 7), содержание которых существенно (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) превышает кларки для пород соответствующего состава. Это позволяет нам рассматривать магматизм хуламского комплекса в качестве рудоносного. Роль черных сланцев в образовании месторождения спорна, поскольку, по результатам изучения вмещающих черных сланцев, которые могли быть потенциальным источником Au, содержания этого элемента в них оказались ниже предела обнаружения метода ICP-MS (0.001 ppm). Однако вопрос о роли черных сланцев в образовании месторождения требует дальнейшего исследования.

Из табл. 7 видно, что наиболее вероятным потенциальным источником Cu в сульфидной минерализации месторождения Радужное, аналогично

ситуации со свинцом, могли являться палеозойские образования, в первую очередь – кристаллические сланцы. В свою очередь, 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.

Кристаллизационная дифференциация (FC), игравшая ведущую роль в петрогенезисе пород хуламского вулcano-плутонического комплекса (Кайгородова, Лебедев, 2022), привела к заметному обогащению некоторыми несовместимыми REE элементами кислых вулканитов (Zr – до 2600 г/т, Nb – до 300 г/т, Ta – 30 г/т, Ce – до 400 г/т). Таким образом, FC-процессы, приведшие к формированию бимодальной ассоциации хуламского вулcano-плутонического комплекса, определили REE-

редкометалльную (Zr, Nb, Ta) специализацию трахитов и риолитов.

Проведенный анализ петролого-геохимических характеристик изученных изверженных пород, в связи с предполагавшейся ранее некоторыми исследователями (Калинин и др., 1979ф, Коптюх и др., 1985ф и др.) генетической связью Au-оруденения на месторождении Радужное с магматической активностью хуламского вулcano-плутонического комплекса, подтверждает, что данный комплекс должен рассматриваться как рудоносный. Можно предположить, что кислые магмы, вероятно, были значительно обогащены летучими компонентами (о чем, в том числе, говорят масштабные автoмoрфические преобразования риолитов), инициировав значительную гидротермальную активность в пределах ареала вулканической деятельности. На это указывает пространственная и структурная связь оруденения с магматическими образованиями хуламского комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Минеральный состав руд (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды), связь месторождения с бимодальным континентальным постколлизийным магматизмом и низкая пробность самородного золота (419–670‰) свидетельствуют о том, что месторождение Радужное может быть отнесено к E-подтипу (по Wang et al., 2019) эпитермальных промежуточно-сульфидизированных (intermediate-sulfidation) месторождений, согласно классификации Sillitoe R.H. и Hedenquist J.W. (Sillitoe, Hedenquist, 2003). С учетом совокупности имеющихся в нашем распоряжении геологических, изотопно-геохимических и петролого-геохимических данных мы предполагаем, что месторождение образовалось в средней юре одновременно с проявлением умеренно-щелочного магматизма хуламского комплекса (~167 млн лет).

Результаты изучения изотопного состава Pb в галенитах из Au-сульфидной минерализации месторождения Радужное свидетельствуют о смешанном происхождении этого компонента в рудах. Основным источником свинца являлись палеозойские гранитоиды и метаморфические комплексы, слагающие в регионе верхнюю кору и в целом характеризующиеся повышенным содержанием этого элемента. Извлечение Pb из верхнекоровых толщ, скорее всего, происходило в связи с воздействием на них гидротермальных растворов в период развития среднеюрского магматизма повышенной щелочности (хуламский комплекс). Другим источником рудного свинца, имевшим второстепенное значение, являлись собственно гидротермальные

растворы, продуцированные магматизмом хуламского комплекса, о чем свидетельствует наличие линейного тренда смешения, образованного всеми точками изученных галенитов. Конечные составы этого тренда находятся в областях пород палеозойского фундамента и вулканитов хуламского комплекса. Петролого-геохимические характеристики пород хуламского комплекса, рассмотренные в статье (Кайгородова, Лебедев, 2022), позволяют предположить, что этот (магматогенный) источник свинца, принявший определенное участие в генезисе как вулканических пород, так и руд месторождения Радужное, имеет глубинную природу и был представлен обогащенной мантией с геохимическими параметрами, близкими к типу E-MORB.

В связи с тем, что для магматических образований хуламского комплекса (как основных, так и кислых) характерны повышенные концентрации Ag и Au, превышающие кларковые значения на порядок, можно предположить, что источником этих элементов в рудах Безенгийского района являются гидротермальные растворы, продуцированные среднеюрским магматизмом повышенной щелочности. Для подтверждения этой гипотезы необходимо провести дальнейшие исследования, включающие изучение изотопного состава Ag в сульфидах и породах хуламского комплекса.

Низкие концентрации Cu и Zn в кислых породах хуламского комплекса свидетельствуют о том, что гидротермальные растворы, связанные со среднеюрским магматизмом, вряд ли являлись основным источником халькофильных элементов в рудах Au-сульфидного месторождения Радужное. Скорее всего, они были заимствованы из вмещающих оруденение терригенных юрских толщ или метаморфических пород и гранитоидов палеозойского фундамента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность главному геологу ОАО “КБГРЭ” А.Ф. Барановскому и геологу В.П. Давиденко за помощь в проведении полевых работ, а также к.г.-м.н. Н.Г. Любимцевой за помощь в изучении минералогии месторождения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 “Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безносоев Н.В., Буриштар М.С., Вахрамеев В.А., Крымгольц Г.Я., Кутузова В.В., Ростовцев К.О., Снегирева О.В.* Объяснительная записка к стратиграфической схеме юрских отложений Северного Кавказа // М.: Недра, 1973. 194 с.
- Борсук А.М., Цветков А.А., Лезин С.И.* Пропилитизированные породы Горной Балкарии (Северный Кавказ) и связанная с ними рудная минерализация // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1977. № 11. С. 37–52.
- Гаврилов Ю.О.* Динамика формирования юрского терригенного комплекса Большого Кавказа: седиментология, геохимия, постседиментационные преобразования. М.: ГЕОС, 2005. 302 с.
- Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А.* Основные породы среднеюрского задугового дайкового пояса Большого Кавказа (геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация) // Геология и геофизика Юга России. 2018. № 2. С. 16–29.
- Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А.* Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минералогия // Геология и геофизика Юга России. 2019. Т. 9. № 3. С. 48–62.
- Гантумур Х., Батулзий Д., Лхамсурэн Ж.* Геологическая характеристика и рудоформирующие растворы серебро-свинцово-цинкового месторождения Цав в Северо-Восточной Монголии // Изв. СО Секции наук о Земле РАЕН. 2010. Т. 36. № 1. С. 12–22.
- ГИС-атлас (пакет оперативной геологической информации). Северо-Кавказский Федеральный округ. МПР РФ, Федеральное Агентство по недропользованию, ВСЕГЕИ. 2020. <http://atlaspacket.vsegei.ru>.
- Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Гольцман Ю.В., Олейникова Т.И., Гурбанова О.А.* Палеогеодинамические реконструкции и минералогия раннеюрского базальт-гипербазитового фиагдонского комплекса (Республика Северная Осетия – Алания, Кавказ, РФ) по петрохимическим, геохимическим и изотопным данным // Геология и геофизика Юга России. 2017. № 4. С. 22–38.
- Долгих А.Г.* Мезокайнозойский магматизм Северного Кавказа // Матер. докладов II регионального петрографического совещания по Кавказу, Крыму и Кавказу. Тбилиси, 1978. С. 173–179.
- 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 // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 36–44. <https://doi.org/10.31857/S2686739721010096>
- Кайгородова Е.Н., Лебедев В.А.* Возраст, петролого-геохимические характеристики и происхождение магматических пород среднеюрского хуламского вулканоплутонического комплекса (Северный Кавказ) // Вулканология и сейсмология. № 2. 2022. С. 1–28.
- Корольков А.Т.* Геодинамика золоторудных районов юга Восточной Сибири // Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. 251 с.
- Лебедев А.П.* Юрская вулканогенная формация Центрального Кавказа // Труды ИГН АН СССР. Вып. 113. 1950. 174 с.
- Лебедев В.А., Чугаев А.В., Вашакидзе Г.Т., Парфенов А.В.* Этапы формирования и источники рудного вещества Девдоракского медного месторождения (Казбекский вулканический центр, Большой Кавказ) // Геология руд. месторождений. Т. 58. № 6. 2016. С. 522–543.
- Лебедев В.А., Чугаев А.В., Парфенов А.В.* Возраст и генезис золото-сульфидной минерализации на Танадонском месторождении (Большой Кавказ, Республика Северная Осетия – Алания) // Геология руд. месторождений. 2018. Т. 60. № 4. С. 371–391.
- Лебедев В.А., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д.* Геохронология извержений и источник и вещества материнских магм вулкана Эльбрус (Большой Кавказ): результаты К–Аг и Sr–Nd–Pb изотопных исследований // Геохимия. 2010. № 1. С. 45–73.
- Леонов Ю.Г., Демина Л.И., Копт М.Л., Короновский Н.В., Леонов М.Г., Ломизе М.Г., Панов Д.И., Сомин М.Л., Тучкова М.И.* Большой Кавказ в Альпийскую эпоху. М.: ГЕОС, 2007. 368 с.
- Метасоматизм и метасоматические породы. Москва, Научный мир, 1998. 492 с.
- Наумов Е.А.* Типы золото-ртутной минерализации Алтае-Саянской складчатой области и физико-химические условия их образования. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2007. 21 с.
- Письменный А.Н., Терещенко В.В., Перфильев В.А.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Листы К-38-VIII, XIV (Советское). С.-Петербург, ВСЕГЕИ, 2002. 142 с.
- Рябов Г.В., Богущ И.А.* Типизация колчеданных месторождений Северного Кавказа // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. №5. 2012. С. 88–91.
- Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А., Воробьев С.А., Гериман Д.М., Григорян С.В., Квятковский Е.М., Матвеев А.А., Миляев С.А., Николаев В.А. Перельман А.И., Шваров Ю.В., Юфа Б.Я., Ярошевский А.А.* Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора: ее состав и эволюция: М.: Мир, 1988. 384 с.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Шатагин К.Н.* Высокоточный изотопный анализ Рb методом многоколлекторной ICP-масс-спектрометрии с нормированием по $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$: оптимизация и калибровка метода для изучения вариаций изотопного состава Рb // Геохимия. 2007. № 11. С. 1155–1168.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Прокопьев А.В.* Изотопный состав свинца и источники металлов в месторождениях золота и серебра Южного Верхоянья (Якутия, Россия): по данным высокоточного MS-ICP-MS метода // Геология руд. месторожде-

ний. 2018. Т. 60. № 5. С. 448–471.

<https://doi.org/10.1134/S0016777018050039>

Чугаев А.В., Чернышев И.В., Лебедев В.А., Еремина А.В. Изотопный состав свинца и происхождение четвертичных лав вулкана Эльбрус, Большой Кавказ: данные высокоточного метода MS-ICP-MS // Петрология. 2013а. Т. 21. № 1. С. 20–33.

Чугаев А.В., Чернышев И.В., Бортников Н.С., Коваленкер В.А., Киселева Г.Д., Прокофьев В.Ю. Изотопно-свинцовые рудные провинции Восточного Забайкалья и их связь со структурами региона (по данным высокоточного MS-ICP-MS-изучения изотопного состава Pb) // Геология руд. месторождений. 2013б. Т. 55. № 4. С. 282–294.

Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Дубинина Е.О., Сада-сюк А.С., Гареев Б.И., Коссова С.А., Баталин Г.А. Коровый источник Pb и S на золото-порфировом месторождении Юбилейное (Южный Урал, Казахстан): высокоточные Pb–Pb и $\delta^{34}\text{S}$ данные // Геология руд. месторождений. 2021. Т. 63. № 3. С. 195–206.

Шарпенко Л.Н., Кухаренко Е.А., Костин А.Е. Эндогенные рудоносные брекчиевые образования. Методические рекомендации по выявлению эндогенных брекчиевых образований различных генетических типов и оценке их потенциальной рудоносности применительно к задачам Госгеолкарт. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ, 2018. 104 с.

Шемпелев А.Г., Пьянков В.Я., Лыгин В.А., Кухмазов С.У., Морозова А.Г. Результаты геофизических исследований вдоль Приэльбрусского профиля (вулкан Эльбрус – Кавказские Минеральные Воды) // Региональная геология и металлогения. 2005. № 25. С. 178–185.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the alkali-silica diagram // J. Petrol. 1986. V. 27. P. 745–750.

Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moelo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. The tetrahedrite group: Nomenclature and classification // Amer. Miner.: J. Earth and Planetary Materials. 2020. V. 105. № 1. P. 109–122.

Chudnenko K.V., Palyanova G.A. Thermodynamic modeling of native formation of Au–Ag–Cu–Hg solid solutions // Applied Geochemistry. 2016. V. 66. P. 88–100.

Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.-X. The ICS International Chronostratigraphic Chart // Episodes. 2013. V. 36. P. 199–204. (updated in 2020).

Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzales-Urrien E. Exploration for epithermal gold deposits // Rev. Econ. Geol. 2000. V. 13. P. 245–277.

Nie F.J., Li Q.F., Liu C.H., Ding C.W. Geology and origin of Ag–Pb–Zn deposits occurring in the Ulaan–Jiawula metallogenic province, northeast Asia // J. Asian Earth Sci. 2015. V. 97. P. 424–441.

Pearce J.A. A user's guide to basalt discrimination diagrams. Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada. Short Course, Notes 12. 1996. P. 79–113.

Sack R.O., Loucks R.R. Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantite: constraints on the interdependence of

the $\text{Ag} \leftrightarrow \text{Cu}$, $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Zn}$, $\text{Cu} \leftrightarrow \text{Fe}$, and $\text{As} \leftrightarrow \text{Sb}$ exchange reactions // Amer. Mineral. 1985. V. 70. № 11–12. P. 1270–1289.

Sack R.O., Ebel D.S. As–Sb exchange energies in tetrahedrite-tennantite fahlores and bournonite-seligmannite solid solutions // Mineral. Mag. 1993. V. 57. P. 635–642.

Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between volcanotectonic settings, ore–fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // Society of Economic Geologists. Special publication. 2003. V. 10. P. 1–29.

Somin M.L. Pre-Jurassic Basement of the Greater Caucasus: Brief Overview // Turkish Journal of Earth Sciences. 2011. V. 20. P. 545–610.

Stacey J.S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. V. 26. P. 207–221.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell. Oxford. 1985. P. 1–312

Wang L., Qin K.-Z., Song G.-X., Li G.-M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification // Ore Geol. Rev. 2019. V. 107. P. 434–456.

Zartman R.E., Doe B.R. Plumbotectonics – the model // Tectonophysics. 1981. V. 75. P. 135–162.

[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90213-4)

СПИСОК ФОНДОВОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Барановский А.Ф., Белуженко Е.В. Поисковые работы на рудное золото на флангах Левобережного рудного поля (Кабардино-Балкарская республика) // Нальчик, 2014. 207 с.

Горохов В.А., Забелов Н.Ф., Шилкин В.Н. Отчет о результатах работ по изучению перспектив редкометалльности (бериллиенности) вулканогенных образований мезозоя в междуречье Чегема – Черка Балкарского за 1967 год // Эссендуки, 1968. 192 с.

Григорчук Г.Ю., Крыжевнич С.С., Мусихин В.П., Поздеев К.М., Секерина С.С., Скакун Л.З., Украинцев И.И. Перспективная оценка золото-серебряных рудопроявлений на Безенгийском рудном поле на основе изучения геологических и физико-химических условий минерализации. Промежуточный отчет по работам 1978–1979 гг. // Львов, 1980. 232 с.

Давиденко В.П., Гагиев Р.Н. Отчет о поисково-оценочных работах на Безенгийском участке диабазовых порфиров за 1988–1989 гг. // Нальчик, 1993. 59 с.

Калинин Л.С., Разумеев В.И., Борисенко А.А., Аксаментов Е.В., Дарчиева А.Е., Елеков А.Л., Мезенина Т.Н. Отчет партии № 4 о результатах поисково-оценочных работ на Радужном участке и поисковых геохимических и геофизических работ на флангах Безенгийского рудного поля на коренное золото за 1976–1979 гг. // Нальчик, 1979. 176 с.

Качурин В.Ф., Платков В.А., Морозов В.В., Борисенко А.Ю., Архипов Б.К., Сютин В.П., Ураков А.М., Рабаданов Б.Г., Цой И.Г., Давыдкина Н.И. Результаты геолого-прогнозных и поисковых работ в Безенгийском рудном

поле и на его обрамлении // *Ессентуки: Кольцовгеология*, 1991. 219с.

Коптюх Ю.М., Семенюк Н.П., Веремеенко Л.И., Кулибаба В.М. Отчет по хоздоговору №3/82 “Изучение вулканизма и связи с ним процессов метасоматоза и оруденения в зонах активизации Кабардино-Балкарии” // Киев, 1985. 119 с.

Кряжев С.Г., Двуреченская С.С. Минералого-петрографические исследования вулканогенно-терригенных и метасоматических комплексов пород на флангах Левобережного рудного поля (Кабардино-Балкарская республика) // ФГУП ЦНИГРИ. Москва, 2014. 95 с.

Курбанов М.М., Зайцев В.Е., Доля В.С. Отчет о результатах работ по объекту “Поисковые работы в пределах Безенгийского рудного поля” в 2002–2004 гг. // *Ессентуки*, 2004. 130с.

Лезин С.И., Стативкин Э.В. Селиверстов В.В., Мамедов А.И., Френкель К.Ш. Отчет о поисковых работах на золото-серебряное и полиметаллическое оруденение на Радужном (Хуламском) участке за 1975–1976 гг. // *Нальчик*, 1976. 156 с.

Платков В.А., Мышенков С.В., Рогулин Ф.И. Разведка Первой рудной зоны месторождения Радужное на золото, серебро // *Ессентуки*, 1991. 125 с.

Спаский Н.В., Аксаментов Е.В. Отчет о результатах общих поисков золото-серебряного оруденения в междуречье Черек Безенгийский – Псыгансу в 1978–1982 гг. // *Нальчик*, 1982. 156 с.

Стативкин Э.В., Стативкина А.А. Справочные материалы по перспективам золотоносности территории КБАССР // *Нальчик*, 1976. 92 с.