

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ»
(ФГБУ «ЦНИГРИ»)

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ
МОЛОДЕЖНОЙ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
РУДНАЯ ШКОЛА ЦНИГРИ 2026

«Минерально-сырьевая база алмазов, благородных
и цветных металлов – от прогноза к добыче»

Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»
11–13 февраля 2026 г.

Москва
ЦНИГРИ
2026

УДК 553.41/82.04 (054)
ISBN 978-5-85657-067-9

Рудная школа ЦНИГРИ 2026. Сборник тезисов докладов молодежной научно-образовательной конференции (11–13 февраля 2026 г., Москва, ЦНИГРИ). – М. : ЦНИГРИ, 2026. – 133 с.

В сборник включены 46 тезисов докладов, представленных на Рудной школе ЦНИГРИ 2026 «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». Цель школы – развитие научного и творческого потенциала молодых ученых и специалистов в области геологии, формирование кадров научно-прикладного направления. В тезисах докладов представлены материалы по следующим темам: металлогения, минерагения и рудогенез; прогноз, поиски, оценка и разведка месторождений полезных ископаемых; разработка прогнозно-поисковых и геолого-генетических моделей месторождений твердых полезных ископаемых; методы изучения вещественного состава пород и руд; физико-химические условия минералообразования; геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых и участков недр; использование геоинформационных технологий и пространственных данных в геологической отрасли; современные технологии добычи и переработки минерального сырья. Материалы школы ориентированы на молодых ученых и специалистов по различным направлениям наук о Земле.

Научно-техническое издание

Тезисы докладов публикуются в авторской редакции

Сдано в набор 16.02.2026. Подписано в печать 28.02.2026
Печать цифровая. Тираж 50 экз.

Полиграфическая база ФГБУ «ЦНИГРИ»:
117545, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1

СООТНОШЕНИЕ ОКСИДНЫХ И СУЛЬФИДНЫХ Pb-Zn-Ag РУД СТРАТИФОРМНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОУСАЙНГ, РЕСПУБЛИКА СОЮЗ МЬЯНМА

Сереброносное свинцово-цинковое месторождение Боусайнг в Мьянме (тип Миссисипи – MVT) представляет собой классический пример стратиформного карстового объекта. Оруденение локализовано в карбонатных породах ордовикской группы Вунбей, где выделяются три главные рудоносные пачки доломитизированных известняков, подстилаемых глинистыми флюидоупорами. Месторождение разбито молодым меридиональным сбросом на Западный опущенный и Восточный поднятый блоки, что определило рельеф и разные типы руд. В Восточном блоке с расчлененным горным рельефом добываются первичные сульфидные галенит-сфалеритовые руды. В Западном блоке, характеризующемся сглаженным карстовым рельефом, развита мощная зона гипергенеза с богатыми вторичными церусситовыми рудами. Формирование этой зоны обусловлено комплексом факторов: влажным тропическим климатом, обеспечившим активное окисление; карстовым рельефом и тектоническими структурами, создавшими условия для интенсивного дренажа; карбонатным составом вмещающих пород, нейтрализующих кислые растворы и способствующих осаждению церуссита. Разная геохимическая подвижность элементов привела к четкому разделению свинца (концентрация в зоне) и цинка (вынос), объясняя отсутствие цинковых карбонатов.

Ключевые слова: Pb-Zn-Ag месторождение Боусайнг, Мьянма, оксидные руды, сульфидные руды, церуссит.

Месторождение сереброносных свинцово-цинковых руд Боусайнг (тип Миссисипи – MVT) находится в 22 км к северу от г. Хехо на плато Шан в одноименном штате Мьянмы. Месторождение располагается в западной части Шанского нагорья, сложенного осадочными толщами палеозоя (рис. 1), и включает стратиформные залежи первичных сульфидных и вторичных англезит-церусситовых руд.

Месторождение представлено кулисообразно залегающими стратиформными рудными залежами меридионального и северо-западного простирания со средними и пологими углами падения на восток и северо-восток [4]. На востоке месторождения три рудных тела сложены массивными и прожилково-вкрапленными сульфидными рудами сереброносного галенита и сфалерита с примесью халькопирита и барита. На западе более распространены англезит-церусситовые рудные тела из зоны окисления сульфидных руд, слагающие рудоносную зону протяженностью более 15 км.

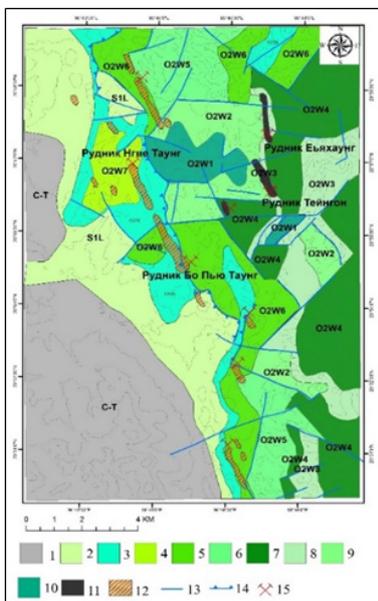


Рис. 1. Геологическая схема месторождения Боусайнг [4]:

1 – известняковое плато, сложенное породами от каменноугольного до триасового возраста, доломиты и известняки (С–Т); 2 – формация Линве, нижний силур, известняки, аргиллиты и сланцы (S₁L); 3 – формация Нан-Он, верхний ордовик, алевролиты, аргиллиты и глинистые известняки (O₃N); 4–10 – пачки рудоносной формации Вунбей ниже- и средне-ордовикского возраста (O₁–O₂): 4 – окисленные известняки (O₂W₁), 5 – известняки и доломитистые известняки (O₂W₆), 6 – известняки и доломиты (O₂W₅), 7 – известняки и доломитистые известняки с прослоями желтых аргиллитов (O₂W₄), 8 – алевролиты (O₂W₃), 9 – доломитистые известняки (O₂W₂), 10 – известняки с примесью доломитов (O₂W₁); 11 – первично-сульфидная Pb-Zn-Ag рудная зона; 12 – оксидная рудная зона; 13 – мелкие разломы; 14 – взбросы и надвиги; 15 – рудники

Рудоносная толща мощностью 936 м ниже-среднеордовикского возраста группы Вунбей сложена пачками известняков и доломитов и разделяющими их карбонатно-глинистыми породами [2, 3]. Она подстилается толщей алевролитов с прослоями аргиллитов и мергелей формации Лок-Пьин, залегающей на верхнекембрийских сланцах и песчаниках группы Молохейн. Группа Вунбей согласно перекрыта пачками аргиллитов и известняков верхнего ордовика формации Нан-Он и вышележащими граптолитовыми сланцами и известняками силура формации Линве. Эти толщи несогласно перекрыты карбонатными породами верхнекаменноугольно-пермского возраста, слагающими известняковое плато на западе месторождения.

В рудоносной толще Вунбей выделено 7 пачек, которые сложены целиком известняками и доломитами или включают аргиллитовые серии. Главными рудоносными пачками оказались карбонатные (снизу вверх): вторая мощностью 100 м, четвертая – 200 м и шестая – 269 м. В каждой из них есть доломитизированные известняки. Характерно, что рудоносные уровни локализованы в верхних частях пачек, расположенных под глинистыми породами. Для нижней рудоносной пачки (O_2W_2) характерна ассоциация галенита с кальцитом, для средней (O_2W_4) и верхней (O_2W_6) пачек – галенита с баритом. В целом рудоносные ордовикские породы Вунбей и Нан-Он объединены в группу Пиндайя. Значительная минерализация барита с церусситом и небольшим количеством галенита локализована в верхней пачке формации Вунбей и в формации Нан-Он верхнего ордовика. Минерализация барита отмечена и в формации Линве силурийского возраста.

Таким образом, три главные рудоносные пачки формации Вунбей представляются относительно проницаемыми горизонтами доломитизированных известняков, разделенными существенно глинистыми флюидоупорами.

Район месторождения Боусайнг находится на западе плато Шан в одноименном хребте и сложен палеозойскими осадочными породами. Антиклинорная меридиональная структура хребта Боусайнг чрезвычайно сложна; на севере уже, чем на юге. Северная часть характеризуется более сложной структурой с опрокинутыми складками. В районе широко распространены сдвиги, сбросы, взбросы и надвиги. Надвиги и сбросы имеют меридиональное простирание. Сдвиги и взбросы крутопадающие широтные и диагональные. Сбросы, как правило, молодые и смещают рудные тела. Они во многом определяют современный рельеф. Именно со сбросами связаны проявления интенсивного карста.

В центре рассматриваемого месторождения имеется изометричная антиклиналь, разделяющая его на две части. Рудоносные зоны контролируются осевыми частями линейных антиклиналей и флексур, протяженных в меридиональном и северо-западном направлениях.

На месторождении Боусайнг выделяется два блока – Западный опущенный и Восточный поднятый. Отмеченные блоки разделены молодым меридиональным и северо-западным крутопадающим сбросом с амплитудой смещения порядка 150 м.

В Западном блоке с начала 1950-х годов добывается неглубоко залегающая церусситовая руда. Местными жителями было вырыто несколько тысяч неглубоких (10–30 м) ям и коротких штолен, добыто около 20 000–30 000 тонн кускового церуссита со средним содержанием свинца около 35 %. Здесь руда находится в остаточной латеритной глине и зонах древнего карста (рудники Бо Пью Таунг – Нгве Таунг). Гипергенными рудными минералами являются церуссит, англезит, ковеллин, малахит и азурит. Текстуры руд массивные, вкрапленные и прожилковые.

В Восточном блоке из штолен добываются первичные сульфидные серебросодержащие сфалерит-галенитовые руды с содержанием свинца 58 % (рудники Тейнгон и Еньяхаунг). Здесь есть проявления новейшего карста. Руды состоят главным образом из первичного галенита. Первичные сульфидные руды сложены галенитом и сопутствующими сфалеритом, тетраэдрит-теннатитом, дигенитом, пиритом, халькопиритом и баритом. Жильными минералами являются кальцит, доломит и кварц. Текстуры руд массивные и прожилково-вкрапленные.

В Западном блоке гипергенные свинцово-карбонатные рудные зоны залегают в двух параллельных зонах северо-западного простирания. Основная линейная зона гипергенных свинцово-карбонатных руд имеет мощность 40 м, ширину 50–100 м и длину около 5 км и расположена вдоль замка антиклинали Бо Пью Таунг – Нгве Таунг. Зона гипергенеза превышает 50 м, а свинцово-карбонатные руды обычно залегают на глубине 10–40 м. Церуссит и другие вторичные

минералы выполняют жилы СЗ-ЮВ и широтного направлений. Они залегают в латеритных продуктах выветривания. На уровне ниже 31 м руда состоит из смешанных свинцово-карбонатных руд и высокоокисленных свинцово-сульфидных руд. На глубине 62 м прожилки галенита частично замещены церусситом.

Гипергенные свинцово-карбонатные руды образуют зоны над первичными сульфидными рудами. На больших глубинах появляется галенит, который становится преобладающим минералом на более глубоких уровнях. Церуссит является основным окисленным минералом свинцовой руды и сопровождается незначительными количествами англезита и оксигидрата железа. Свинцово-карбонатные прожилки группируются в виде параллельных серий с простиранием С-Ю и З-В шириной от 0,6 до 1,2 м. Мощность рудных прожилков варьирует от 3 до 21 см.

Трещиноватость и пористость первичных сульфидных свинцово-цинковых руд предопределили интенсивное окисление. При этом образуется серная кислота, которая способствует разрушению других сульфидов и карбонатных пород [1]. При окислении галенита образуется англезит, который в условиях карбонатной среды замещается церусситом. Сульфат цинка обладает большой растворимостью и легко выщелачивается грунтовыми водами. Высокая миграционная способность цинка приводит к его выносу из зоны окисления и рассеиванию. Поэтому на месторождении Боусайнг отсутствуют цинково-карбонатные руды.

Район Боусайнг расположен в тропическом климате. Температура колеблется от +8 °С в холодные месяцы до +35° С в теплое время года. С апреля по октябрь количество осадков колеблется от 23 до 246 мм. Годовое количество осадков 1119,07 мм, ежегодно здесь бывает 170 дождливых дней (46,62 % времени) [5]. Тропическое выветривание изменило состав первичных сульфидов и вмещающих пород, превратив их в красную глину, состоящую из глинистых минералов, лимонита, кварца и вторичных рудных минералов.

Важным фактором распространения окисдных руд является рельеф [1]. В условиях сглаженного рельефа окисление происходит более масштабно, чем при резко расчлененном рельефе. Район месторождения характеризуется карстовым рельефом с простыми и сложными впадинами, а также округлыми и удлиненными холмами общей высотой от 1350 до 1480 м. Западный опущенный блок представляет собой сглаженный рельеф, в то время как Восточный поднятый блок имеет резко расчлененный рельеф (рис. 2). Далее на запад преобладают понижения в рельефе и аллювиальные долины.

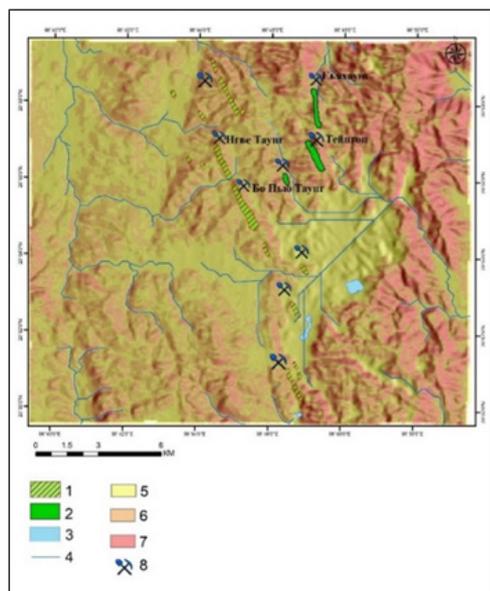


Рис. 2. Рельеф месторождения Боусайнг: 1 – руды зоны окисления; 2 – первично-сульфидные руды; 3 – озера; 4 – реки; 5 – низкие горы; 6 – средние горы; 7 – высокие горы; 8 – рудники

Формирование богатой церусситом зоны окисления является прямым следствием комплекса благоприятных геологических и климатических условий. Молодые меридиональные сбросы создали структурную ловушку с Западным опущенным блоком, занявшим промежуточное положение. Это предопределило интенсивный дренаж и проработку окислительными грунтовыми водами.

Влажный тропический климат и карстовый рельеф с хорошим дренажом обеспечили постоянный приток кислорода и поверхностных вод, необходимых для активного окисления сульфидов [1]. Карбонатный состав вмещающих пород формации Вунбей сыграл решающую роль, нейтрализуя кислые растворы и способствуя стабильности и массовому осаждению церуссита. Различная геохимическая подвижность свинца и цинка в зоне гипергенеза привела к их четкому разделению: свинец концентрируется в виде церуссита, а высокорастворимый цинк выносится из зоны окисления, что обусловило отсутствие цинково-карбонатных руд [1].

Таким образом, месторождение демонстрирует классическую модель формирования стратиформно-

го карстового месторождения, где тектоника, литология и климат контролируют локализацию мощной окисленной рудной зоны.

Финансирование работы: исследование не имело спонсорской поддержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В. М., Оникиенко Л. Д., Яковлев П. Д. Лабораторный практикум по геологии полезных ископаемых. – М. : Недра, 1992. – С. 99–105.
2. Myint Lwin Thein. The lower Paleozoic stratigraphy of western part of the Southern Shan State, Myanmar // Sec. Malaysia Bulletin. – 1973. – P. 143–163.
3. U Khin Zaw, U Aung Pwa and U Thet Aung Zan. Pb-Zn mineralization at Theingon mine, Bawsaing deposit, Southern Shan State, Myanmar. – 1984. – P. 283–306.
4. Ohn Myint. Detailed Stratigraphic and Structural Analysis of Lithostratigraphic Units in Relationship to Mineralization at Bawsaing Area, Southern Shan State / M. Sc Thesis, Arts and Science University. – Yangon, Myanmar, 1980. – P. 9–41.
5. Baw Hseng Weather In October 2020, weather and climate. – URL: <https://weatherandclimate.com/myanmar/shan/baw-hseng>.

Барова Е. В. (barova@tsnigri.ru)

ЦНИГРИ, г. Москва

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ НА КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ПРЕДЕЛАХ ЛОКТЕВСКО-РЕМОВСКОГО РУДНОГО УЗЛА (РУДНЫЙ АЛТАЙ)

Проведенное исследование показало хорошую сходимость результатов геохимических поисков в Золотушинском рудном районе с интерпретацией данных предшественников о локализации колчеданно-полиметаллической минерализации. Приведены результаты ионно-сорбционного метода и сопоставлены с анализом отчетов предшественников.

Ключевые слова: геохимия, колчеданно-полиметаллическое оруденение, свинец, цинк, Рудный Алтай.

Для укрепления национальной экономики целью геологоразведочного сектора является открытие месторождений стратегического минерального сырья, к чему относятся и цветные металлы. С начала XXI века отмечается тенденция к снижению запасов полиметаллов при заметном увеличении их добычи. В 2023 году резко возросла отработка месторождений цинка, и ее количество составило почти 700 тысяч тонн. С 2015 года запасы свинца не превышают отметку в 300 тысяч тонн, а в 2019 отработка месторождений данного металла опередила пополнение минерально-сырьевой базы (МСБ). В связи с этим свинец и цинк были отнесены к полезным ископаемым, достигнутые уровни добычи которых недостаточно обеспечены запасами. Настоящей работой автор предлагает рассмотреть результативность геохимической съемки на колчеданно-полиметаллическое оруденение.

Среди известных месторождений свинца и цинка крупные по запасам и богатые по содержанию располагаются в Красноярском крае (Горевское) и Республике Бурятия (Холоднинское, Озерное).

Рудный Алтай богат на различные полезные ископаемые. Проведение геологических работ здесь остается актуальным на протяжении более 50 лет. На учете в нераспределенном фонде стоят участки с бокситами, железными рудами, благородными и цветными металлами, облицовочными камнями (мрамор, гранит) и другими полезными ископаемыми. В настоящее время ведется добыча полиметаллических руд (Корбалихинское, Зареченское), нерудного сырья (Джиринское – гипс), угля (Мунайское) и др. Регион перспективен для дальнейшего развития МСБ, так как существуют перспективы открытия скрытых и перекрытых месторождений, и характеризуется хорошими условиями и развитой инфраструктурой, что делает проведение геологоразведки целесообразным.

Сотрудниками отдела цветных металлов ФГБУ «ЦНИГРИ» ведутся работы в Золотушинском рудном районе в рамках Государственного задания. Автором был изучен Локтевско-Ремовский рудный узел, расположенный в северо-западной части района. В его пределах Локтевское медное месторождение отрабатывалось подземным способом еще в XVIII–XIX веках. Сейчас на месте рудника находится уже недействующий строительный карьер, где в обломках отмечается малахитовый налет.

Локтевско-Ремовский рудный узел располагается на западном крыле Западно-Золотушинской антиклинали, одной из крупных структур, участвующих в строении Золотушинской вулкано-тектонической депрессии. Он характеризуется большим распространением нижней рудоносной формации базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известковисто-кремнисто-терригенной (РКТ) и меньше – верхней контрастной базальт-риолитовой кремнисто-терригенной (БР) на северо-востоке Локтевского поля. Широко развитые гранитоидные массивы относятся сразу к трем разным магматическим комплексам (Междуреченский, Устьянский и Волчихинский) и совместно с Алейским субпараллельным разломом разделяют рудный узел на два поля. При анализе работ предшественников выяснилось, что в строении полей участвуют практически одни и те же породы мельничной свиты ($D_2e\text{-}ef\ mn$), сопоставимые с породами нижней формации. Однако поля отличаются проявленным магматизмом и геологическими структурами. Локтевское рудное поле представляется синклиальной складкой, простирающейся в северо-западном направлении на северной части и в субширотном на юге и обладающей крыльями с углами падения 20–50°. Здесь также отмечаются проявления Локтевского и Междуреченского массивов: долеритовые дайки, риолитовые силлы и субвулканические палеовулканы прорывают осадочные породы. Такие позднеформированные геологические тела привели частично к образованию вулканогенно-осадочных пород на контакте с терригенными. Ремовское поле осложнено тремя близко находящимися складками с пологими крыльями. Генеральное простирание пород северо-западное. По изучению отчетов прошлых лет сделан вывод, что данное поле менее пронизано магматическими интрузиями. Этим объясняется отсутствие туфогенных пород. Вероятная палеовулканическая постройка в юго-западной части перекрыта более мощной продуктивной толщей, чем на Локтевском поле. Указанные характеристики двух рудных полей в сочетании являются поисковыми критериями для месторождений эмс-раннеживетского цикла вулканизма [4].

Ранее автором были оценены перспективы выявления колчеданно-полиметаллических месторождений в пределах исследуемого узла. По работам предшественников были проанализированы документация и выводы по горным выработкам. Вскрытая рудная минерализация поисковыми вертикальными скважинами позволяет выделить один минерализованный горизонт на Ремовском рудном поле мощностью 30 м с проекцией на поверхность площадью $2 \times 0,5\text{ км}^2$ при содержаниях металлов $Cu = 0,55\%$, $Pb = 1,35\%$, $Zn = 4,19\%$ и два – на Локтевском мощностью 10–25 м протяженностью примерно 1,2 км при $Cu = 4,66\%$, $Pb = 2,91\%$ и $Zn = 1,67\%$ [1].

Описанные зоны минерализации могут быть уточнены при условии наличия результатов поисковых методов на изучаемой территории. Сопоставление полученной информации позволит скорректировать контуры проекции и глубину залегания продуктивных горизонтов, с меньшей погрешностью оценить ресурсы полезного ископаемого, повысить результативность геологоразведочных работ.

Перед проведением любых поисков на Рудном Алтае следует учитывать мощную перекрывающую толщу четвертичных отложений, состоящую преимущественно из глин с песчаной примесью. Это затрудняет исследования и открытие новых объектов. Согласно отчетам предшественников, на Локтевско-Ремовском рудном узле она сильно варьирует в диапазоне 5–101 м, в среднем 40 м на Локтевском поле и 55 м на Ремовском [3].

В 2023 году ЦНИГРИ проводил исследования Золотушинского рудного района, в том числе геохимические съемки масштаба 1 : 50 000. Примененный ионно-сорбционный метод основывается на извлечении ионов металлов, которые сорбируются в почве. Распространенный в Алтайском крае чернозем обладает высокой емкостью катионного обмена, поэтому сначала ионно-сорбционные ореолы рассеяния образовались при гипергенных изменениях сульфидов, а после проникли в почвенно-растительный слой. Первичные ореолы глубокозалегающих руд-

ных тел и вторичные ореолы погребенных принято относить к слабым аномалиям. Однако их можно усилить путем математической обработки и мультипликации концентраций, что заметно выделяет полученные аномалии и исключает ошибки II типа. Метод зарекомендовал себя еще на экспериментальной стадии и показал эффективность в поисках слепых рудопоявлений на глубине до 350 м и перекрытых чехлом на 100–110 м [2].

Литохимическое опробование на Ремовском рудном поле показало, что аномалии геохимического поля (АГХП) мультипликативного показателя $J = Pb \times Cu \times Zn$ имеют вытянутую форму в направлении, согласно простирацию залегающих пород. Выбор элементов для получения мультипликативного показателя основан на корреляционном и факторном анализе. Также статистическая обработка геохимии указывает на преобладание цинковой составляющей, менее проявлены свинец и медь. Ожидается колчеданно-свинцово-цинковое рудопоявление. Выделены семь значимых аномалий (рисунок, Б).

Локтевское рудное поле сложнее Ремовского и по геологии, и по возможности изучения. В юго-восточной части расположено село Локоть. По этой причине значимая часть территории была исключена из поисков. Полученные аномалии мультипликативного показателя $J = Pb \times Cu \times Zn$ так же сонаправлены залегающим породам и вытянуты по форме, однако более широкие и интенсивнее проявлены по значениям. Еще одним отличием минерализации здесь является первая корреляционная группа, которая включает Cu, Zn, Cd и Ag, что говорит о более разнообразном вещественном составе месторождения. Ожидается колчеданно-полиметаллическое рудопоявление. Выделено пять значимых аномалий (рисунок, А).

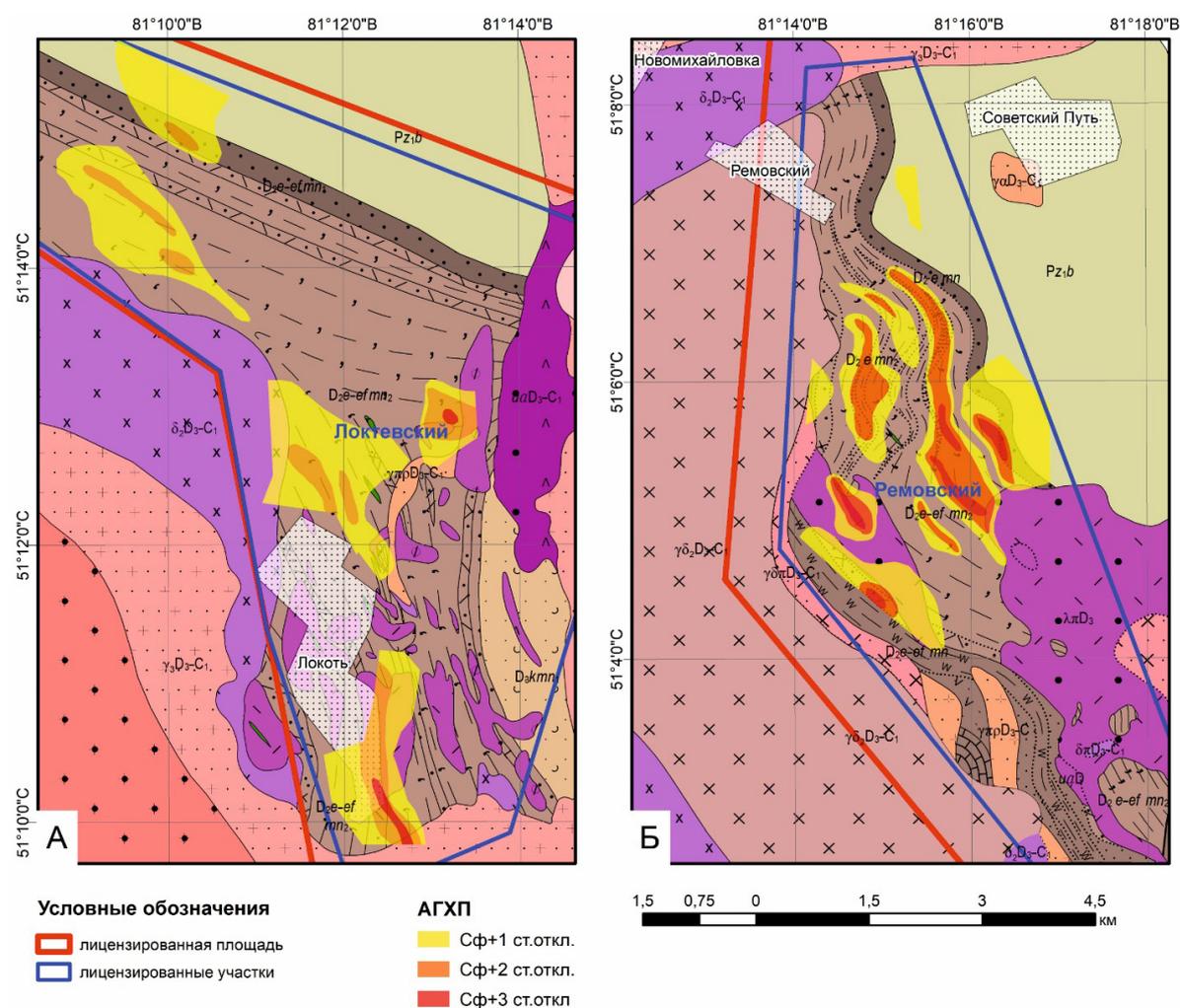


Рисунок. Литолого-фациальные карты с аномалиями геохимического поля (А – Локтевское рудное поле, Б – Ремовское рудное поле)

Интерпретация результатов литохимического опробования отлично сопоставляется с анализом данных работ прошлых лет, повышая доверие ко всем проделанным исследованиям. Таким образом, геохимические аномалии можно использовать для корректировки зон минерализации вне ранее исследованных предшественниками территорий. Для предварительной оценки прогнозных ресурсов категории P_3 они были протянуты по скважинам. Полученные данные в ходе геохимических поисков уточняют контуры минерализации как в плане, так и в разрезе. С целью опробования рудоносных уровней и выделения рудных тел планируется проведение буровых работ во время полевого сезона 2026 года, что позволит провести заверку минерализованных зон и оконтурить в их пределах рудные тела, отвечающие оценочным параметрам. И в конечном результате провести оценку прогнозных ресурсов категории P_2 .

Исследование проводилось в рамках Государственного задания № 049-00018-24-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барова Е. В. Особенности геологического строения и перспективы выявления колчеданно-полиметаллических месторождений в пределах Локтевско-Ремовского рудного узла (Рудный Алтай) // Рудная школа 2025. Сборник тезисов докладов (12–14 февраля 2025 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). – М. : ЦНИГРИ, 2025. – С. 5–7.
2. Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В. и др. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – 207 с.
3. Михайлов В. Ф., Демин В. К., Смирнов Б. А. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые северо-западной части Рудного Алтая (Листы М=44-3А,Б,В) (отчет о поисково-съёмочных работах масштаба 1 : 50 000 за 1964–1969 гг.).
4. Петухов А. А., Серавина Т. В., Кузнецов В. В. и др. Особенности геологического строения Золотушинского рудного района и перспективы расширения МСБ Рудного Алтая (Алтайский край) // Сборник тезисов докладов XIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2024. – С. 293–295.

**Волкова Е. А. (volkova@tsnigri.ru), Краснов А. Н., Шатилова Л. В.,
Еременко А. В., Лейбгам П. Н.
ЦНИГРИ, г. Москва**

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛОЩАДИ ЧЕРЕМНАЯ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Проведены минералого-геохимические исследования площади Черемная в Забайкальском крае. Выявлены признаки коренного оруденения: неокатанное самородное золото высокой пробы и характерные околорудные метасоматические изменения. Сходство изученных пород с Амазарканским месторождением указывает на высокую перспективность площади для обнаружения промышленного золотого оруденения.

Ключевые слова: золото, серебро, Забайкальский край, Бухтинско-Кедровский золоторудный узел.

Изучаемая площадь находится в Забайкальском крае, в пределах Тунгино-Олекминского и Могочинского районов, и приурочена к северо-западным отрогам Черемного хребта. В металлогеническом плане площадь располагается в Бухтинско-Кедровском золоторудном узле Итатка-Могочинской рудной зоны восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса. К этой рудной зоне приурочен ряд известных месторождений золота: Итакинское, Назарьевское, Укоинское и Амазарканское. На площади Черемная известен ряд проявлений золота, наиболее крупными из которых являются Бухтинское, Верхнечеремнинское, Дайковое, Промежуточное.

Стратифицированные образования представлены архейскими метаморфическими породами, раннеюрскими вулканокластическими образованиями (кайтунская серия) и четвертичными

ми отложениями. *Интрузивные образования* составляют более 80 % площади. Они представлены раннепротерозойским, раннепалеозойским (олекминским), триасовым (амананским) и позднеюрским (амуджиканским) комплексами. Комплексы сложены породами кислого и среднего состава низкощелочного и умереннощелочного ряда.

Согласно предшественникам [2], золотое оруденение на изучаемой площади может быть связано с интрузивами гранитоидного состава позднеюрского (амуджиканского) вулканоплутонического комплекса. С интрузивами амуджиканского комплекса связывают оруденение на ближайшем месторождении золота – Амазарканском [1]. Особенности строения этого месторождения аналогичны строению изучаемого проявления: развиты олекминский, амананский комплексы, распространены метасоматические изменения, представленные турмалинизацией, березитизацией, зонами сульфидизации, окварцевания и скарнирования. Рудовмещающими для золото-турмалинового оруденения служат кварц-турмалиновые метасоматиты. Зоны дробления в гнейсе сопровождают кварц-серицитовые метасоматиты и березиты.

С целью локализации золотого оруденения на левом борту реки Черемная был пройден профиль с шагом 20 м. Местоположение профиля выбрано по данным работ предшественников, выделивших группу Черемнинских проявлений золота [2]. Вмещающие породы представлены раннепалеозойскими биотитовыми, лейкократовыми и аляскистовыми гранитами и раннеюрскими вулканокластическими образованиями (ортотуффиты, в меньшей степени туфоконгломераты, туфопесчаники и туфоалевролиты) (рис. 1).

Полученные в полевых условиях материалы были исследованы:

- АО «РАЦ» проведен пробирно-атомно-абсорбционный и спектральный полуколичественный анализ на 26 элементов;
- ООО «ХАЦ ПЛАЗМА» проведен количественный химический анализ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на Au и 22 элемента;

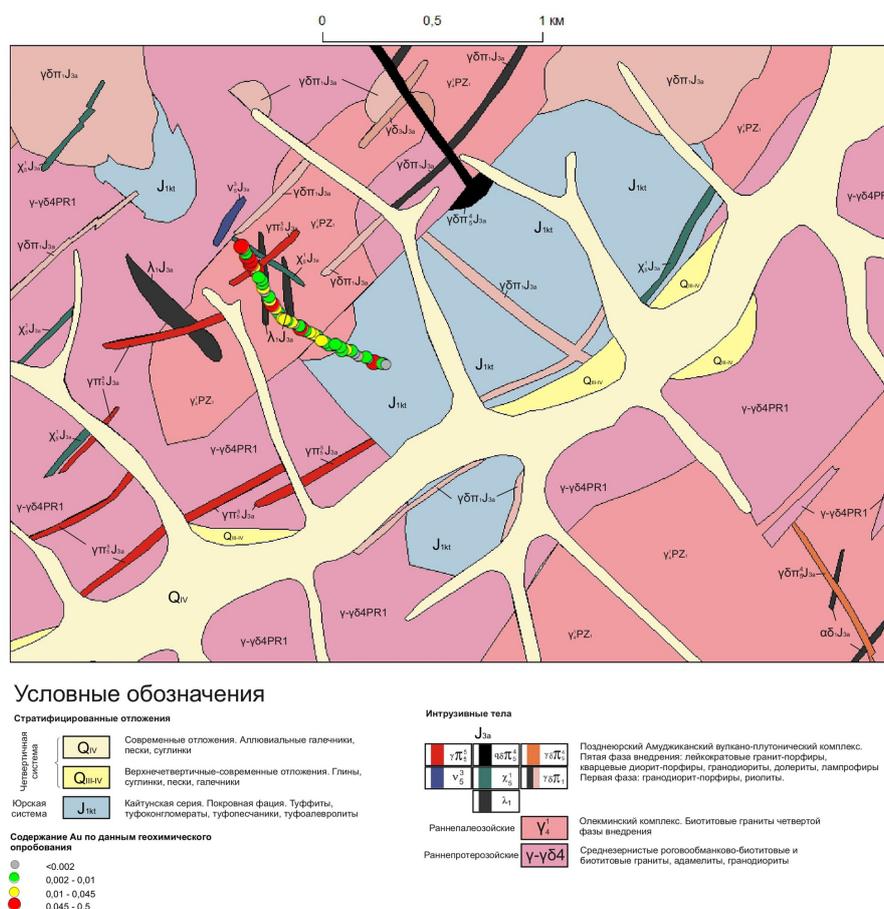


Рис. 1. Геологическая карта района работ по данным отчета предшественников с содержанием Au в изучаемом профиле [2, 3]

- методами оптической электронной спектроскопии и рентгенофазового анализа изучены породы;
- в лабораторном комплексе ЦНИГРИ проведено определение пробности золота методом сканирующей электронной микроскопии.

Грубообломочный материал представлен породами кислого состава, проявлены интенсивные метасоматические изменения. Присутствуют зоны турмалинизации (дравит), серицитизации, березитизации, пропилитизации, сульфидно-кварцевые просечки. Эти изменения сопровождаются прожилково-вкрапленной рудной минерализацией (пирит, халькопирит) и развитием оксидов и гидроксидов железа. На юго-западе от профиля встречены породы с проявленной алунитизацией.

Были изучены типоморфные особенности выделенного из шлиховых проб самородного золота по методике, описанной в работе Л. А. Николаевой с коллегами [4]. В изученных пробах было выявлено 30 знаков золота. Золото весьма мелкое, класса -0,25 мм, лишь в двух пробах встречаются выделения размером до 0,4 мм по длинной оси. На одном из двух выделений золотин крупного размера отмечены примазки кварцево-глинистого материала и включения гидроксидов железа. Преобладают выделения правильных форм (кристаллы, редко их сростки). Подчиненную роль играют неправильные, главным образом интерстициальные и гемиидиоморфные частицы. У кристаллических форм иногда отмечается округление граней, что придает выделениям слабо- и полуокатанный вид. Золото неокатанное и некорродированное. По цвету отчетливо выделяются две группы золотин: преобладают ярко- и темно-желтые, встречаются в подчиненном количестве светло-желтые частицы. Средняя пробность поверхности весьма мелких золотин варьирует от 729 до 990, с преобладанием пробности 850–950. В структуре золота отчетливо просматриваются признаки посткристаллизационных преобразований – тонкая неоднородность и (в более низкопробном золоте) начальные проявления дезинтеграции.

В рыхлых отложениях, штучных пробах, а также в тяжелой фракции шлиха (рис. 2) отмечено присутствие золота в шлихах, полученных из проб в верховьях профиля, тогда как значимые

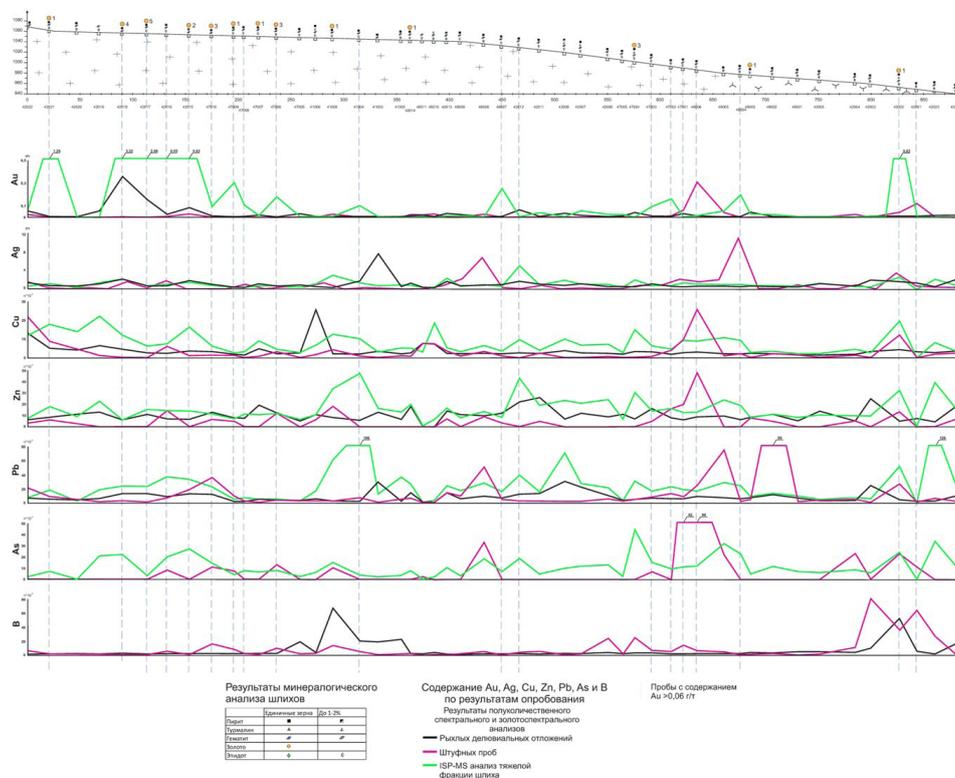


Рис. 2. Распределение минералов – индикаторов метасоматических изменений в тяжелой фракции шлиха и результатов опробования (штучного, ВОР, ICP-MS тяжелой фракции шлиха) в делювиально-пролювиальном шлейфе проявления золота Верхнечеремнинское

содержания золота по результатам ICP-MS анализа отмечаются почти по всей длине профиля. Прослеживаются устойчивая ассоциация золота с Cu, Zn, неустойчивая – с Pb, устойчивая ассоциация серебра с Pb. Турмалиновая минерализация пространственно совпадает с содержаниями золота только в верховьях профиля, в низовьях профиля такой зависимости нет.

В породах изучаемой площади активно проявлены метасоматические изменения, золото присутствует как в самородной форме, так и в составе минералов (пирит, окислы и гидроокислы железа). В шлиховых пробах отмечено золото неокатанное и некорродированное, что может свидетельствовать о близости расположения коренного источника. Полуколичественный спектральный и ICP-MS анализы показывают присутствие в пробах элементов-спутников золота и серебра, а также присутствие бора (турмалинизация). Полученные в ходе полевых и камеральных работ данные, а также сходство метасоматических изменений, проявленных на изучаемой площади и на Амазарканском месторождении, позволяют сделать вывод о потенциальной золотоносности объекта исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Б. Н., Калинин Ю. А., Боровиков А. А., Посохов В. Ф., Реутский В. Н. Амазарканское золоторудное месторождение: условия формирования, источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 56–70. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452
2. Акулов И. В. Отчет о результатах поисковых работ на рудное золото в пределах Бухтинской площади (Забайкальский край), проведенных в 2007–2011 гг. ЗАО «ЗРК «Омчак». – 2011.
3. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000. Серия Олекмо-Витимская. Листы N-51-XIII, N-50-XVIII. Объяснительная записка.
4. Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н. и др. Изучение самородного золота при геологоразведочных работах. Методические рекомендации. – М. : ЦНИГРИ, 2023. – 73 с.

Гусарова В. В.¹ (val99999@list.ru), Раткин В. В.¹ (ratkin@yandex.ru), Серов П. А.²

¹ ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток;

² ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты

ЮЖНОЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ: СТРУКТУРА И МАГМАТИЗМ (КРАСНОРЕЧЕНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, СИХОТЭ-АЛИНЬ)

Геолого-генетические особенности Sn-Ag-Pb-Zn жильного месторождения Южное. Показана связь месторождения с орогенными процессами позднего альб-сеномана, а именно, с формированием складчатости, надвигов и внедрения Березовско-Араратского комплекса. Установлен рудно-геохимический резервуар, которым является гранитно-метаморфический слой молодой континентальной коры, датирована интрузия, представляющаяся как рудоносная.

Ключевые слова: месторождение Южное, Южный Сихотэ-Алинь, Журавлевский террейн, Березовско-Араратский комплекс, полиметаллы.

Южное Sn-Ag-Pb-Zn жильное месторождение представляется в составе Краснореченского рудного района Сихотэ-Алиня как типовое производное орогенного этапа развития Сихотэ-Алинского складчатого пояса с характерной связью рудообразования с процессами складчатости и формирования позднего альб-сеноманского Березовско-Араратского монцодиорит-гранодиоритового комплекса шошонитовой серии.

Краснореченский рудный район располагается севернее Кавалеровского района, непосредственно к западу от Дальнегорского, и выступает как структурно обособленный тектонический блок – горстообразный выступ складчатого фундамента в обрамлении вулcano-тектонических впадин, выполненных палеоцен-раннеэоценовыми риолитами вулканического чехла Сихотэ-Алиня (рис. 1).

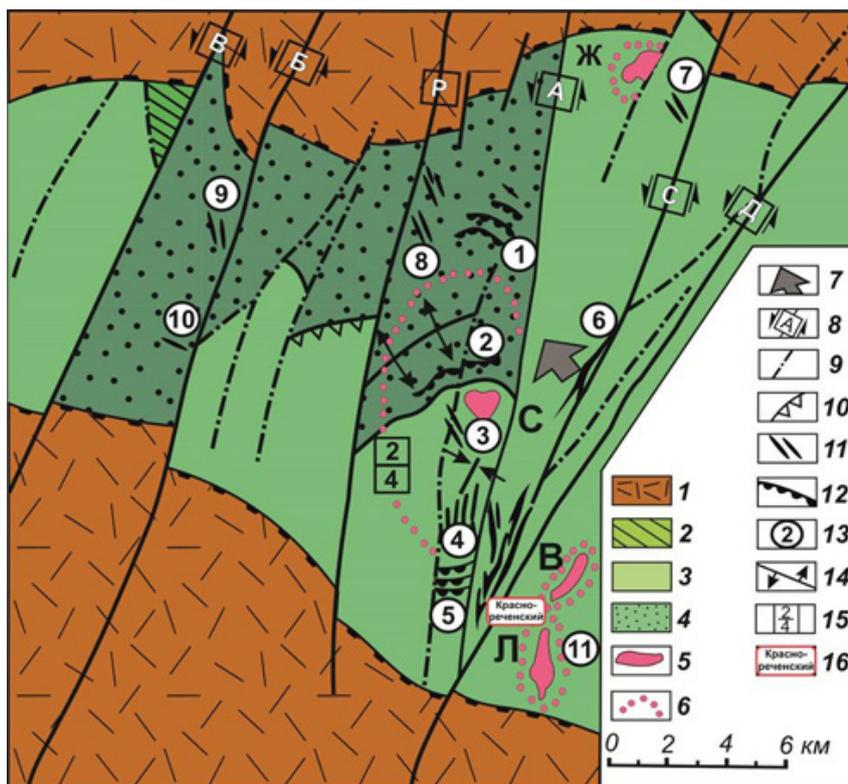


Рис. 1. Структурно-металлогеническая схема Краснореченского рудного района, по данным [1, 9], с изменениями и дополнениями:

1 – палеоцен-раннеэоценовые туфы и лавы риолитов; 2–4 – флишоиды Журавлевского турбидитового бассейна (Журавлевский террейн): 2 – средне-верхнеальбские песчаники, 3 – апт-альбские песчаники, 4 – берриас-валанжинские алевролиты и песчаники; 5 – интрузии монцодиоритов и гранодиоритов орогенного этапа: С – Солнечный ключ, Л – ключ Лапшин, В – ключ Ветвистый, Ж – ключ Желтый; 6 – ореолы контактовых роговиков и площадной биотитизации пород; 7 – направление главного сжатия (поздний альб-сеноманский орогенный этап); 8 – разломы и трещинные зоны поздний мел-палеоценового каркаса района: А – Арсенопиритовый, С – Смирновский, Е – Еловый, Р – Рогатый; 9 – прочие сдвиги; 10 – надвиги; 11 – крутопадающие рудные тела, сопряженные с поздними сдвигами; 12 – пологие рудные тела, локализованные в ранних синскладчатых надвигах и взбросах; 13 – рудолокализирующие структуры: 1 – Верхне-Усурийская, 2 – Южная, 3 – Эльдорадская, 4 – Ореольная, 5 – Смирновская, 6 – Встречная, 7 – ручья Желтого, 8 – Западно-Иманская, 9 – Трудная, 10 – Еловая, 11 – Августовская; 14 – оси складок; 15 – расстояние в км от поверхности до кровли (числитель) и подошвы (знаменатель) гранитоидных криптоплутонов орогенного этапа (по данным геофизики); 16 – ближайший населенный пункт – поселок Краснореченский

Складчатый фундамент района представлен флишоидами Журавлевского террейна – толщей алевролитов и песчаников раннемелового турбидитового бассейна общей мощностью 13 км с берриаса по альб включительно. В нижней берриас-валанжинской части разреза доминируют алевролиты, в верхней готерив-альбской – песчаники. Для переходной рудовмещающей толщи поздневаланжинского возраста характерно переслаивание песчаников и алевролитов. Флишоиды аномально обогащены рудными элементами, включая олово и свинец [3].

В процессе формирования складчато-разломного каркаса фундамента отчетливо проявились два этапа. С поздним альб-сеноманским этапом, при сжимающем региональном напряжении -320° , связано образование крупных и мелких складчатых структур северо-восточного простирания с пологопадающими шарнирами. Складкообразование сопровождается субсогласными с напластованием флишоидов надвигами и взбросами на крыльях складок [5, 9]. Примером таких структур выступает Южная синклираль, вмещающая (в пачке переслаивания пес-

чаников и алевролитов верхнего валанжина) одноименное месторождение, где синскладчатый субсогласный с напластованием вмещающих пород надвиг является непосредственно рудовмещающим.

Аналогичные надвиги, контролирующие зоны полиметаллического оруденения, присутствуют на Верхнеуссурском и Смирновском месторождениях (рис. 1). Характерной особенностью указанных, однотипных Южному, месторождений является динамометаморфизм руд.

В строении рудовмещающего синформного синклинали складке надвига на Южном месторождении отчетливо проявлены признаки кинематики формирования складок продольного изгиба, где в синклинали складках проскальзывание в подошве каждого петрофизически контрастного слоя происходит в сторону замка, а в кровле – к замку [6]. На юго-западном фланге рудовмещающего надвига проявлена мелкая дисгармоничная складчатость внутрипластового течения. По нашим наблюдениям и данным [8], в плоскости сместителя, вмещающего жильное тело Южного месторождения, проявлены борозды скольжения, ориентированные по падению в сторону замка. Здесь же присутствует более поздняя субгоризонтальная штриховка, сопряженная с участками милонитизации руд.

Жильное рудное тело имеет ячеисто-фестончатое строение с чередующимися субгоризонтальными раздувами мощности до 3 м (рис. 2).

В генеральном плане рудная зона в составе рудовмещающего надвига морфологически конформна Южной синклинали: с центриклинальным азимутальным подворотом на СВ фланге и выполаживанием в замковой части на глубине.

Интрузивный магматизм в границах Краснореченского района связан с проявлением Березовско-Арагатского позднеальбского–сеноманского комплекса орогенного этапа формирования Сихотэ-Алинского складчатого пояса. «Стратотипическими» элементами комплекса являются раннесеноманские (100 млн лет, по данным U-Pb датирования [4]) одноименные плутоны монцодиорит-гранодиоритового состава в западной части Кавалеровского района. Магматиты Южного месторождения проявлены в виде краснореченского ареала Березовско-Арагатского комплекса. Ареал выражен как кольцевая интрузивно-купольная структура, в ядре которой в интервале глубин 2–4 км находится интрузия монцодиоритов, возраст которой, по данным Rb-Sr датирования апофиз, обнажаемых на Южном месторождении [2], $98,4 \pm 6$ млн лет. С монцодиоритовым плутоном сопряжен ореол контактовых роговиков. На месторождении, где вмещающие осадочные породы превращены в роговики, присутствуют дорудные дайки ороговикованных диоритовых порфиритов. Дайки формируют секущие тела северо-западного и субмеридионального простирания. При этом они присутствуют и непосредственно в зоне рудовмещающего надвига Южного месторождения, где проявлены в форме ветвящихся маломощных тел, перемежающихся с рудными жилами.

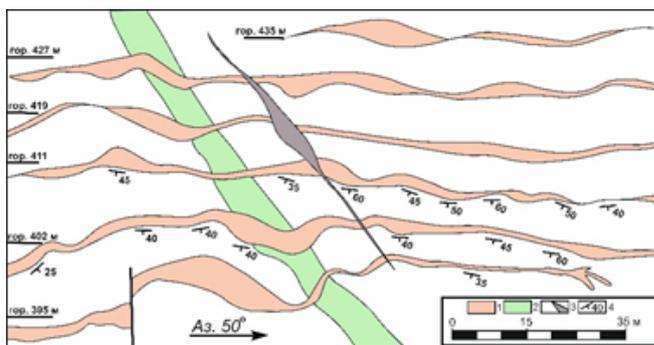


Рис. 2. Схема строения северо-восточного фланга рудного тела Южного месторождения в совмещенной проекции погоризонтных планов на горизонтальную плоскость:

1 – рудное тело; 2 – ороговикованные дорудные дайковые кварцевые монцодиориты; 3 – пострудная зона дробления; 4 – элементы залегания рудного тела

По периферии интрузивно-купольной структуры присутствуют сателлиты в виде мелких интрузий монцодиоритов, с обрамляющими их ореолами контактовых роговиков. По данным выполненного U-Pb датирования ($90,23 \pm 0,79$ млн лет), монцодиориты проявлены как позднеорогенная фаза. Указанные интрузии представляются как рудоносные, для них характерна аномальная обогащенность рудными элементами (Pb 48–337 г/т, Cu 45–106 г/т, Ni до 52 г/т [1]). По данным Sm-Nd изотопных исследований, для монцодиоритов фиксируются низкие значения ϵ_{Nd} в интервале от -3,5 до -3,8.

Более молодые интрузивные образования вскрыты скважинами на глу-

бине на юго-западном фланге Южного месторождения. Здесь, непосредственно ниже рудной зоны, присутствует маастрихтская ($65,8 \pm 1,5$ млн лет, по данным K-Ar датирования, устное сообщение В. Г. Гоневчука) интрузия лейкогранитов. Пострудный характер интрузии отчетливо иллюстрируется в процессах термального метаморфизма руд [7].

Ранее, на основе данных изотопно-геохимических исследований [3], было показано, что в роли геохимического резервуара рудного свинца Южного месторождения выступали обогащенные рудными элементами флишоиды Журавлевского террейна. В рамках текущего изучения магматических образований показано, по данным свинцово-изотопных аналитических определений, выполненных в ИГЕМ РАН, что модельные точки изотопного состава полевых шпатов кварцевых монцонитов Березовско-Арагатского комплекса, также как и точки галенита, сопряжены с центром точек раннемелового флиша, располагаясь на линии резервуара типа «ороген» системы [11]. Это определенно указывает на образование комплекса за счет переработки раннемеловых флишоидов в условиях орогенеза. Оценка доли мантийной составляющей в рудоносных краснореченских монцодиоритах проведена по формуле 1.1:

$$\frac{Nd_c(\varepsilon^c - \varepsilon^r)}{[\varepsilon^r(Nd_m - Nd_c) - (\varepsilon^m * Nd_m - \varepsilon^c * Nd_c)]} * 100 \quad (1.1)$$

[10], где ε^c , ε^r , ε^m – изотопный состав Nd верхней коры (флишоидов Журавлевского террейна – $-10,0$), монцодиоритов ($-3,5 \div -3,8$) и нормированной мантии ($+8,0$). Nd_c и Nd_m отвечает содержаниям Nd верхней коры (30 г/т) и нормированной мантии (15 г/т). В расчетных значениях мантийная компонента в расплавах составляет 35 %.

Выводы. Учитывая особенности формирования структуры Южного месторождения, данные петрологических и изотопно-геохимических исследований пород и руд, можно утверждать, что месторождение связано с процессами орогенного позднеальб-сеноманского складкообразования и магматизма. В качестве рудно-геохимического резервуара выступает гранитно-метаморфический слой молодой континентальной коры Сихотэ-Алиня, формируемый в основании Журавлевского террейна при участии мантии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валуй Г. А., Стрижкова А. А. Петрология малоглубинных гранитоидов на примере Дальнегорского района. – Владивосток : Дальнаука, 1997. – 200 с.
2. Гоневчук В. Г., Ханчук А. И., Гоневчук Г. А., Лебедев В. А. Новые калий-аргоновые датировки гранитоидов Сихотэ-Алиня (Дальний Восток, Россия) по биотиту и амфиболу: критерии достоверности и интерпретация // Тихоокеанская геология. – 2015. – Т. 34, № 6. – С. 16–33.
3. Гусарова В. В., Раткин В. В., Чугаев А. В., Тихомиров Д. В., Елисеева О. А. Месторождение Южное: Sn-Ag-Pb-Zn металлогения Сихотэ-Алиня // Отечественная геология. – 2024. – № 4. – С. 35–48.
4. Крук Н. Н., Гвоздев В. И., Орехов А. А. [и др.] Раннемеловые гранитоиды и монцонитоиды южной части Журавлевского террейна (Сихотэ-Алинь): геохимические особенности и источники расплава // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 30–49.
5. Неволин П. Л. Геодинамика формирования структур месторождений Кавалеровского рудного района. – Владивосток : Дальнаука, 1995. – 129 с.
6. Павлинов В. Н. Структурная геология и геологическое картирование с основами геотектоники. Часть 1. Структурная геология. – М. : Недра, 1979. – 359 с.
7. Раткин В. В., Симаненко Л. Ф., Елисеева О. А., Гоневчук В. Г. Пиротин-нисбит-брейтгауптит-сульфоантимонидная микроминеральная ассоциация: продукт высокотемпературной перекристаллизации руд жильного олово-серебро-полиметаллического месторождения Южное (Сихотэ-Алинь, Россия) // Записки Российского минералогического общества. – 2020. – Т. CXLIX, № 3. – С. 54–77.
8. Степанов Ю. К. [и др.] Отчет о предварительной разведке нижних горизонтов Южного полиметаллического месторождения за 2020–2022 гг. – Дальнегорск : Фонды ГМК «Дальполиметалл», 2022. – 60 с.

9. Уткин В. П. Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование. – М. : Наука, 1989. – 165 с.
10. DePaolo D. J. Neodymium Isotope Geochemistry. – Springer-Verlag, 1988. – 187 p.
11. Stacey J. S., Kramers I. D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. – 1975. – V. 26, № 2. – P. 207–221.

Дедюкина С. К.¹ (s_dedyukina@mail.ru), Абрамова С. О.¹ (svet48ramova@yandex.ru),
Коршунов Д. М.² (dmit0korsh@gmail.com)

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва; ² ГИН РАН, г. Москва

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТИПИЗАЦИЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ИТАКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Изучены магматические породы и метасоматиты Итакинского золоторудного месторождения и проведена их петрологическая типизация, на основе которой выделены 4 группы метасоматических пород. На основании петролого-геохимических исследований установлена связь кварц-серицитовых брекчий и локализованных в них кварц-карбонатных жил с золотым оруденением. Подтверждена вертикальная зональность руд.

Ключевые слова: Итакинское месторождение, метасоматиты, гидротермальные изменения, кварц-серицитовая брекчия, рудная зональность, Восточное Забайкалье.

Введение. Золоторудное месторождение Итакинское, расположенное в Могочинском районе Забайкальского края, локализуется в известном рудном районе, где выявлены несколько крупных месторождений золота, таких как Наседкино и Ключевское. Помимо них известны и несколько золотых проявлений с пока неясным потенциалом. К настоящему времени Итакинское месторождение относительно хорошо изучено, и в его пределах геологоразведочными работами подтверждено до 60 тонн золота. Геологическое строение месторождения характеризуется высокой степенью структурной сложности, связанной с сетью разломов и наложением разновозрастных минерализованных зон [4]. Несмотря на то, что в настоящее время проводится активное изучение Итакинского месторождения [1], процессы рудообразования, а также их связь с фациями метасоматоза остаются неясными. Изучение стадийности метасоматоза и рудогенеза необходимо для установления генетической модели месторождения и условий протекания гидротермального процесса, что имеет решающее значение для разработки критериев прогноза и поисков скрытого оруденения аналогичных объектов в пределах этого рудного района.

Геологическое строение и тектоническое положение. Месторождение находится в пределах Могочинского выступа архейских пород Витимо-Нюкжинской структурно-формационной зоны Саяно-Байкальской складчатой области. Вмещающими породами являются раннеархейские метаморфиты и раннемеловые вулканогенно-осадочные отложения. В пределах этой территории широко проявлены интрузивные образования, представленные палеозойскими и мезозойскими комплексами, среди которых ключевую роль в формировании оруденения играют гранитоиды амуджиканского комплекса (J_{2-3}), с которыми Б. Н. Абрамов [1] и связывает формирование рудоносных систем. Тектоническое положение объекта определяется его приуроченностью к узлу пересечения субширотной Итака-Могочинской зоны с региональным Итака-Тунгирским глубинным разломом северо-восточного простирания. В пределах узла сформировалась мелкоблоковая подвижная проницаемая зона в период, вероятно, позднеюрского–раннемелового времени, что устанавливается приуроченностью к разломам даек амуджиканского комплекса и мелкоблоковым строением южной части Итакинской грабен-синклинали. Структура рудного поля имеет блоково-мозаичное строение и включает три рудных участка: Гавриловский, Сурьямяная Горка и Малеевский.

В исследовании изучались магматические и метасоматические горные породы Итакинского месторождения по материалу керна разведочных скважин, пробуренных в 2021 г. В результате первичных и петрографических исследований удалось выделить 20 образцов неизмененных

магматических пород и 50 образцов интенсивно проявленных метасоматитов, часть из которых содержала значимую рудную минерализацию (до 5 %), и классифицировать их на характерные группы по минеральному составу. Установлена предполагаемая связь рудных ассоциаций с метасоматическими фациями и проведена первичная интерпретация условий образования. Изучение химического состава образцов проведено методом рентгено-флуоресцентного анализа в Геологическом институте РАН и на кафедре геохимии МГУ им. М. В. Ломоносова (оборудование приобретено по программе развития МГУ <https://istina.msu.ru/equipment/card/723555130/>).

Магматические горные породы. Магматизм района развивался от раннепалеозойских габброидов и диоритов кручининского и крестовского комплексов до мезозойских высокодифференцированных серий, среди которых ключевую роль играют гранитоиды амананского (J_{1a}) и амуджиканского (J_{2-3}) комплексов [1, 3].

Проведенные исследования позволили предварительно выделить три основных типа магматических пород в пределах участков Малеевский и Сурьянская горка: габбро, диориты и гранодиориты.

Габбро характеризуется темно-серой мелко-среднекристаллической массивной породой, состоящей из плагиоклаза (4–65 %) и клинопироксена (20–30 %) с незначительной хлоритизацией. Диорит имеет зеленовато-серую средне-мелкокристаллическую массивную текстуру с интенсивной хлоритизацией и составом: плагиоклаз (до 70 %), биотит и роговая обманка (до 20 % каждый). Гранодиорит отличается светло-серой средне-крупнокристаллической пятнистой текстурой, состоит из плагиоклаза (45–60 %), калиевого полевого шпата (10–25 %), кварца (10 %) и биотита или амфибола (до 30 %), с вторичными изменениями в виде серицитизации и пелитизации.

По химическому составу изученные образцы магматических пород относятся к известково-щелочной серии, по Б. Р. Фросту [5], при этом выяснено, что породы габбрового состава относятся к ильменитовой серии, а диориты и гранодиориты – к магнетитовой.

Метасоматические горные породы. Все изученные метасоматиты подразделяются на четыре группы: кварц-серицитовые брекчии, биотит-роговообманковые метасоматиты, скарны и хлоритовые метасоматиты.

Кварц-серицитовые брекчии сложены доминирующими серицитом и кварцем, в некоторых образцах определяется реликтовая гнейсовидная текстура, представленная ориентированными бластами кварца и частично сохранившимися полевыми шпатами. Большинство пород карбонатизировано и сечется прожилками кварцевого и/или карбонатного состава. Рудная минерализация представлена идиоморфными зернами пирита и арсенопирита, до 5 % по массе, которая встречается редко, в отдельных образцах, чаще всего приурочена к прожилкам, но не является отличительным признаком группы. Протолитом, вероятно, были метаморфические породы, о чем свидетельствуют реликтовая гнейсовидная текстура. Содержания золота в изучаемых интервалах не превышают 0,03 г/т, при этом в единичном образце содержание золота составляет 1,8 г/т. Описанный тип кварц-серицитового метасоматоза является главнейшим типом околорудных изменений, которые предшествовали и сопровождали оруденение на разных стадиях рудогенеза.

Вторая группа метасоматитов представлена *биотит-роговообманковыми метасоматитами*. При изучении данных пород в шлифах отмечено, что такие породы сложены плотными агрегатами срастающихся биотита и амфиболов, причем биотит постепенно замещает роговую обманку, и в разных образцах этот процесс проявлен с разной интенсивностью вплоть до полного разрушения амфибола. В некоторых шлифах сохраняются зерна первичной роговой обманки и реликтовая порфириовидная текстура, что указывает на преобразование магматических пород. Для описываемой группы метасоматитов характерно наличие двух разновидностей хлорита, а также присутствие андалузита в качестве второстепенного минерала. Рудные минералы, представленные призматическим и игольчатым арсенопиритом, встречаются в большинстве образцов в количестве до 1–2 % и чаще всего тяготеют к биотиту. Содержание золота здесь варьирует от 0,01 до 0,1 г/т. Породы с подобными изменениями пространственно тяготеют к кровле или апикальным частям массива гранодиоритов, формируя отдельные изометрические тела или зоны вдоль тектонических нарушений.

Скарны, или, точнее, скарноподобные породы, характеризуются наличием клинопироксена, хлорита и гранатов. Вероятно, это зоны горячего автотерматоза по кислым породам. Рудные минералы в породах группы встречены в единичных количествах.

Хлоритовые метасоматиты, выделенные в отдельную группу, представлены кварц-карбонат-серицитовыми породами с хлоритом до 50 % по массе. Хлорит образует радиально-лучистые и чешуйчатые агрегаты. Рудные минералы встречаются редко, в отдельных породах до 2 % по массе, в основном они ассоциируют с карбонатными жилами и представлены небольшими вкрапленниками, чаще всего ильменита, внутри которого наблюдаются зоны позднего замещения гематитом. Выделенная группа метасоматитов, вероятно, могла образоваться в результате процесса пропилитизации. Содержание золота в предложенных образцах ниже предела обнаружения за исключением одной пробы, в которой содержание золота составило 3,89 г/т.

Золоторудная минерализация локализуется в кварцевых жилах, сульфидизированных зонах окварцевания, дробления и брекчирования пород, имеющих восток-северо-восточное до широтного простирание («Главная рудная зона») [2]. Всего на участке выявлено более тридцати золотоносных зон протяженностью от первых сотен метров до 1700 м и мощностью от долей метра до 156 м. Среднее содержание золота в рудных телах варьирует от 6,0 до 16,4 г/т, мышьяка – от 0,21 до 2,71 %.

Согласно опубликованным данным, на месторождении установлена вертикальная зональность оруденения, выраженная в постепенной смене от верхних рудных горизонтов к нижним преобладающей минерализации – от сурьмяной к полиметаллической, далее к пирит-арсенипиритовой. В западном блоке участка Сурьмяная Горка смена антимонитовых руд полиметаллическими и кварц-арсенипиритовыми происходит на глубине 80–100 м, в центральном блоке поднимается до 15–20 м от поверхности [4]. Золотое оруденение проявлено в трех основных рудных ассоциациях: кварц-арсенипиритовой, кварц-полиметаллической и кварц-антимонитовой. Среди изученных образцов из золотоносных ассоциаций встречена только кварц-арсенипиритовая, которая локализуется в прожилках, встреченных в первой и второй группе метасоматитов.

Заключение. Метасоматические преобразования проявились в формировании нескольких фаций, пространственно и, предположительно, генетически связанных с оруденением. Кварц-серицитовые брекчии, развитые по метаморфитам, являются главным типом околорудных изменений и основной вмещающей средой для прожилковой кварц-арсенипиритовой минерализации. Биотит-роговообманковые метасоматиты, образовавшиеся по апикальным частям интрузивов, также содержат вкрапленность арсенипирита, тяготеющую к биотиту, что указывает на их потенциальную металлоносность.

Полученные данные согласуются с существующей моделью вертикальной зональности рудоотложения в гидротермальных системах ($Sb \rightarrow Pb-Zn \rightarrow As-Au$) и подтверждают, что в изученном материале представлена верхняя, кварц-арсенипиритовая ассоциация. Формирование промышленного оруденения контролируется сочетанием факторов: наличием проницаемых зон в узлах пересечения разломов, предшествующим метасоматическим преобразованием пород (в первую очередь серицитизацией) и, вероятно, поступлением флюидов от позднейских гранитоидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Б. Н., Калинин Ю. А., Боровиков А. А. Итакинское золоторудное месторождение: изотопный состав, вероятные источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. – 2022. – № 2. – С. 6–22.
2. Анферов А. В. Проект на проведение работ по разведке рудного золота на участках Малеевский и Сурьмяная Горка Итакинского месторождения в Могочинском районе Забайкальского края. – 2023.
3. Калашников В. А., Давыдов Ю. К. Итакинское золоторудное месторождение // Месторождения Забайкалья. – 1995. – Т. 1. – С. 41–48.
4. Мельникова К. М., Стафеева Л. П., Шевырев И. А. Особенности геологического строения Итакинского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1970. – Т. 239. – С. 340–344.

5. B. Ronald Frost, Calvin G. Barnes, William J. Collins et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks // Journal of Petrology. – 2001. – № 42. – P. 2033–2048.
6. Irvine T. N. J., Baragar W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // Canadian journal of earth sciences. – 1971. – 8(5). – 523–548.

Зарицкий А. В. (zaritsky@tsnigri.ru)

ЦНИГРИ, г. Москва

**«ВООРУЖИТЬ ГЕОЛОГА НОВЕЙШИМИ ДАННЫМИ»:
Н. Н. ГОРНОСТАЕВ – ПЕРВЫЙ ДИРЕКТОР НИГРИЗолото**

Принципы работы, заложенные Н. Н. Горностаевым в основу работы НИГРИЗолото – тесная связь глубоких научных исследований с нуждами геологоразведочной и горнорудной практики, поныне руководят работой научных школ ЦНИГРИ.

Ключевые слова: история отечественной геологии, НИГРИЗолото, Сибгеолком, Томский технологический институт, Томский университет, трест «Золоторазведка».

В 2026 году исполняется 130 лет со дня рождения советского ученого-геолога, петрографа Николая Николаевича Горностаева (1896–1938) – первого директора научно-исследовательского геологоразведочного института НИГРИЗолото в 1935–1936 гг.

Н. Н. Горностаев занимался вопросами геологии золоторудных месторождений и золотоносных россыпей, внес значительный вклад в изучение их генезиса. В 1935 году, когда он по приглашению заместителя наркома тяжелой промышленности СССР А. П. Серебровского возглавил НИГРИЗолото (позднее, в 1936 году, выделенный из состава треста «Золоторазведка» в самостоятельную организацию) [2], его выдающиеся способности и как специалиста-геолога, и как организатора были уже широко известны.

В 1919 году Николай Николаевич, тогда студент третьего курса Томского технологического института (ТТИ), по рекомендации профессора М. А. Усова участвовал в летних экспедиционных работах Сибирского геологического комитета. Он руководил геологической партией, выполнявшей 10-верстное геологическое картографирование в Прииртышской части Киргизской степи, и через год продолжил работы на этой территории уже как штатный сотрудник Сибгеолкома, где в 1923 году занял пост и. о. ученого секретаря [3]. В том же году Н. Н. Горностаев, сам еще будучи студентом Томского государственного университета (ТГУ), становится преподавателем на университетской кафедре минералогии и одновременно исполняет обязанности ассистента в ТТИ [7]. Сочетание в одном лице и сотрудника Геолкома, и преподавателя, и студента позволило говорить о «феномене профессора Горностаева» [6].

Молодой ученый быстро составил себе репутацию специалиста, который превосходно умеет вести полевую съемку и обработку материалов, обладает огромной эрудицией и знанием мировой литературы в области практической и теоретической геологии, в том числе на нескольких иностранных языках [1]. Профессор кафедры минералогии и кристаллографии ТТИ и кафедры минералогии ТГУ А. В. Лаврский отмечал не только широту научных интересов Горностаева и глубину его проникновения в существо геологических явлений, но и «изящество стиля» его научных работ, а также «то, что он большой мастер в дискуссионном вопросе и, кроме того, очень смел в мыслях» [3].

Профессор, заведующий кафедрой исторической геологии и палеонтологии ТТИ М. К. Коровин писал о нем: «Н. Н. Горностаев проявил себя тонким наблюдателем, работая в очень неблагоприятных для геолога условиях... В обстановке последующей кабинетной работы Горностаев проявил себя не менее тонким аналитиком, разрешая сложные вопросы тектоники и стратиграфии на основании нередко, казалось бы, разрозненного и фрагментарного материала... В сводке данных полевых наблюдений и аналитического их изучения Н. Н. Горностаев обнаруживает, наконец, большую способность и склонность к широкому синтезу. Кроме глубо-



Рисунок. Николай Николаевич Горностаев (из архива кафедры петрографии Томского государственного университета [7])

федрой минералогии, кристаллографии и петрографии Томского индустриального института им. С. М. Кирова [7]. В те же годы Н. Н. Горностаев проводил геологическую экспертизу строительства железнодорожных магистралей, туннелей и мостов, с конца 1920-х занимался также вопросами региональной геологии Горного Алтая и Енисейского края, анализом условий формирования руд золото-кварцевой, золото-серебряной формаций и золотоносных россыпей, вел геолого-петрографическое изучение ряда золоторудных месторождений североенисейской тайги, Кузнецкого Алатау, Забайкалья [3].

Между тем до момента основания НИГРИЗолото добыча золота в СССР была неустойчива и зависела от случайных открытий новых богатых россыпей – что, в свою очередь, было связано с «игнорированием геологии как основы поисково-разведочного дела», по выражению В. А. Обручева [4]. Как отмечал А. П. Серебровский, рост золотой промышленности определялся прежде всего кадрами, затем организацией труда, освоением разведки, наличием подготовленных запасов золота [5]. Создать этот фундамент для целой отрасли хозяйства и предстояло новому институту.

Во главе НИГРИЗолото Н. Н. Горностаев руководил исследованием генетических особенностей Балейского золоторудного месторождения в Восточном Забайкалье; о первых результатах этих работ он уже осенью 1935 г. докладывал наркому Серебровскому [2]. В марте 1936 г. Николай Николаевич перешел на должность заместителя директора НИГРИЗолото по научной работе.

В годы «Большого террора» Н. Н. Горностаев был отстранен от работы в НИГРИЗолото и арестован. Лишь спустя три четверти века стало известно, что он был расстрелян в 1938 г.; Военная коллегия Верховного суда СССР реабилитировала его в 1956 г. [3].

В НИГРИЗолото под руководством Н. Н. Горностаева были образованы научные и административные группы, отделы, мастерские, лаборатории, музей, библиотека. Как ответственный редактор сборников «Труды НИГРИЗолото» Николай Николаевич стремился «вооружить геолога и разведчика по золоту новейшими данными теории и практики». Пользуясь своим знанием нескольких иностранных языков, он переводил для публикации интересные статьи из иностранной прессы. Актуальные работы, позволявшие заполнить белые пятна в знаниях о геоло-

ких знаний геологических явлений, он пользуется здесь большой русской и иностранной литературой, учет достижений которой объясняет принимаемую им местами новую терминологию и новые геологические понятия... При этом необходимо также отметить, что во всех обобщениях автор всегда остается на почве полученных им фактов» [3].

В 1926 году на 2-м Всесоюзном съезде геологов Н. Н. Горностаев как делегат Сибгеолкома выступил с двумя докладами, один из которых – о молодой магматической формации Киргизской степи – он затем по просьбе В. И. Вернадского и А. П. Герасимова повторил в Русском минералогическом обществе в Ленинграде [3]. В том же году Николай Николаевич избран доцентом, а в мае 1927 г. по всесоюзному конкурсу – профессором по курсу петрографии Уральского политехнического института. С 1929 г. он профессор и заведующий кафедрой петрографии Томского университета, параллельно в 1930–1932 гг. – заведующий кафедрой петрографии Сибирского геологоразведочного института, в 1934–1935 гг. – заведующий объединенной ка-

логии золотоносных районов, публиковались на страницах «Трудов» с комментариями редакции о наиболее интересных выводах авторов. Автор одного из таких комментариев, в то время молодой ученый Иван Сергеевич Рожков, двадцать восемь лет спустя встал во главе института, переименованного к тому времени в ЦНИГРИ [2].

Тесная связь глубоких научных исследований и нужд геологоразведочной и горнорудной практики, свойственная научным школам ЦНИГРИ, по сей день сохраняет преемственность с принципами работы, заложенными первым директором – основателем института Н. Н. Горностаевым. Его научное наследие составляют четыре монографии, посвященные вопросам стратиграфии, палеогеографии, палеоклиматологии, палеоморфологии золотоносных районов Западной Сибири, Казахстана, а также работы по петрографическому анализу горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивания В. А. Золотой был человек. Проф. Н. Н. Горностаев, 1896–1954 // Сибирская старина. – 1993. – № 4.
2. НИГРИЗолото. Становление научно-исследовательского геологоразведочного института / В кн. : Время ЦНИГРИ. 85: к юбилею Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов / [ред.-сост. Е. В. Сидорова]. – М. : ЦНИГРИ, 2020. – С. 12–17.
3. Николай Николаевич Горностаев – первый директор ЦНИГРИ // Руды и металлы. – 2018. – № 1. – С. 76–81.
4. Обручев В. А. Основные черты месторождений золота СССР и постановка поисково-разведочного дела. – Л., 1928.
5. Серебровский А. П., под общ. ред. Б. М. Таля. На золотом фронте. – М., Л. : АН СССР, 1936. – 422 с.
6. Уткин Ю. В. «Вспомним же, ребята...» Очерки, репортажи, заметки. – Томск : Изд-во Томского университета, 2007. – С. 213–217.
7. Уткин Ю. В. Кафедра петрографии Томского государственного университета 1927–2002. Исторический очерк. – Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2002. – С. 38–40.

Калугин Д. В. (kalugindaniil2311@gmail.com)

ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ КОВДОЗЕРСКОГО КОМПЛЕКСА (БАЛТИЙСКИЙ ЩИТ)

Исследования Ковдозерского комплекса показали наличие перидотит-пироксенит-габброноритовой ассоциации пород с повышенной магнезиальностью, умеренной железистостью и пониженной щелочностью. В краевых частях мафит-ультрамафитовых массивов установлена сульфидная минерализация, содержащая металлы платиновой группы, никель, медь, золото.

Ключевые слова: Ковдозерский комплекс, мафит-ультрамафитовые интрузии, петрохимическая характеристика, никель, платиноиды.

Рост цен на металлы платиновой группы, вызванный их дефицитом, а также все растущее мировое потребление никеля провоцируют спрос, который требует расширения их минерально-сырьевой базы. Балтийский щит по запасам и ресурсам никеля и платиноидов является главным рудным регионом России, после уникальной Норильской провинции, и крупнейшим в Европе. В пределах Балтийского щита на юге Мурманской области расположен Ковдозерский перидотит-пироксенит-габброноритовый комплекс, перспективный на открытие месторождений указанных стратегических металлов.

Ковдозерский комплекс локализуется в центральной части Беломорской тектонической области. В составе комплекса насчитывается не менее двадцати отдельных массивов. Нами были

изучены наиболее крупные из них: Ковдозерский, Тупой, Глубокий, Тридцатка и Ругозерский. Указанные массивы сконцентрированы в полосе шириной около 10–20 км, вытянутой от озера Ковдозеро на юго-восток до губы Ругозерской Белого моря. Положение массивов контролируется разломами северо-западного простирания. Вмещающими породами для массивов выступают амфиболовые и амфибол-биотитовые гнейсы Беломорского метаморфического комплекса архея. Контакты интрузий с вмещающими породами преимущественно тектонические, иногда магматические. В зоне контакта вмещающие породы окварцованы.

В ходе поисковых работ на никель, платину и палладий в 2004–2005 гг. в мафит-ультрамафитовых массивах Ковдозерского комплекса выявлено рудопроявление платиноидов Якушиха, а также установлены зоны с сульфидной минерализацией.

При изучении геологических особенностей Ковдозерского комплекса мы обратили внимание на сопряженность тектонических структур, контролирующей положение рассматриваемого комплекса, со структурами Финно-Карельского пояса расслоенных интрузий, к которым приурочено платиноидно-медно-никелевое оруденение. Возраст Ковдозерского комплекса, определенный U-Pb методом по циркону, составляет 2440 ± 10 млн лет ÷ 2460 ± 9 млн лет [1]. Данный возраст сопоставим с возрастом мафит-ультрамафитового магматизма Финно-Карельского пояса.

Цель настоящих исследований: определение петрохимических особенностей и рудной специализации мафит-ультрамафитовых пород Ковдозерского комплекса.

Методика исследований включала полевые работы, аналитические исследования, статистическую обработку данных и интерпретацию полученных результатов.

В 2024–2025 годах автор принимал участие в поисковых работах на платину и палладий в пределах Ковдор-Зеленоборской площади во время прохождения производственной практики в АО «Центрально-Кольская экспедиция». В ходе полевых работ были изучены коренные выходы массивов мафит-ультрамафитов Ковдозерского комплекса и вмещающих их метаморфических пород с фотодокументацией и отбором образцов для аналитических исследований. По потенциально рудоносным зонам были пройдены канавы с отбором бороздовых проб для литохимического опробования.

Аналитические работы, проведенные автором в Южном федеральном университете, включали минераграфический анализ рудных образцов, петрографическое изучение мафит-ультрамафитовых пород. Для уточнения состава рудных минералов выполнен микронзондовый анализ на сканирующем электронном микроскопе VEGA LMD с энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения INCA X-Act. Также нами проинтерпретированы результаты химико-спектрального, химического количественного и силикатного анализов, проведенных в лаборатории КГИЛЦ в городе Апатиты. Всего было изучено 190 проб, из них 48 проб силикатного анализа, 112 литохимических проб, 16 шлифов и 14 аншлифов.

Математическая обработка данных осуществлялась в программе Statistica. С целью выявления ассоциаций породобразующих, рудных элементов и скрытых закономерностей их распределения использовались процедуры описательной статистики (среднее, максимальное и минимальное значения, дисперсия), корреляционного и факторного анализов. Парные корреляции вычислялись между шестью рудными элементами (Au, Pt, Pd, Cu, Ni, S) по 112 пунктам наблюдения и отдельно между породобразующими компонентами (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO, CaO, MgO, MnO, K_2O , Na_2O , SO_3) по 48 пробам. Для оценки корреляционных связей был использован коэффициент Пирсона при 5 % уровне значимости. Факторный анализ проводился «без вращения» методом выделения главных компонент (значимые нагрузки > 0,7). Выборка включала 11 переменных (главных оксидов по результатам силикатного анализа), 48 пунктов наблюдения, факторные нагрузки на изучаемые признаки были рассчитаны по трем основным факторам.

Результаты исследований. В строении массивов Ковдозерского комплекса участвуют дифференциаты основного-ультраосновного состава: лерцолиты, вебстериты и их разности, содержащие плагиоклаз, а также габбронориты и нориты, в том числе оливиновые. Взаимные переходы между породами постепенные. Характерной чертой для Ковдозерского комплекса является увеличение основности пород в юго-западном направлении. Это позволяет предположить, что

данные массивы являются составными частями ранее единого Ковдозерского интрузива, разобщенного в результате тектонических движений.

Главные породообразующие минералы представлены оливином, ортопироксеном (гиперстенем, реже – энстатитом), клинопироксеном (авгитом) и основным плагиоклазом. Постоянно присутствуют биотит и хромшпинелиды. Вторичные минералы представлены амфиболом, гранатом и серпентином. Для изучаемых пород характерны гипидиоморфнозернистая, пойкилитовая и друзитовая (коронарная) структуры.

Оливин установлен в виде зерен округлой формы. Часто зерна оливина обрастают келифитовыми каймами. Отмечается развитие серпентина по трещинам в оливине с выделением пылевидного магнетита и гематита. Ромбический пироксен, как правило, образует идиоморфные зерна. Моноклинный пироксен представлен авгитом, часто устанавливается в сростании с ромбическим пироксеном, образует зерна, близкие к идиоморфным. Характерны келифитовые каймы пироксенов вокруг зерен оливина, резкое преобладание ромбического пироксена над моноклинным. Плагиоклаз представлен рядом андезит–лабрадора, который в габброноритах и норитах наблюдается в интерстициях между темноцветными минералами в виде лейстовидных или ксеноморфных зерен. При переходе от оливиновых габброноритов к ультраосновным разновидностям количество плагиоклаза сокращается, он становится резко ксеноморфен и интенсивно опацифицирован.

Изучение основных статистических параметров данных силикатного анализа показало, что интрузивные породы Ковдозерского комплекса относятся к нормальному классу щелочноземельных пород калий-натриевой серии ($\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O} = 1-4$), насыщенных и слабонасыщенных кремнеземом. Породы комплекса характеризуются низкой щелочностью (< 2), умеренной железистостью (25–45), при этом содержание FeO колеблется от 9,73 до 15,95 % (в среднем 10–13 %). Основные дифференциаты имеют повышенную глиноземистость (Al_2O_3 до 15 %), повышенную кремнекислотность (до 52 %) и магнизиальность (до 32 %). Такие значения петрохимических параметров объясняются широким развитием оливин- и плагиоклазсодержащих пород и преобладанием их меланократовых разновидностей.

На АФМ-диаграмме для пород Ковдозерского комплекса установлен фенеровский тренд дифференциации с накоплением железа в дифференциатах с сохраняющейся низкой кремнекислотностью. Данный тип дифференциации магмы характерен лишь для начальных этапов развития полноразвитых толеитовых серий [2]. В свою очередь, на диаграмме Дженсена породы Ковдозерского комплекса попадают в поле коматиитовой серии (рисунок). Подобная петрохимическая характеристика выявлена для магматического тела Лонтаваара и некумулясных габброноритов комплекса Койллисмаа в Финляндии [6], а также магнизиальных друзитов Беломорья [1].

В результате математической обработки данных силикатного анализа магматических пород Ковдозерского комплекса установлены значимые отрицательные связи MgO с SiO_2 , Na_2O и K_2O , положительные связи FeO с CaO, TiO_2 и отрицательная с SiO_2 . Результаты факторного анализа подтверждают петрохимические данные о наличии фенеровского тренда с дифференциацией от перидотитов к габброидам с увеличением доли железа по мере развития магматического процесса. Данная закономерность дифференциации характерна для расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузий региона и согласуется с петрологической моделью образования подобных магматических тел [5]. Значимые нагрузки фактора 3 для Fe_2O_3 и SO_3 можно объяснить генетической связью сульфидов с постмагматической гематитизацией.

Рудная минерализация мафит-ультрамафитовых массивов Ковдозерского комплекса связана с проявлениями никеля, платины, палладия. Минерализованные зоны прослежены в зоне эндоконтактов всех изучаемых нами массивов. Подобная локализация рудной минерализации соответствует контактовому типу сульфидной платиноидно-медно-никелевой формации [3, 4].

По данным химического количественного анализа, среднее содержание рудных элементов в пробах габброноритов составляет: никеля – 0,3 % (максимальное до 0,74 %), меди – 0,15 %, платины – 0,1 г/т, палладия – 0,45 г/т, золота – 0,04 г/т.

По результатам минераграфического анализа нами выделены главные ассоциации рудных минералов, образующихся в магматическую и постмагматическую стадии. Минералы магма-

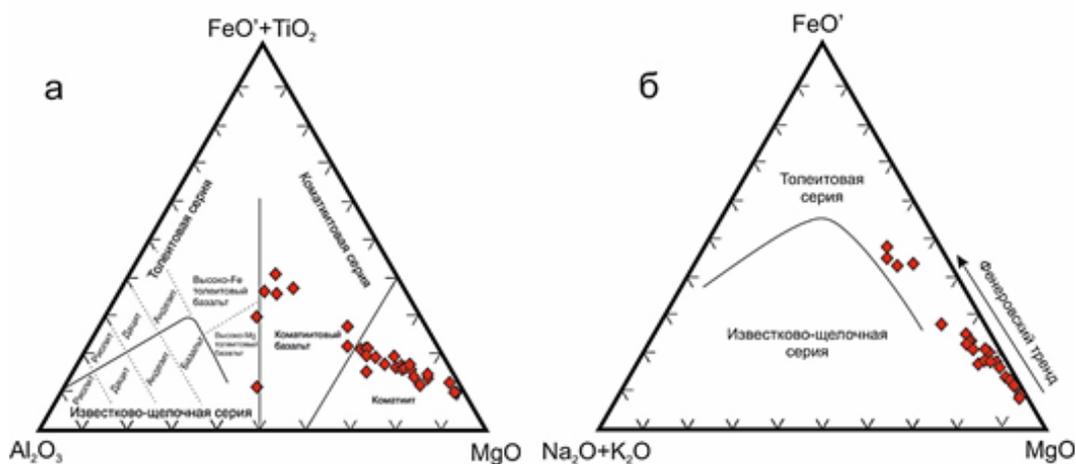


Рисунок. Диаграммы Дженсена (а) и АФМ (б) с фигуративными точками пород Ковдозерского комплекса

тической стадии представлены пирротином, пентландитом, халькопиритом, реже встречаются ильменит и магнетит. Постмагматическая ассоциация приурочена к прожилкам серпентина и представлена халькопиритом, гематитом, реже отмечается виоларит (развивающийся по пентландиту).

Проведенный микрозондовый анализ позволил выявить в пентландите изоморфную смесь кобальта (до 1,3 %), что подтверждается тесной корреляционной связью кобальта и никеля (коэффициент корреляции 0,97 при 112 точках наблюдения). В халькопирите присутствует цинк (до 6,5 %) и никель (до 3 %). Подтверждено наличие сульфидов никеля в постмагматической ассоциации. Собственные минералы платины и палладия не установлены, но результаты химико-спектрального, химического количественного анализов показывают наличие в рудах указанных платиноидов суммой до 6 г/т. Корреляционный анализ рудных элементов показал наличие значимых парных положительных связей между всеми изучаемыми признаками. Максимальные значения коэффициентов корреляции установлены между парами Ni-Pd, Pt-Pd и Ni-S. Можно прогнозировать увеличение количества платиноидов совместно с общим количеством сульфидов.

Выводы. В петрохимическом отношении мафит-ультрамафитовые породы Ковдозерского комплекса характеризуются повышенной магнезиальностью и низкой щелочностью. Для них установлен фенеровский тренд дифференциации. Аналогичная характеристика была выявлена для отдельных участков интрузий комплекса Койллисмаа в Финляндии. Формирование массивов связано с плюмовым магматизмом. Рудная минерализация представлена магматической и постмагматической ассоциацией. Первая представлена гипидиоморфными выделениями пентландита, пирротина и халькопирита, вторая – халькопиритом, гематитом и сульфидами никеля, приуроченными к прожилкам серпентина. Главным источником никеля и кобальта является пентландит магматической стадии. На основании тесной корреляционной связи платины, палладия и никеля мы предполагаем вхождение платиноидов в структуру пентландита. Рудная минерализация прослежена в краевых частях интрузии, что характерно для контактового типа медно-никелево-платинометалльного оруденения. По рудной специализации аналогами для Ковдозерского комплекса могут выступать расслоенные комплексы Койллисмаа и Портимо в Финляндии с промышленной платиноидно-медно-никелевой минерализацией.

За помощь и ценные консультации автор благодарит ведущего геолога АО «Центрально-Кольская экспедиция» Горбачеву Светлану Авенировна и доцента Южного федерального университета, к.г.-м.н. Грановскую Наталью Васильевну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арестова Н. А., Чекулаев В. П., Кучеровский Г. А. Сравнение базитовых вулканитов сумия Карелии с базитами расслоенных интрузий и друзитами Беломорья // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – № 17. – С. 21–27.

2. Дубровский М. И. Тренды дифференциации оливиннормативных магм нормальной щелочности и соответствующие им породные серии. – Апатиты : изд. Кольского научного центра РАН, 1998. – 336 с.
3. Заскинд Е. С., Конкина О. М. Типизация сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений для целей прогноза и поисков // Отечественная геология. – 2019. – № 2. – С. 3–15.
4. Чернышев Н. М. Типы платиноидно-медно-никелевых и платиновых рудномагматических систем и их структурно-вещественная эволюция в общей модели формирования литосферы // Вестник ВГУ. Серия: геология. – 2016. – № 2. – С. 103–113.
5. Шарков Е. В. Петрология расслоенных интрузий. – М. : Наука, 1980. – 184 с.
6. Karinen T. The Koillismaa Intrusion, northeastern Finland – evidence for PGE reef forming processes in the layered series. – Espoo : Geological Survey of Finland, 2010. – 176 p.

Камагурова С. В. (kamagurova_svetl@mail.ru)

Институт минеральных ресурсов, г. Ташкент, Узбекистан

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ И ОЦЕНКЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ САРЫБАТЫРСКОЙ ЗОЛОТОРУДНОЙ ЗОНЫ)

В работе рассмотрены современные подходы к изучению и оценке золоторудных месторождений на примере Сарыбатырской золоторудной зоны. Проанализированы геолого-структурные условия локализации оруденения, особенности вещественного состава руд и факторы, влияющие на достоверность подсчета запасов. Показана эффективность комплексного подхода, основанного на интеграции традиционных геологических методов и цифрового моделирования с использованием специализированного программного обеспечения. Отмечена практическая значимость применения блочного моделирования при оценке запасов золота на месторождениях со сложным геологическим строением.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, геологоразведочные работы, подсчет запасов, блочное моделирование, Microtine, достоверность оценки.

Золоторудные месторождения остаются одним из ключевых объектов геологоразведочных работ, определяющих развитие минерально-сырьевой базы и устойчивость горнодобывающей отрасли. В условиях усложнения геологического строения рудных объектов, увеличения глубин разведки и вовлечения в освоение месторождений со сложной морфологией рудных тел особое значение приобретает достоверность геолого-экономической оценки запасов [1, 2]. Традиционные методы разведки и подсчета запасов, основанные исключительно на геологической интерпретации и ручных расчетах, в настоящее время дополняются и уточняются современными цифровыми и геоинформационными технологиями.

Актуальной задачей современной геологии является формирование комплексного подхода к изучению и оценке золоторудных месторождений, включающего анализ геологического строения, структурных факторов локализации оруденения, вещественного состава руд, а также применение цифровых методов моделирования и специализированного программного обеспечения. В этом контексте значительный научный и практический интерес представляет опыт изучения Сарыбатырской золоторудной зоны, характеризующейся сложными геолого-структурными условиями и разнообразием типов руд.

Сарыбатырская золоторудная зона отличается многоэтапной геологической историей формирования и сложным тектоническим строением. Размещение золоторудного оруденения в пределах зоны контролируется сочетанием литологических и структурных факторов, среди которых ведущую роль играют разрывные структуры различного ранга, зоны дробления и трещиноватости, а также контакты пород разного состава [3].

Всего выделено 10 рудных залежей, из них в зависимости от элементов залегания 6 крутопадающих, 2 пологопадающие и 2 комбинированные рудные залежи. Они имеют изометричную, линзовидную, сложную формы и характеризуются сложной морфологией, значительной изменчивостью мощности и содержания полезного компонента как по простиранию, так и по падению.

Руды относятся к золото-сульфидному типу (малосульфидные, тонковкрапленные). По минеральному составу кварц-полевошпатовые с примесью карбонатов. Сульфиды представлены пиритом, с подчиненным значением арсенопирита, а в окисленных рудах золото находится в свободной форме. Выделяются участки с первичными и окисленными рудами, что оказывает существенное влияние на методику разведки, опробования и последующую оценку запасов. Учет вещественного состава руд и степени их окисленности является важным условием корректной интерпретации геологоразведочных данных и последующей добычи.

Анализ геолого-структурных условий показывает, что наиболее перспективные участки оруденения приурочены к зонам пересечения разломов и участкам интенсивной тектонической переработки пород. Данные особенности требуют детального структурного анализа и повышенной плотности разведочных выработок при оценке запасов.

Окисленные руды изучены в пределах дневной поверхности системой канав с шагом 15–30 м, а также вертикальными шарошечными скважинами, пробуренными по сети 20–45 × 10–30 м. Сульфидные руды разведаны комплексом буровых и горных работ. Шарошечные скважины выполнены по сети, аналогичной принятой для окисленных руд, на глубину 100–120 м. На горизонте +340 м непрерывность рудных тел по простиранию подтверждена системой штреков, а вкрест простирания залежи вскрыты рассечками, пройденными на полную мощность рудных тел с интервалом в среднем 30–40 м.

В последние годы в практике геологоразведочных работ все более широкое применение находят методы цифрового моделирования, расширяющие возможности анализа пространственной неоднородности рудных тел и вариабельности содержания полезного компонента. Комплексный подход к изучению и оценке Сарыбатырской золоторудной зоны реализован на основе последовательной интеграции данных классических геологических исследований и цифровых методов обработки информации. Материалы бурения, подземных горных выработок, опробования и геологического картирования использовались при построении цифровой трехмерной геологической модели, в рамках которой были уточнены морфология рудных тел и их пространственное положение. Это позволило более обоснованно интерпретировать геологическую информацию, проводить анализ чувствительности параметров модели и уточнять контуры рудных тел. Особое значение имел выбор методики интерполяции (IDW), размера материнских блоков модели (5 × 5 × 2,5 м) и параметров поиска (эллипсоид), так как эти факторы напрямую влияют на результаты подсчета запасов [4]. Сравнение традиционного метода подсчета с результатами цифрового моделирования показало, что комплексный подход способствует повышению точности и воспроизводимости расчетов, так как расхождение по всем показателям (руда, золото и среднее содержание) находится в пределах 5 %. Использование блочного моделирования позволяет повысить обоснованность геологической интерпретации и достоверность подсчета запасов.

Полученные результаты и методические подходы могут быть использованы при проведении геологоразведочных работ и подсчете запасов категорий C_1 – C_2 на золоторудных месторождениях со сложным геологическим строением и неоднородным распределением полезного компонента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых ГКЗ РУз, 2022. – 20 с.
2. Инструкция по применению классификации запасов к золоторудным месторождениям. ГКЗ РУз, 2022. – 38 с.
3. Камагурова С. В. Основные закономерности размещения золотого оруденения на месторождении Сарыбатыр, обеспечивающие достоверность оценки запасов // Геология и минеральные ресурсы. – 2024. – № 4. – С. 77–81.

4. Камагурова С. В. Reserves calculation in Micromine software using the example of the Sarybatyr deposit // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. – 2025. – V. 15. – P. 58–62.

Клюкина А. А. (klyukina_95@inbox.ru)

ВГУ, г. Воронеж

ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ БЕЛАЯ И РУЧЬЕВ СЮК, ГРУЗИНКА, САШКОВА, ЗОЛОТОЙ И ЛИПОВЫЙ РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ

Работа посвящена анализу минерального состава аллювия реки Белая и ее притоков. В ходе работы описан минеральный состав и форма кристаллов минералов в шлихах.

Ключевые слова: шлих, гранат, магнетит, кварц, амфибол.

Бассейн реки Белая характеризуется сложным геологическим строением, обусловленным близостью Даховского кристаллического массива (далее – ДКМ) и зон глубинных разломов [1]. Наличие в данном районе гидротермальных образований, таких как Белореченское месторождение, предопределяет высокий интерес к изучению минерального состава и рудоносности прилегающих водотоков.

В ходе работы были отобраны шлиховые пробы в количестве: река Белая – 8 проб, ручей Грузинка – 5 проб, ручей Сюк – 4 пробы, ручей Липовый – 8 проб, ручей Золотой – 7 проб, ручей Сашкова – 3 пробы.

Все пробы были проситованы на ситах размерностью 0,25 и 0,16, разделены на тяжелую и легкую фракции в бромформе. Магнитные и электромагнитные фракции отобраны с помощью магнита Сочнева.

Для всех шлиховых проб характерны: немагнитная фракция – кварц (рис. 1) от идеально сферической до угловатой формы, гранаты ромбододекаэдрической и октаэдрической неправильной формы, флюорит удлиненной октаэдрической формы, берилл в виде гексагональных призм с пирамидальными окончаниями, циркон в виде тетрагональных дипирамид [2], амфиболы неправильной удлиненной формы, игольчатые обломки, оливин в виде угловато-окатанных зерен, арсенопирит в виде пластинчатых образований; в магнитной фракции – магнетит и титаномагнетит угловато-окатанный неправильной формы, а также в виде хорошо ограненных октаэдрических кристаллов; в электромагнитной – ильменит неправильной округлой формы, гранат, оливин, гидроокислы железа в виде неправильных угловато-окатанных образований, пирит в виде кубовидных кристаллов.

Для ручья Сюк отличительные особенности минерального состава: барит неправильной изометричной формы, от окатанных до угловато-окатанных кристаллов; биотит и вермикулит в форме чешуйчатых, пластинчатых агрегатов.

Для ручья Сашкова в немагнитной фракции характерно содержание барита в виде неправильных пластинчатых агрегатов до 60 % от состава пробы.

Для реки Белой в районе гранитного каньона в немагнитной фракции характерно содержание микроклина короткопризматической, угловато-окатанной формы, альбита неправильной пластинчатой формы, агрегаты угловато-окатанные, ортоклаза неправильной удлиненной формы. В магнитной фракции встречается ферросилит удлиненной неправильной окатанной формы (единичные зерна) [3].

В ручье Золотой встречается хромшпинелид пластинчатой окатанной формы (единичные зерна), а также единичные октаэдрические зерна граната гроссуляр-андрадитового ряда.

В ручье Липовый встречаются единичные зерна лимонита неправильной формы и в виде псевдоморфоз и биотита чешуйчатой формы.

В ручье Грузинка встречаются единичные зерна хлорита неправильной окатанной формы (рис. 2).

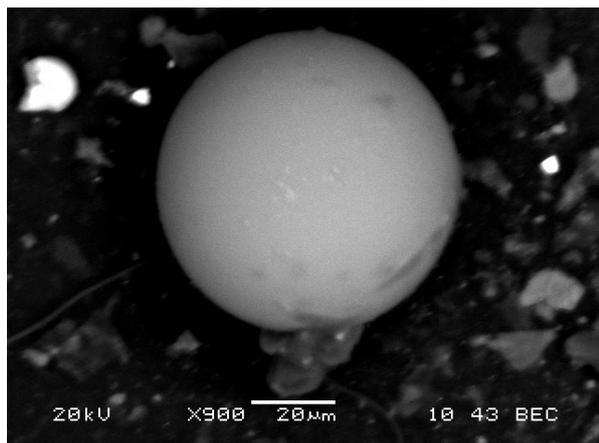


Рис. 1. Сферическая форма кварца

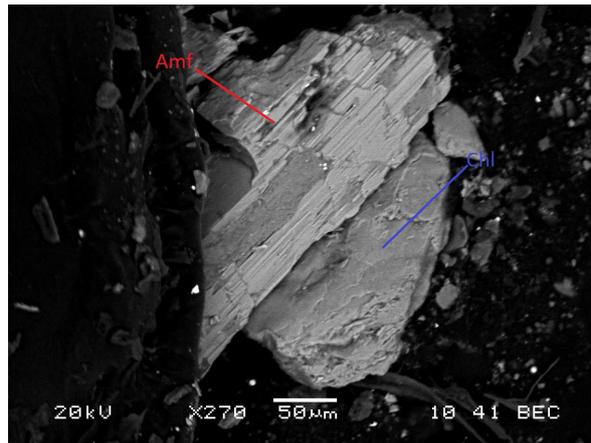


Рис. 2. Амфибол с хлоритом

В ходе работы был изучен минеральный состав реки Белая и ее притоков (ручьи Золотой, Грузинка, Липовый, Сашкова, Сюк). Выделены особенности минерального состава каждого из ручьев и реки Белой, а также описана кристаллографическая форма минералов в шлихах. Рудные минералы ручьев сносятся с верховий, которые сложены гидротермальными породами и гранитоидами. Предположительно в этих породах находятся рудные компоненты вкрапленного типа, либо обогащение рудными минералами происходит из жил гидротермальных пород. Перспектива данной работы – это изучение верховий ручьев с целью точного установления рудопроявления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненахов В. М., Жабин А. В., Жаваронкин В. И., Ильин В. В., Чеботарева Л. С. Вещественные особенности, петрофизические свойства и геодинамические условия формирования гранитоидов Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // Вестник ВГУ, серия «Геология». – 2021. – № 2. – С. 4–21.
2. Золотарева Г. С., Ненахов В. М. Акцессорные минералы и типоморфизм цирконов гранитов Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // Вестник ВГУ, серия «Геология». – 2006. – № 1. – С. 39–44.
3. Ляхович В. В. Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза. – М. : Наука, 1967. – 449 с.

**Козлов Г. А. (Gleb98-210@yandex.ru),
Макарьев Л. Б. (Leonid_Makariev@karpinskyinstitute.ru)
Институт Карпинского, г. Санкт-Петербург**

ТИПИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ МАЛО-ПАТОМСКОГО РУДНОГО УЗЛА НА ПРИМЕРЕ ИЛЬИНСКОЙ ПЛОЩАДИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Приводятся предварительные результаты полевого этапа поисковых работ на коренное золото в пределах южной части Мало-Патомского рудного узла. Дается характеристика основных предпосылок и критериев прогнозно-поисковой модели оруденения, характера и степени их проявленности, моделируется геолого-промышленный тип оруденения.

Ключевые слова: золото, прогноз, березитизация, черносланцевый тип, золотокварцевый тип.

Территория северо-восточной части Байкало-Патомского синклинория, которой соответствует площадь Патомско-Нечерской благороднометалльной минерагенической зоны, остается на текущий момент весьма слабо изученной, значительно уступая Мамско-Бодайбинской

зоне. Несмотря на широкое развитие в пределах участка крупных и средних россыпных месторождений, в пределах которых ведется старательская добыча, поисковые работы на коренное золото в пределах региона практически не проводились. Одним из наиболее перспективных участков территории является площадь водораздела рек Нирунда, Мал. Патом, Молбо и Жуя в северо-восточной части зоны, где оруденение оконтурено в так называемый Мало-Патомский (Нечеро-Жуинский) рудный узел, в пределах которого выявлены более пятнадцати рудопроявлений и пунктов минерализации с содержаниями золота от 1 до 5 г/т.

Коренное золотое оруденение с сопутствующими Ag, Pb, Cu, Hg относится преимущественно к так называемому золотокварцевому малосульфидному типу и характеризуется приуроченностью золота в основном к стратифицированным или крутопадающим жилам и сериям жил кварц-карбонат-сульфидного состава, имеющим незначительную мощность и редко прослеживаемым по простиранию. В рамках поисковых и детализационных работ масштаба 1 : 50 000 и 1 : 200 000 основное внимание геологов было направлено именно на выявление данных образований. В то же время характер геологического строения территории и полученные на сегодня данные о критериях и признаках благороднометалльного оруденения территории позволяют предполагать перспективы выявления здесь и более продуктивных черносланцевых стратиформных руд.

По А. И. Иванову [3], оруденение территории относится к так называемому дальнотайгинскому типу, сформированному в обстановке линейных складчатых комплексов, в рифей-вендских отложениях фации континентального склона. Характерной особенностью территории является и отсутствие на дневной поверхности рудомобилизирующих гранитоидов и гранитокупольных структур, наличие которых на глубине предполагается по геофизическим данным.

Одним из наиболее перспективных в пределах площади является участок водораздела рек Ильинский и Жуя в южной части территории, где ранее были установлены высококонтрастные (до 0,6 г/т) литохимические аномалии золота и известны четыре пункта минерализации с содержанием Au до 1,5 г/т.

В геологическом строении участка основную роль играют отложения 2-й и 3-й подсвит баракунской свиты, сложенной черными углеродистыми известняками и конгломератами, а также углеродистые сланцы валюхтинской свиты, выступающие как потенциально рудовмещающие для оруденения. Венчает разрез пачка мергелей и глинистых известняков никольской свиты.

На площади выделяется серия региональных складок северо-восточного простирания с пологим падением зеркала складчатости на северо-восток. Для складок характерна выраженная ундуляция, а сам участок располагается в замковой части центриклинальной складки 2-го порядка на участке воздымания шарнира.

В рамках полевых работ сотрудники Жуинской партии Центра прогнозно-металлогенических исследований ФГБУ «Институт Карпинского» провели детальные работы на участке в верховьях р. Ильинский. Было установлено, что потенциальное оруденение характеризуется сложным стратифицированным и линейно-ориентированным характером при общей закономерной приуроченности к углеродистым породам валюхтинской свиты. В соответствии с существующими прогнозно-поисковыми моделями оруденения территории [3–5] в качестве его основных предпосылок при полевых работах принимались:

1. Зоны кварц-карбонат (Fe-Mn карбонат)-серицит-мусковитовых метасоматитов;
2. Зоны наложенной сульфидизации (пирит, пирротин, реже халькопирит);
3. Участки наложенной полосчатости (пространственно совпадающие с ореолами гидротермально-метасоматических образований);
4. Литологические разновидности массивных и тонкослоистых черных сланцев валюхтинской свиты;
5. Наложённые зоны гипергенных преобразований;
6. Зоны наложенной трещиноватости и рассланцевания близ ядерных частей складок 2-го и 3-го порядка;
7. Кварцевые жилы нескольких генераций (субсогласные напластованию и субвертикальные, крутопадающие).

В результате было установлено, что ореолы гидротермалитов и сульфидизации имеют двойственный характер, с одной стороны, закономерно формируя ореол, субсогласный общему напластованию пород, а с другой, приуроченный ядерной частью к линейным зонам северо-восточного и субширотного простирания. Ядерной части ореола гидротермалитов пространственно соответствуют участки развития сульфидизации и анкеритизации, а также участки объемного и прожилкового окварцевания. При этом кварцевые жилы формируют обособленные тела, пространственно сопряженные с ореолами метасоматитов, однако, судя по положению развалов, формируют серии, приуроченные к мелким разрывам северо-западного простирания в центральной и западной частях участка. В результате на площади (40 км²) оконтуриваются четыре участка с максимальной степенью проявленности признаков оруденения, рекомендуемые к дальнейшей детализационной заверке.

Важно отметить, что расположенная ниже по течению россыпь (полностью отработана в 1995 г.), в пределах которой суммарно добыто более 1,2 т при среднем содержании 0,571 г/т, пространственно приурочена к участку размыва рудовмещающих отложений. Золото россыпи хорошо окатанное, пластинчатое и комковатое. При этом, если в материалах предшественников [1, 2] указывается на крупный размер золота, то, по устному заявлению старателей, работавших на участке в 1994–1995 гг., золото преимущественно мелкое и пластинчатое.

Таким образом, предварительные полевые данные с учетом характера морфологии золота могут указывать на то, что в пределах участка развито не только золотокварцевое, но и куда более перспективное золотосульфидное в черносланцевых и песчано-сланцевых толщах оруденения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 – Бодайбо. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. – 612 с. + 7 вкл. (Минприроды России, Роснедра, ФГУП «ВСЕГЕИ», ФГУНПП «Иркутскгеофизика»).
2. Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Бодайбинская, лист О-50-Х. Объяснительная записка. – М. : Недра, 1968. – 57 с.
3. Иванов А. И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы) – изд. 2.е, стереотипное – М. : ФГУП ЦНИГРИ, 2017. – 215 с.
4. Константинов М. М., Нарсеев В. А. Многофакторные прогнозно-поисковые модели золоторудных месторождений. – М. : ЦНИГРИ, 1989. – 120 с.
5. Курбанов Н. К., Арифуров Ч. Х., Кучеровский П. Г. [и др.] Геолого-генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах // Руды и металлы. – 1994. – № 2. – С. 55–69.

Корякин В. А. (korvas.perm@gmail.com), Богуславский М. А. (mikhail@geol.msu.ru)

МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

МИНЕРАЛОГИЯ И ХИМИЗМ ГРАНАТОВ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НАСЕДКИНО (УРЮМСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ, ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Минералого-петрохимические исследования гранатов месторождения Наседкино (Урюмское рудное поле) выявили зональные уграндитовые гранаты (Gr_{S50-80}Adr₁₅₋₄₅). СЭМ-EDS (82 анализа) установил два типа гранатов: пиральспитовые альмандины гнейсов и скарновые Gr_s→Adr. Составы гранатов отвечают описываемым составам для скарновых золотых и медных месторождений [4]. Предположительные температуры образования руд могут находиться в диапазоне T = 450–650 °С.

Ключевые слова: гранаты, золото, медь, скарн, Наседкино.

Месторождение Наседкино входит в Могочинско-Карийский золоторудный район, расположенный в пределах так называемой «архейской глыбы» восточного Забайкалья [2]. Эта архейская глыба представляет собой крупный выступ древних ультраметаморфизованных пород – пироксен-гранатовых и калишпат-плагиоклазовых гнейсов. Глыбу пересекают интрузии различного возраста, преимущественно позднепалеозойские и юрские граниты, граносиениты и сиениты, хотя встречаются также архейские гранитогнейсы, габбронориты и позднепротерозойские кислые интрузии. В позднеюрское время здесь развивался интенсивный вулканизм, в результате которого поверхность архейской глыбы частично покрыта диорит-порфирами и кислыми интрузивами.

Основные рудовмещающие породы золоторудного месторождения Наседкино (Урюмское рудное поле) представлены «скарноидными» образованиями, наиболее интенсивно развитыми в зонах пересечения субмеридиональных и субширотных разломов. Скарноподобные метасоматиты приурочены к контактовым зонам даек кислого и среднего состава (микродиориты, диорит-порфиры, сиениты) с вмещающими архейскими гнейсами Могочинского выступа. Золоторудная минерализация реализована висмут-теллур-свинцовой ассоциацией, локализованной преимущественно в известково-скарновых образованиях [1, 2]. Минералогический парагенезис «скарноидов» включает гранаты андрадит-гроссулярового ряда ($\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2[\text{SiO}_4]_3$), хлорит, эпидот, реже пироксен и волластонит. В рамках минералого-петрохимических исследований в целях интерпретации генезиса скарновых образований выполнен электронно-зондовый микроанализ (ЭЗМА) химического состава гранатов на Superprobe JXA-8230 (JEOL, Япония) с энергодисперсионной спектроскопией (EDS). Для интерпретации анализов данных граната в мас. % элементов был использован метод А. J. Losock [3]. Обработано 9 препаратов, выполнено 82 точечных анализа элементного состава гранатовой фазы.

В результате исследований установлена характерная зональность скарнового граната, определяемая чередующимся соотношением андрадит-гроссуляровых компонентов. В единственном препарате из вмещающих пород гранат представлен альмандином. Указанный препарат содержит брекчированные петельчатые агрегаты граната с зазубренными реакционными каймами кристаллоблобов (рис. 1), сцементированные хлоритом, свидетельствующими о коррозионных процессах. Зональность в традиционном понимании отсутствует, поэтому объектом анализа являлись ядерные зоны обломков граната. ЭЗМА выявил пиральспитовые составы Alm_{63-77} (рис. 2), что аргументирует метаморфический генезис данной фазы с источником вещества в виде алюминий-железистых пород.

Для скарновых гранатов характерен химический состав ряда андрадит–гроссуляр $\text{Ca}_3\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]_3\text{--Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$. Для данных гранатов характерна субидiomорфная структура и облик в виде идиоморфных правильных 6-угольников с тонкополосчатой текстурой. Во всех наиболее зональных гранатах наблюдается обратная зависимость содержания трехвалентного железа и алюминия. Ядро граната представлено > 60 % андрадитом, затем волнообразное выравнивание в сторону гроссуляра, иногда доходя до соотношения 1 : 1. Так, например, на рис. 3 представлен типичный зональный гранат из известкового скарна (обр. 038-3), а на рис. 4 – диаграмма, отражающая изменчивость соотношения Al^{3+} и Fe^{3+} .

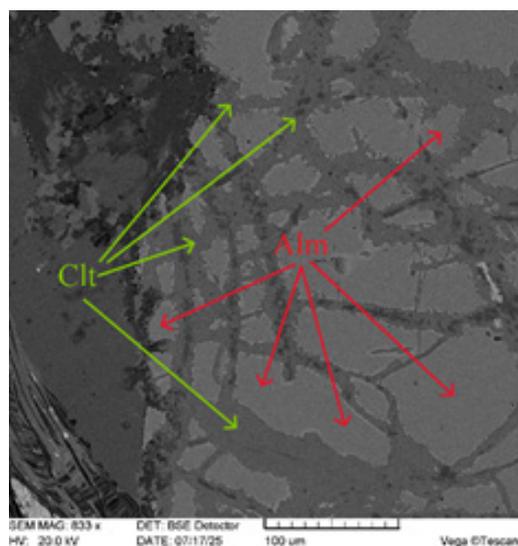


Рис. 1. Петельчатый гранат из образца 013-116,5: Alm-альмандин, Clt- хлорит

Анализ зональности граната показал, что химическая изменчивость характерна для двух элементов: Al^{3+} и Fe^{3+} . Данные элементы имеют обратную зависимость, что связано с изменением химического состава гидротермального раствора и кристаллизацией рудных минералов. Так, в ядре гранат наиболее сбалансирован и представлен гроссуляр-андрадитом в соотношении 1 : 2. Далее гранат обогащается трех-

валентного железа и алюминия. Ядро граната представлено > 60 % андрадитом, затем волнообразное выравнивание в сторону гроссуляра, иногда доходя до соотношения 1 : 1. Так, например, на рис. 3 представлен типичный зональный гранат из известкового скарна (обр. 038-3), а на рис. 4 – диаграмма, отражающая изменчивость соотношения Al^{3+} и Fe^{3+} .

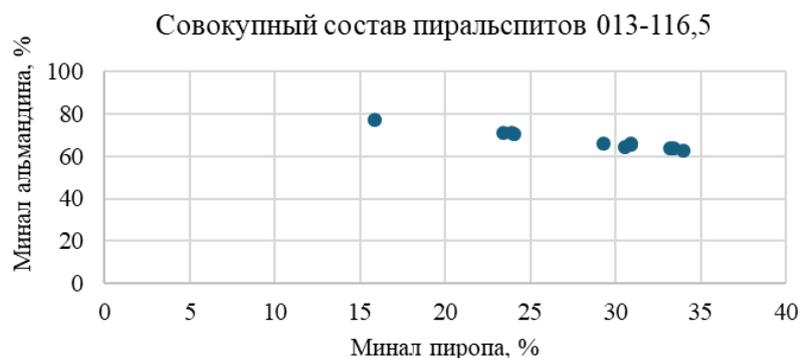


Рис. 2. Диаграмма минерального состава гранатов из образца слабоизмененного гранат-плагноклазового гнейса

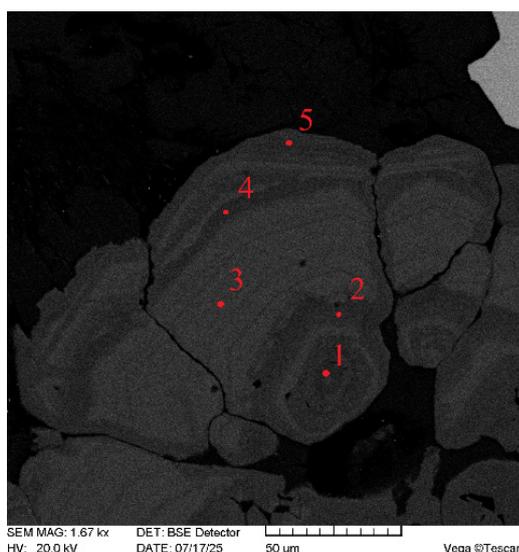


Рис. 3. Точки анализа скарнового граната в образце 038-3

валентным железом вплоть до 100 % андрадита. По мере движения к периферии состав гранатов изменится в сторону гроссуляр-андрадитового состава, соответствуя изначальному соотношению 1 : 2, а на самой кайме соотношение меняется к 1 : 3 (рис. 5). Стоит отметить, что наиболее мощная зона представлена 100 % андрадитом с тонкополосчатой текстурой.

На треугольной диаграмме минерального состава гранатов (см. рис. 5) для золотоносных и меденосных скарнов замечено, что присутствует андрадит-гроссулярный тренд. Согласно ранее приведенным данным, пиральспиты связаны с вмещающими породами. На это указывает расположение на разрезе, отсутствие зональности, брекчирование. Материнские гранаты встречены лишь в одном образце и представлены альмандинами. Скарновые гранаты образуют четкую ассоциацию. Большая часть гранатов находится в поле андрадита, лишь изредка пересекая 50 % гроссуляра. Местоположение на разрезе соответствует их природе, так как «скарноиды» буквально зажаты между вмещающими слабоизмененными гнейсами и магматическими кислыми породами. Диаграмма соотношения зон показывает, что большая часть гранатов расположена на пересечении зон медных и золотых скарнов, однако практически все они занимают ~ 100 % зоны медных скарнов. Особое внимание привлекает мини-тренд: в каждом препарате присутствуют гранаты, попадающие исклю-

ответствует их природе, так как «скарноиды» буквально зажаты между вмещающими слабоизмененными гнейсами и магматическими кислыми породами. Диаграмма соотношения зон показывает, что большая часть гранатов расположена на пересечении зон медных и золотых скарнов, однако практически все они занимают ~ 100 % зоны медных скарнов. Особое внимание привлекает мини-тренд: в каждом препарате присутствуют гранаты, попадающие исклю-

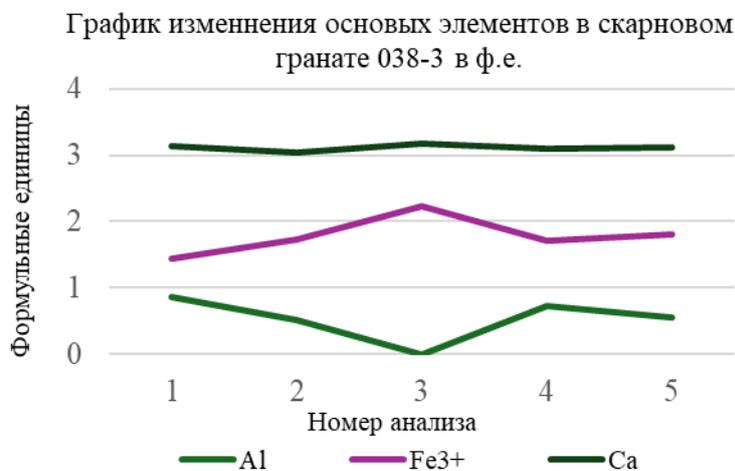


Рис. 4. График изменения основных элементов гранатов гроссуляр-андрадитового ряда в образце 038-3

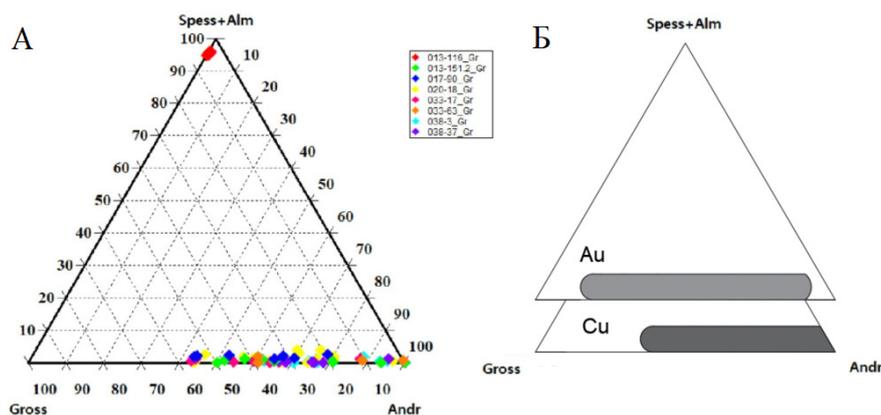


Рис. 5. Расположение составов гранатов (А) в скарнах на месторождении Наседкино; расположение зон соответствия химического состава медных и золоторудных скарновых месторождений [4] (Б):

А – цветными ромбами отображено соответствие анализа препарату; Б – представлены: Au – зона золоторудных скарнов и Cu – зона меденосных скарнов, согласно L. D. Meinert [4]

чительно в зону медных скарнов (без пересечения с золотой зоной) (см. рис. 5). Эта устойчивая ассоциация может служить индикатором меденосности скарнов.

Проведенный детальный химико-минералогический анализ гранатов уграндитового ряда $\text{Ca}_3(\text{Al,Fe}^{3+})_2[\text{SiO}_4]_3$ выявил выраженную зональность, контролируемую изоморфным замещением $\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$ в октаэдрических позициях. На треугольной диаграмме Grs–Andr–Alm+Spess показан тренд, отражающий разнообразие скарновых гранатов. Зональность скарновых гранатов отражена в Al-гроссуляровых ядрах и периферийных Fe-андрадитовых каймах, что свидетельствует о температурно-химической эволюции метасоматита ($T = 450\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$, $f\text{O}_2 \uparrow$). Скарновая природа минерализации подтверждена не только химизмом уграндитов ($\text{Grs}_{50\text{--}80}\text{Andr}_{15\text{--}45}$), но и парагенезисом (хлорит, эпидот, пироксен, висмут-теллуриды), а также структурной позицией в зоне пересечения субмеридиональных и субширотных разломов Урюмского поля. Составы гранатов согласуются с диаграммой L. D. Meinert, где Au-Cu-скарны занимают практически все поле пересечений (см. рис. 5), за исключением чисто медных скарнов, что неоднозначно указывает на медную специализацию. Положение точек в медно-золотой зоне частично расходится с рудной специализацией месторождения ($\text{Au} \gg \text{Cu}$), однако доминирование Ca-Mg- Fe^{3+} уграндитов однозначно указывает на скарновый генезис оруденения Наседкино.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаяев М. Ю. Скарны и апоскарновые метасоматиты Урюмского рудного узла: Северо-восточное Забайкалье : специальность 04.00.08 : автореф. дис. на соискание учен. степени кандидата геол.-минерал. наук / Коротаяев Михаил Юрьевич. – М. : МГУ, 1980. – 244 с.
2. Лейфман Е. М., Кирилук В. П., Сиворонов А. А. [и др.] Объяснительная записка к геологической карте N-50-XXIV. – Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1965. – 37 с.
3. Locock A. J. An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets // Computers and Geosciences. – 2008. – V. 34, № 12. – P. 1769–1780. DOI:10.1016/j.cageo.2007.12.013
4. Meinert L. D. Skarn and skarn deposits // Economic Geology, 1st Decade of the 20th Century, v. 100th Anniversary Volume. – 1992. – P. 301–391.

**Кочкин И. А.¹ (iakochkin@yandex.ru), Устинов С. А.¹ (stevesa@mail.ru),
Чепчугов А. М.² (chepchugov@vims-geo.ru), Свечеревский А. Д.¹ (alexey@svecherevskiy.ru),
Петров В. А.¹ (vlad243@igem.ru)**

¹ ИГЕМ РАН, г. Москва; ² ВИМС, г. Москва

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУР ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ТУЮКАНСКОГО ЗОЛОТО-УРАНОВОГО РУДНОГО УЗЛА

Применение специальной методики микроструктурного анализа вмещающих горных пород Туюканского рудного узла позволило реконструировать этапы эволюции рассматриваемой территории и установить их взаимосвязи с параметрами напряженно-деформированного состояния на предполагаемый период рудообразования.

Ключевые слова: специальная методика микроструктурного анализа, микроструктуры, напряженно-деформированное состояние, уран, Туюканский рудный узел, Тонодское поднятие.

Традиционный микроструктурный анализ, основанный на построении стереографических диаграмм ориентировок и выделении R-, S- и В-тектонитов [2], характеризуется рядом принципиальных ограничений. Основная сложность его применения обусловлена необходимостью использования четырехосного столика Федорова, трудоемкостью сбора и интерпретации значительных массивов данных. Другой проблемой данного подхода является отсутствие независимых методов верификации полученных результатов, которые не позволяют достоверно идентифицировать последовательность смены параметров различных наложенных в пространстве и во времени напряженно-деформированных состояний (НДС). Также возможности интерпретации полученных результатов сильно зависят от степени анизотропии горных пород и геологической среды в целом. Все вышеперечисленное не позволяет провести достоверное сопоставление результатов реконструкции параметров НДС на различных масштабных уровнях.

Для решения обозначенной задачи на основе использования специальной методики микроструктурного анализа и авторского программного обеспечения применен уникальный подход к изучению процессов миграции флюидов в неоднородном поле напряжений-деформаций [6]. В качестве флюидопроводящих каналов и микроструктурных индикаторов рассмотрены различные генетические типы микротрещин, формирование которых является следствием деформаций, характеризующих определенный структурный этап эволюции массивов горных пород, вмещающих месторождения полезных ископаемых.

В качестве объекта исследования выбран Туюканский рудный узел (ТРУ) и урановое месторождение Туюкан (Иркутская область, Мамско-Чуйский район). Тонодское поднятие, в пределах которого расположен объект исследования, локализовано в пределах Центрально-Азиатского подвижного пояса вблизи юго-восточной границы Сибирской платформы и, по данным государственной геологической карты масштаба 1 : 1 000 000 (лист О-49), относится к Байкало-Вилуйской окраинной плитно-коллизийной области. Эта область, по мнению исследователей, является значительно переработанной частью фундамента плитного комплекса Сибирской платформы и включает в себя Байкало-Патомскую композитную перикратонную взбросо-надвиговую систему, которая состоит из тектонически совмещенных коллизийными процессами линейных блоков дорифейского фундамента и реликтов Прибайкало-Патомского перикратонного прогиба с рифейским параплитным комплексом [4].

Прибайкальско-Патомская краевая (перикратонно-надвиговая) система представляет собой ансамбль тектонически совмещенных коллизийными процессами линейных блоков – краевых выступов дорифейского основания (фундамента) и реликтов перикратонного прогиба с рифейскими параплитными комплексами.

ТРУ относится к Чуйско-Тонодской редкометалльно-уран-золото-железородной металлогенической зоне, включающей два рудных района – Тонодский в границах Тонодского поднятия и Витимский в зоне перехода от Чуйского к Тонодскому поднятию. Главные полезные ископаемые ТРУ – золото и уран. Второстепенное значение имеют объекты олова, а также вольфрама и бериллия. Оруденение Чуйско-Тонодской металлогенической зоны отличает длительная история формирования и нередко унаследованное проявление в определенных геолого-структурных обста-

новках. Раннекарельская эпоха связывается с процессами протоконтинентального рифтогенеза и формирования зеленокаменных поясов в горст-антиклинальных структурах краевых поднятий. Со средне-позднерифейскими и палеозойской эпохами тектономагматической активизации связаны большинство проявлений олово-вольфрамового, золотого и уранового оруденения [3].

Главным рудным объектом территории является урановое месторождение Туюкан, которое залегает среди дезинтегрированных и интенсивно измененных гранитов Кевактинского массива (PR₁) с ксенолитами пород албазинской и михайловской свит. Рудоконтролирующее значение имеют субширотные тектонические нарушения, субпараллельные границе выходов отложений нижнерифейского чехла (пурпольской свиты) и, вероятно, маркирующие древнюю линейную кору выветривания.

Необходимым условием для реализации любой методики микроструктурного анализа является отбор ориентированных в пространстве образцов и их строгая фиксация в процессе обработки каменного материала (изготовление ориентированных шлифов, аншлифов и т.д.).

Ориентированные образцы всех разновидностей вмещающих пород отбирались из канав, пройденных в пределах ТРУ в период с 2022 по 2023 гг. Далее из образцов в ИГЕМ РАН изготовлены ориентированные шлифы общим объемом 107 штук.

Следующим этапом было получение фотопанорам ориентированных шлифов с высоким пространственным разрешением для микроструктурного картирования. Далее применялся метод линейной направленной фильтрации изображения по четырем основным направлениям: С-Ю к 0°, СВ-ЮЗ к 45°, В-З к 90°, СЗ-ЮВ к 135°. Эта операция выполнялась для повышения качества автоматизированного выделения микроструктур, так как позволяет подчеркнуть структурные неоднородности горной породы. Автоматическая оцифровка микротрещин осуществлялась посредством применения модуля LINE программного обеспечения PCI Geomatica. Пороговые значения для выделения трещин подбирались исходя из серии экспериментальных тестов с верификацией качества маркируемых микрообъектов.

Для реконструкции параметров НДС на микроуровне, кинематики основных систем микротрещин, на основе интерпретации выделенных микроструктур рассмотрены наиболее распространенные тектонофизические модели формирования парагенезиса опережающих трещин магистрального разлома в зоне сдвига. П. Л. Хэнкок приводит наиболее полную сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва и после его формирования [8]. Поэтому данная модель, как наиболее комплексная, использовалась для интерпретации пространственного положения выявленных микроструктур в целях реконструкции ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определения направлений сдвигового перемещения по структурам (правый или левый) и воссоздания геодинамической обстановки формирования микроструктур (сжатия или растяжения). Рассматриваемая модель лежит в основе авторского программного обеспечения «Lineament Stress Calculator» – LSC (автор А. Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН), которое применялось для тектонофизической интерпретации закартированных микроструктур [5].

В результате комплексного микроструктурного и петрографического анализа установлено, что эволюция трещинно-порового пространства изучаемой территории контролировалась несколькими этапами тектогенеза, зафиксированными в породах, независимо от их минерального состава и петрографического типа, но в прямой зависимости от характера деформаций. Породы отнесены к различным типам тектонитов (милонитам, бластокатаклазитам, катаклазитам) и несут следы интенсивных эпигенетических изменений.

Пространственный анализ плотности микроструктур и реконструкция палеонапряжений позволили выделить различные этапы тектономагматической активизации. Главный этап, который наблюдается в большинстве изученных образцов, характеризуется субширотной ориентировкой (90–100°) оси максимального сжатия, при этом ось максимального растяжения имеет субмеридиональное простирание (0–10°). Данная ситуация, наиболее вероятно, отвечает этапу аккреции террейнов Байкальской складчатой области к Сибирскому кратону (поздний докембрий). Полученные на микроуровне результаты полностью согласуются с результатами реконструкции параметров регионального НДС [1, 7]. Данный факт говорит о глубокой унаследованности структур и процессов деформаций на различных масштабных уровнях.

При детальном анализе микроструктур, помимо главного этапа тектогенеза, установлены признаки последующей активизации, выразившейся в развитии субширотных трещин отрыва, заложившихся в ходе аккреционно-коллизийных процессов позднего докембрия. В последующем по этим нарушениям проявились сдвиговые деформации, характеризующиеся левосторонней кинематикой, соответствующие полю напряжений с северо-восточной ориентировкой оси максимального сжатия и северо-западной оси максимального растяжения. Данный этап деформаций, вероятно, относится к постколлизийной стадии и связан с раннепалеозойской тектономагматической активизацией региона.

Кроме того, на микроуровне обособляется этап, для которого характерна север-северо-восточная ориентировка оси максимального сжатия ($20-30^\circ$) и запад-северо-западная оси максимального растяжения ($280-290^\circ$). Преобладающий тренд микроструктур данного этапа имеет восток-северо-восточное простирание ($70-80^\circ$) и кинематически выражен левыми сдвигами. Помимо прочего, выделен этап, имеющий зеркальную ориентировку упомянутых выше осей напряжений с развитием правых сдвигов по магистральным субширотным микроструктурам. Указанные деформационные обстановки установлены преимущественно в милонитах, что свидетельствует об их формировании в условиях пластических деформаций. Оба этапа, вероятнее всего, также являются постколлизийными и могут быть соотнесены с проявлениями надвиговых дислокаций.

Проведенная реконструкция палеонапряженных состояний и этапов тектогенеза создала детальный структурный каркас для понимания эволюции трещинной пористости и проницаемости во вмещающих породах ТРУ. Однако для перехода от модели деформаций к модели рудообразования необходима прямая увязка выделенных микроструктурных генераций с вещественным составом их заполнения, в особенности с рудными компонентами. В этой связи дальнейшие исследования будут направлены на комплексный анализ вещества, ассоциированного с микротрещинами.

Основным направлением станет интеграция минералого-геохимических методов с полученными микроструктурными данными. Планируется проведение детального петрографического и минераграфического изучения ориентированных шлифов с целью установления парагенетических последовательностей минералов, выполняющих трещины разных систем и ориентировок. Ключевая роль будет отведена методам локального химического анализа. С помощью растровой электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией будут идентифицированы рудные минералы (например, настуран, золото, сульфиды) и установлена их пространственная и генетическая связь с конкретными генерациями микроструктур.

Для визуализации пространственного распределения элементов-индикаторов оруденения, таких как уран, золото, мышьяк и сера, будет применен микрорентгенофлуоресцентный анализ. Это позволит создать геохимические карты, наложенные на схемы плотности и ориентировок микротрещин, и объективно выявить корреляцию между аномалиями содержаний полезных компонентов, а также определенными деформационными этапами. Дополнительным источником информации послужит изучение вторичных флюидных включений, что даст данные о физико-химических параметрах флюидов, циркулировавших по установленным микротрещинным системам.

Такой комплексный подход позволит перейти от абстрактной геодинамической к конкретной рудогенетической модели. Он даст возможность определить, какие именно из реконструированных деформационных событий привели к формированию наиболее проницаемых каналов, служивших путями миграции рудоносных растворов, и в каких структурных ловушках происходила аккумуляция урановой и золотой минерализации. В конечном итоге, данное исследование обеспечит вещественное обоснование связи между коллизийными и постколлизийными этапами тектогенеза и эпохами формирования оруденения в Туюканском рудном узле, что является критически важным для разработки научно обоснованных прогнозно-поисковых критериев.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочкин И. А., Устинов С. А., Чепчугов А. М., Петров В. А. Реконструкция параметров сдвиговых полей напряжений на основе анализа микроструктурных индикаторов в ориентированных шлифах вмещающих пород Тууюканского рудного узла // Рудная школа ЦНИГРИ 2025. Сборник тезисов докладов. – М. : ЦНИГРИ, 2025. – С. 50–52.
2. Лукин Л. И., Чернышев В. Ф., Кушнарев И. П. Микроструктурный анализ. – М. : Наука, 1965. – 124 с.
3. Макарьев Л. Б., Миронов Ю. Б. Особенности металлогении и перспективы промышленной ураноносности Чуйско-Тонодской минерагенической зоны северного Забайкалья (по материалам ГК-1000/3 и ГДП-200/2) // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 57. – С. 87–94.
4. Митрофанова Н. Н., Болдырев В. И., Коробейников Н. К., Митрофанов Г. Л. [и др.] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. – 607 с.
5. Свечеревский А. Д., Устинов С. А., Лапаев Д. С., Петров В. А. Реконструкция параметров сдвиговых напряжений при формировании разноранговых разломов западного Прибайкалья на основе тектонофизической интерпретации линеаментов // Физика Земли. – 2025. – № 2. – С. 95–113. DOI: 10.31857/S0002333725020085.
6. Устинов С. А., Петров В. А. Теоретические основы и возможности применения специальной методики микроструктурного анализа // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 125–131.
7. Устинов С. А., Петров В. А., Андреев А. А., Свечеревский А. Д., Кочкин И. А., Шухов В. В. Интерпретация линеаментов в пределах западной части Байкало-Патомского пояса с применением мультимасштабного тектонофизического подхода в контексте прогноза рудообразующих систем // Георесурсы. – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 83–106. DOI: 10.18599/grs.2025.4.7.
8. Hancock P. L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of structural geology – 1985. – V. 7. – № 3/4. – P. 437–457.

Краденов П. К. (Pavel_Kradenov@karpinskyinstitute.ru),

Леонтьев В. И. (Vasilij_Leontiev@karpinskyinstitute.ru)

Институт Карпинского, г. Санкт-Петербург

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЗОЗОЙСКИХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ЮЖНОГО УРАЛА, ПЕРСПЕКТИВНЫХ НА РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ

Месторождения ионно-адсорбционного типа редкоземельных металлов (РЗМ) являются главным источником тяжелых РЗМ и Y в мире. Экономические примеры месторождений расположены исключительно на юге Китая и в Мьянме и приурочены к полям развития гранитных пород. Однако в России, а именно на территории Среднего и Южного Урала, присутствуют все предпосылки для выявления данного типа месторождений.

Ключевые слова: ионно-адсорбционный тип месторождений редкоземельных металлов, кора выветривания, кислый магматизм, гранитоиды, щелочно-карбонатитовые породы.

Ионно-адсорбционный тип месторождений редкоземельных металлов (ion-adsorption REE deposits, также известны как regolith-hosted REE deposits) – главный источник тяжелых редкоземельных элементов (HREE) и иттрия в мире. Экономические примеры месторождений расположены исключительно на юге Китая и в Мьянме и приурочены к полям развития гранитных пород. Эти месторождения получили название ионно-адсорбционных, поскольку коры выветривания гранитоидов содержат порядка 50 % REY (REE + Y) в ионообменном виде.

После открытия в 1969 году в провинции Цзянси месторождения Лонган на юге Китая было открыто более двухсот месторождений редкоземельных элементов (REE) ионно-адсорбци-

онного типа. Позже объекты подобного типа были установлены и за пределами Китая – на Мадагаскаре, в Юго-Восточной Азии, Африке, Северной и Южной Америке.

Ионно-адсорбционные руды не требуют дробления, измельчения и других видов обогащения, а REE легко извлекаются путем ионного обмена с использованием разбавленного электролита (к примеру, раствора сульфата аммония) при комнатной температуре. Такой металлургический процесс позволяет экономически эффективно разрабатывать руды с низкими содержаниями. В отличие от других типов месторождений REE, руды обычно имеют низкие содержания U и Th.

О ресурсах и запасах ионно-адсорбционных месторождений Китая доступны ограниченные данные. Объекты меньше, чем REE месторождения, ассоциированные с карбонатитами или ультращелочными породами, поскольку рудные тела приурочены к приповерхностным продуктам гипергенеза. Запасы ионно-адсорбционных месторождений классифицируются на крупные ($> 0,5$ млн т), средние (0,05–0,5 млн т) и мелкие ($< 0,05$ млн т). В Южном Китае установлено всего несколько крупных REE месторождений, однако число мелких и средних достигает двух сотен. Мощность коры выветривания в среднем составляет 6–10 м, однако локально может достигать 30 и редко 60 м. Рудоносные коры развиваются в основном по известково-щелочным гранитоидам и менее – по щелочным гранитам, фельзитическим вулканическим породам и метаморфическим породам, включающим филлиты. Месторождения содержат более 50 % ионообменных REY, которые преимущественно адсорбированы на поверхность глинистых минералов, таких как каолинит и галлуазит. Содержание REY в невыветрелых гранитоидах составляет от 110 до 590 ppm. Содержание REY в ионно-адсорбционных рудах изменяется от 140 до 6500 ppm (обычно ~ 800), причем многие месторождения значительно обогащены HREE [5].

Граниты, выветривание которых привело к формированию месторождений, являются продуктами субдукционного или внутриплитного магматизма. Эти исходные гранитоиды представляют собой биотитовые и/или мусковитсодержащие граниты и характеризуются содержанием $\text{SiO}_2 > 70 \%$, $\text{P}_2\text{O}_5 < 0,08 \%$ и составом от металюминиевых до слабопералюминиевых ($\text{ASI} < 1,1$). Высокодифференцированные ($\text{SiO}_2 > \sim 75 \%$) мусковитовые граниты значительно обогащены REE по сравнению с биотитовыми гранитами и характеризуются, среди прочего, наличием флюорита и гидротермальных минералов, содержащих REE, в частности фторкарбонатов REE, которые образовались в результате гидротермальных изменений. Магматический алланит и титанит либо изменяются с образованием гидротермальных минералов, содержащих PЗЭ, либо почти полностью разрушаются во время выветривания [5].

Выветриваемые минералы, содержащие REE, включая фторкарбонаты, алланит и титанит, являются исходными минералами для ионно-адсорбционных руд. Присутствие легковыветриваемых минералов HREE в гранитах, вероятно, является основным фактором, определяющим наличие залежей богатых HREE руд, хотя химический состав поверхностных вод и выветриваемых пород также может влиять на фракционирование REE в ходе корообразования. Монацит, циркон и ксенотим также присутствуют в гранитах, но поскольку они более устойчивы к химическому выветриванию, они, как правило, не являются источником REE [6].

Минералы, содержащие REE, разлагаются кислыми поверхностными водами на верхних уровнях профиля выветривания, и ионы REE^{3+} перемещаются вниз по профилю. REE переносятся в комплексе с гуминовыми веществами, карбонатными и бикарбонатными ионами или в виде ионов REE^{3+} при почти нейтральном pH от 5 до 9. Ионы REE^{3+} осаждаются из раствора путем адсорбции на вторичных минералах или встраиваются в них. Удаление из водной фазы происходит из-за повышения pH, которое является результатом либо взаимодействия воды с породой, либо смешивания с грунтовыми водами с более высоким pH. REE обычно адсорбируются на поверхностях каолинита и галлуазита из-за их обилия в коре выветривания и точек нулевого заряда. Кроме того, некоторые REE иммобилизованы во вторичных минералах, состоящих в основном из фосфатов, содержащих PЗЭ (например, рабдофан и флоренцит). В отличие от других PЗЭ, которые перемещаются вниз по профилю выветривания, Ce менее подвижен и включается в оксиды Mn и церианит (CeO_2) в качестве Ce^{4+} в приповерхностных окислительных условиях. В результате профиль выветривания месторождений может быть разделен на зону выщелачивания PЗЭ в верхней части профиля с положительной аномалией Ce и зону нако-

пления РЗЭ с ионно-адсорбционными рудами в нижней части профиля, которая характеризуется отрицательной аномалией Се [5].

Месторождения ионно-адсорбционных глин являются типичными месторождениями кор выветривания, а их известные представители территориально расположены в областях экваториального и субэкваториального климата и приурочены к современным гипергенным образованиям. Для России нехарактерно развитие современных кор выветривания, однако на территории страны развиты обширные площади древних кор, сформированных в благоприятных климатических условиях и сохранившихся до наших дней. К этим образованиям приурочены месторождения каолина, бокситов, железных руд и никеля и др. Основные перспективы выявления месторождений REE ионно-адсорбционного типа в России связываются нами с областями развития древних кор выветривания в пределах складчатых областей, характеризующихся обширным проявлением кислого магматизма, в особенности подходящего под параметры гранитоидов эталонных месторождений, таких как Лонган, Хелинг, Гуандун (Китай). В первую очередь интерес представляет территория Среднего и Южного Урала, где подобная минерализация была выявлена предшествующими работами.

Геологосъемочными и поисковыми работами, проведенными на территории Среднего и Южного Урала, был выявлен ряд рудопроявлений редкоземельной минерализации в корах выветривания метаморфических, осадочно-вулканогенных, гранитоидных и щелочно-карбонатитовых пород из различных структурно-формационных зон Урала [1, 3, 4]. Территория Южного и Среднего Урала характеризуется широким развитием остаточных каолиновых кор выветривания, что вкупе с присутствием породных комплексов – потенциальных источников ионов REE – определяет широкие перспективы выявления промышленных месторождений редкоземельных металлов средне-тяжелой группы ионно-адсорбционного типа. Присутствие подобной минерализации подтверждено поисковыми и тематическими работами, проведенными в конце прошлого века. В ходе работ выявлено более 10 перспективных участков с общими прогнозными ресурсами REE и Y, превышающими 500 тыс. тонн [2].

В рамках работ по мониторингу Государственной геологической карты была проведена ревизия и заверка выявленных предшественниками проявлений REE-оруденения ионно-адсорбционного типа на территории Южного Урала. Данные лабораторно-аналитических работ показали повышенные содержания REE в каолиновых корах выветривания, которые достигают в отдельных пробах 3325 ppm.

Месторождения REE ионно-адсорбционного типа являются для России достаточно специфическими объектами и долгое время не рассматривались в качестве потенциальных промышленных источников редкоземельного сырья, в частности из-за их неширокого распространения в мире и достаточно скудной информации по их геологии и строению, имевшейся в открытом доступе на конец прошлого века. Поэтому систематических исследований металлогении подобных объектов практически не проводилось. Исследования имели спорадический характер либо были выполнены в небольших объемах и ограниченными средствами. Накопленный к началу 90-х годов прошлого века фактический материал позволил сформулировать и обосновать перспективы ионно-адсорбционного типа минерализации для территории Южного и Среднего Урала, однако повсеместное сокращение финансирования геологоразведочных работ не позволило развить данную тематику и довести работы до практических результатов. В связи с высоким минерагеническим потенциалом, мировой политической и экономической конъюнктурой территория Южного Урала может стать новым потенциальным высокоперспективным центром добычи РЗМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылин М. Д. Отчет Миасской ГРП о поисковых работах на редкие земли (черчит) на Алтынташском участке в Чебаркульском районе за 1986–1990 годы. Челябинск : Челябинская ГРЭ, 1989.
2. Савельева К. П. Изучение вещественного состава и условий распределения редкоземельных элементов в корах выветривания Южного и Среднего Урала. Екатеринбург : УГСЭ, 1994.

3. Шахов Н. М., Левин В. Я. Отчет о результатах поисковых работ на редкие земли на Тенякском участке за 1993–1996 гг. Екатеринбург : ОАО УГСЭ, 1996.
4. Шахов Н. М. и др. Поисковые работы на Верхнемакаровском участке. Екатеринбург : ОАО УГСЭ, 2000.
5. Kenzo Sanematsu, Yasushi Watanabe. Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits // Economic Geology. – 2016. – V. 18. – P. 55–79.
6. Zhiwei Bao, Zhenhua Zhao. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China // Ore Geology Reviews. – 2008. – V. 33. – P. 519–535.

Краснов Д. А. (dkrasnov@tsnigri.ru), Бажан И. С. (bazhan@tsnigri.ru)
ЦНИГРИ, г. Новосибирск

ИСТОЧНИК АЛЛЮВИАЛЬНОГО ЗОЛОТА НА ТРОИЦКОМ УЧАСТКЕ КУНДАТ-ТАЛАНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (СЕВЕР КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ)

Добыча россыпного золота на Кундат-Талановской площади ведется с середины XIX века и продолжается в настоящее время, однако источник коренного золота, который мог дать богатые россыпи, до сих пор не найден. Для установления закономерностей распространения золотого оруденения и локализации перспективных участков на Кундат-Талановской площади в 2023 г. ФГБУ «ЦНИГРИ» были начаты прогнозно-ревизионные работы.

Ключевые слова: Кузнецкий Алатау, Кундат-Талановская площадь, золото.

Кундат-Талановская площадь расположена в бассейне рек Кундат и Кия, на востоке Кемеровской области, на территории Тисульского района, в 70 км юго-западнее пгт. Тисуль, в северной части Кузнецкого Алатау (рис. 1). Структурно площадь находится восточнее Кузнецко-Алтайского глубинного разлома в Мрасско-Мартайгинской складчатой подзоне Алтае-Кузнецкой складчатой системы. Металлогеническое положение площади определено как территория Кундат-Талановского золоторудно-россыпного узла, Мартайгинского золоторудно-россыпного района [1].

При выполнении работ ФГБУ «ЦНИГРИ» на территории площади были выделены четыре участка: Кундатский, Кундусуюльский, Первомайский и Талановский. Работы включали в себя проведение геологических маршрутов, шлихового опробования, горных работ (шурфы, каналы), а также литохимическое опробование для изучения вторичных ореолов рассеяния методом профилирования в глубинном исполнении.

По итогам шлихового опробования водотоков 1–2 порядка в 2024 г. наиболее высокие на площади содержания золота (до 20 знаков на пробу, в среднем 5–6) выявлены в сухих левых притоках (логах) р. Левотроицкая (рис. 2). На основании полученных результатов был выделен Троицкий участок, на котором в 2025 г. были дополнительно поставлены работы по шлиховому опробованию, геологическим маршрутам и шнековому бурению. Выделенный участок включает долины нижнего течения р. Левотроицкая и крупного левого безымянного притока р. Толунчук. Северная граница участка проходит через устье р. Правотроицкая, а южная ограничена нижним течением р. Толунчук (см. рис. 2).

В плане лога имеют трапецевидную прямую долину всячего типа с V-образным профилем русловой части (рис. 3), с коренными выходами мраморов усинской свиты (C_{1us}) в береговой части. Лога остаются сухими даже после интенсивных осадков. Отличительной чертой является расположение долин логов под тупым углом относительно основного русла р. Левотроицкая. Длина и ширина логов составляют 160–400 и 300–400 м, соответственно. Шлиховое опробование показало, что во всех логах отсутствуют знаки золота выше изолинии 500 м. Обломочный материал шлиховых проб представлен породами усть-анзасской свиты с преобладанием среднеокатанной гальки кремнисто-глинистых лимонитизированных и окварцованных сланцев (35–40 %) и гальки лимонитизированных и метасоматизированных диоритов (20–25 %), в меньшем

того, направление долин совпадает с направлением мелких разломов, секущих долину р. Левотроицкая. Безводный характер логов и вышеперечисленные факты свидетельствуют о том, что лога имеют карстовый генезис, и их образование происходило при формировании рельефа и сопутствующих локальных структурных изменениях.

Источник россыпного золота в логах на Троицком участке может находиться выше по течению на водоразделе р. Левотроицкая и левого безымянного притока р. Толунчук, где согласно геологической карте (см. рис. 2) отмечены серпентинизированные перидотиты и связанные с ними лиственитизированные породы усть-анзасской свиты, также на карте отмечены пункты минерализации золота. Однако знаков золота в аллювиальных шлиховых пробах выше изолинии 500 м обнаружено не было. Это позволяет предположить, что в логах либо сохранились фрагменты коры выветривания палеорельефа, либо источник аллювиального золота находился за пределами Троицкого участка, который по абсолютным отметкам высот ниже всех участков на юге площади. Так, например, описываемые лога могли стать естественными «ловушками» на пути сноса материала, в том числе золотосодержащего, с Первомайского участка в процессе формирования ландшафта площади. Аккумуляции материала в логах происходила в интервале изолиний 450–500 м на правом борту р. Левотроицкая.

Исследование типоморфизма золота и парагенетических ассоциаций в шлиховых пробах имеет важное значение для понимания нахождения источников и направлений сноса золота. Так, например, имеющиеся в нашем распоряжении данные минералогического анализа золота с Кундатского участка площади дают возможность предполагать близкое расположение коренного источника по ряду проб. По мере продвижения работ эти данные будут дополнены результатами с других участков, что позволит сделать более точный вывод об источниках золота в том числе на Троицком участке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45, Новокузнецк. Объяснительная записка. – СПб. : картфабрика ВСЕГЕИ, 2007. – 665 с.
2. Черных А. И. Особенности строения и золотоносности Кундат-Талановского (Кузнецкий Алатау) и Федоровско-Магызинского (Горная Шория) золоторудно-россыпных узлов // Строе-ние литосферы и геодинамика : материалы XXII Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2007. – С. 170–171.

Кулему Л. Т. (laurentthiebokoulemou1999@gmail.com)

СФУ, г. Красноярск

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПРИМЕНЕНИЮ БЕЛИТОВЫХ ШЛАМОВ АЧИНСКОГО ГЛИНОЗЕМНОГО КОМБИНАТА

Нашими исследованиями оценена возможность использования белитовых шламов в народном хозяйстве в качестве пигментов для производства лаков и красок, источника редких и рассеянных и благородных элементов, а также материала (среды), пригодного для улавливания (депонирования) CO₂.

Ключевые слова: белитовые шламы, сырье, минералы, использование.

Введение

Ачинский глиноземный комбинат (ОАО «РУСАЛ Ачинск») был введен в эксплуатацию в 1973 году. Получение глинозема на комбинате осуществляется переработкой нефелиновой руды Кия-Шалтырского месторождения. Отходами производства глинозема является белитовый шлак, который складывается на шламохранилище, расположенном в пойме р. Чулым. Накопленный объем белитового шлама – более 300 млн т – существенно влияет на экологическую обстановку, что определяет актуальность работ по утилизации данных отходов.

Основным реализованным и промышленно значимым направлением использования шламов является производство цемента и строительных материалов. Белитовый шлам активно используется в качестве основного сырья (до 30–35 % шихты) для производства цемента на собственном цементном заводе АГК (Ачинский цементный завод) и других предприятиях. Его добавка позволяет экономить традиционные сырьевые компоненты (известняк, глину) и снижает температуру обжига клинкера. Также шлам применяется для производства силикатного кирпича, ячеистых бетонов (газобетон, пенобетон) и других изделий автоклавного твердения, где он выступает как кремнеземистый компонент. Кроме того, он используется в качестве минерального порошка или добавки при стабилизации грунтов, а также для производства асфальтобетона в дорожном строительстве.

В ограниченных масштабах шлам используется в сельском хозяйстве для производства известковых мелиорантов (удобрений) для химической мелиорации кислых почв, их раскисления и обогащения кальцием, калием и рядом микроэлементов. Также белитовый шлам может использоваться в качестве минеральной кормовой добавки (0,15 %) для птиц, в частности для кур-несушек, так как шлам в рационе птиц способствует повышению эффективности использования питательных веществ корма, увеличению продуктивности, уменьшению затрат корма на единицу продукции и получению мяса и яиц высокого качества. В рамках НИОКР изучалось и, в некоторых случаях, реализовывалось в опытных партиях получение из шлама или с его применением строительной керамики, минеральной ваты, геополимерных вяжущих, глиноземистого цемента.

В рамках поисковых исследовательских работ на кафедре геологии месторождений и методики разведки СФУ белитовые шламы различного срока хранения изучены и оценены на предмет возможности использования в качестве пигментов для красок и лаков, источника редких и рассеянных и благородных элементов, а также материала (среды), пригодного для улавливания (депонирования) CO_2 .

На карте намыва по времени складирования шламы делятся на СВ – свежий шлам (0–5 лет); СР – средний шлам (до 25 лет); СТ – старый шлам – (25–50 лет).

Шламы как возможное сырье для производства пигментов

Фазовые изменения в составе белитового шлама отразились на изменении его свойств в течение времени нахождения в хранилище следующим образом: оттенок цвета тауп варьирует от коричнево-серого до серовато-коричневого по имеющимся пробам шлама.

Опыты по созданию красок на основе пигмента «Тауп АГК» показали возможность получения на их основе клеевой и лаковой основной краски, что приводит к возможности широкого



Рис. 1. Накрасы с использованием пигмента «Тауп АГК»:

1 – свежий шлам; 2 – средний шлам; 3 – старый шлам (Фото Кулему Л. Т., Ли Э. А. Т, Михеев В. Г.)

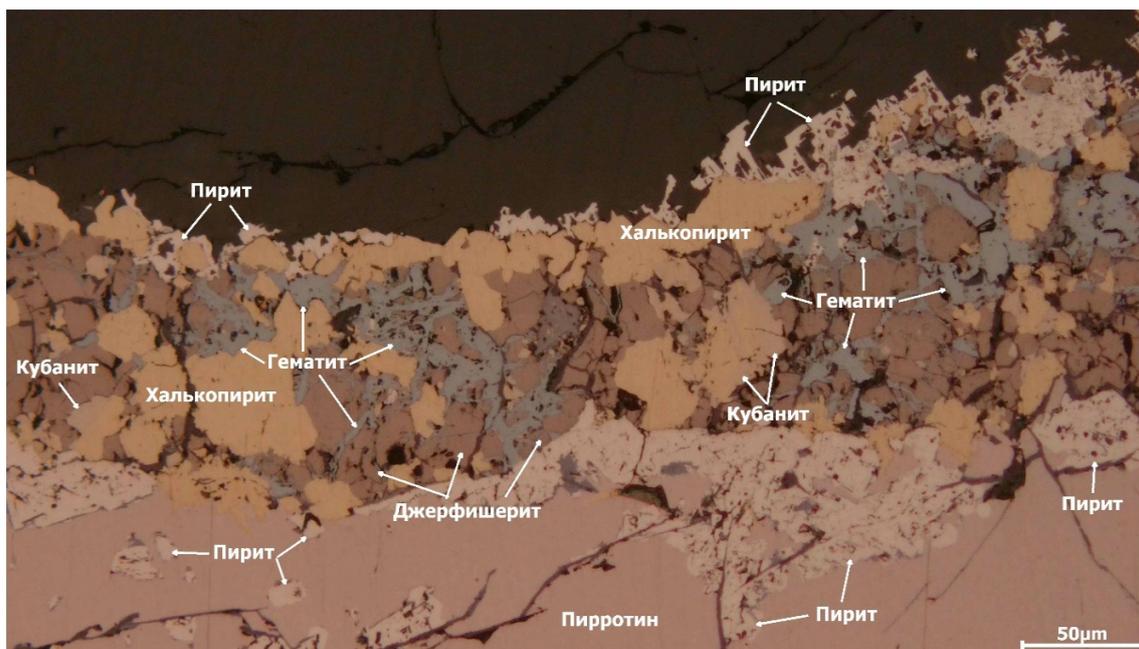


Рис. 2. Замещение простых сульфидов более сложными (фото Шведов Г. И., Кулему Л. Т., 2023)

его применения при строительстве: штукатурка, стены и т.д., окраске деталей из дерева и эмалей по металлу. Масштабы его производства могут соответствовать весьма крупному (сотни миллионов тонн) техногенному месторождению красочного сырья [1].

Нефелиновые сиениты и шламы как носители рудной минерализации

Рудная минерализация (благородные, редкие и рассеянные элементы) изучена в исходных нефелиновых рудах, шламах и оборотных водах глиноземного производства.

В исходных рудах широко представлены оксиды в качестве акцессорных минералов. В образцах руд были найдены титаномagnetит, ильменит, магнетит, гематит. Также они представлены в пробах тяжелой фракции шламов (сильномагнитная фракция).

Из сульфидных минералов в исходной руде встречаются пирротин, пентландит, халькопирит, пирит, марказит, галенит, они составляют основную часть всех рудных минералов. Кроме того, в протолочках из нефелиновых сиенитов встречен леллингит внутри кристаллов кобальтина или герсдорфита в виде мелких, не до конца замещенных, реликтов.

Впервые в сульфидных скоплениях Кия-Шалтырского месторождения обнаружены минералы палладия. В частности, минерал садберит обнаружен в составе агрегата аллоклазита в сростании с галенитом и полярит PdBi.

Также выявлены самородные элементы, которые присутствуют как в рудах, так и шламах. Электрум (Au, Ag) выявлен в составе сульфидной минерализации. Также обнаружен графит (C), зональные зерна которого обрастают пирротин [2].

При анализе порошков исходных руд и шламов на ИК-спектрометре были отмечены пики, указывающие на наличие золота в металлоорганических соединениях, в аминокислотах, тиоцианатах, изоцианатах, псевдогалогенидах. Наличие золота в такой форме говорит о связи золота с органикой, найденной в виде самородного углерода. Помимо золота также зафиксированы германий, вольфрам и алюминий. Работы по изучению форм нахождения металлов в виде металлоорганических соединений продолжаются.

Из рассеянных элементов определенный интерес в отходах глиноземного производства (шламах и оборотных водах) представляют галлий и рубидий. Содержание последнего в отдельных пробах оборотной воды на карте намыва белитовых шламов почти в два раза больше, чем в месторождениях китайских соленых озер, из которых добывают рубидий.

Шламы как среда для депонирования CO₂

В рамках комплексного изучения хранилища белитовых шламов оценена их возможность поглощать углекислый газ из атмосферы в процессе хранения. В исходном минеральном составе шлама преобладают кальциевые силикаты – ларнит, волластонит, кальцит, мервинит.

Установлено, что свежий шлам преимущественно содержит ларнит, волластонит и мервинит. В процессе хранения данные минералы поглощают CO_2 с формированием карбонатов и кремнезема. Реакции протекают в естественных атмосферных условиях зоны складирования шламов.

Скорость реакции зависит от ряда факторов, таких как размер зерен шлама, степень пористости, влажность среды и температура, и увеличивается при большой влажности до 80 %, наименьших размерах зерен и повышенной пористости.

Предварительные данные показывают, что хранилище белитовых шламов может выступать депонирующей средой CO_2 . Расчетные данные показывают, что в атмосферных условиях при достаточной аэрации материала 1 тонна шлама способна поглощать до 300 кг CO_2 .

На данном этапе исследований не завершены экономическая оценка и расчет экологических показателей белитовых шламов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев В. Г., Ли Э. А. Т. Ревизионная геолого-технологическая оценка белитового шлама АГК как минерального красочного сырья. – 2025. – 64 с.
2. Шведов Г. И., Кулему Л. Т. Рудная минерализация Кия-Шалтырского месторождения. – 83 с.

Лейбгам П. Н.¹ (leibham@tsnigri.ru), Вьюкова А. М.¹ (viukova@tsnigri.ru), Бучко И. В.²

¹ ЦНИГРИ, г. Москва;

² АО «Дальневосточное ПГО», г. Хабаровск

ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РУКОСУЕВСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО ПОЛЯ (О. САХАЛИН)

Представлены результаты минералогического и химического (СЭМ, РСМА) исследования рудопроявлений Горбуша, Западная Горбуша, Незаметное и Воронье в пределах Рукоусевского рудно-россыпного поля. Наиболее распространенными рудными минералами являются пирит, арсенопирит и пирротин, реже отмечены сфалерит, халькопирит, галенит и марказит. Самыми малораспространенными рудными минералами являются самородное золото, ульманит, аргентопентландит, касситерит, шеелит и киноварь. Впервые выделены ранняя золоторудная пирит-арсенопиритовая ассоциация и поздняя киноварь-пирит-полиметаллическая.

Ключевые слова: золото, арсенопирит, Рукоусевское поле, Лангерийский узел, Сахалин.

Введение. Рукоусевское золоторудно-россыпное поле (РРП) расположено в центральной части острова Сахалин, в западных отрогах Восточно-Сахалинских гор (рис. 1). С геологической точки зрения объект локализован в центральной части Вальзинского аккреционного террейна, сложенного верхнелангерийским метаморфическим комплексом (K_2-P_1) [1, 2]. Террейн ограничен со всех сторон региональными структурами: с запада Тымь-Поронайским наложенным прогибом (P_2-Q), с северо-востока – Вальзинским взбросом, с юго-востока – Центральным взбросо-сдвигом. Метаморфические толщи прорваны разнотипными магматическими образованиями среднего-кислого состава двухфазного Лангерийского комплекса (P_{2-3}) [1, 3, 4].

В пределах Рукоусевского РРП метаморфический комплекс сложен филлитами, парасланцами и в меньшей степени ортосланцами сложного состава [1]. Магматические образования имеют ограниченное распространение и встречаются преимущественно в центральной части РРП. Они представлены дайками среднего и кислого состава субмеридиональной и северо-западной ориентировки. Магматические породы изменены метасоматическими процессами в разной степени. По результатам полевых наблюдений и лабораторных исследований метасоматиты представлены аргиллизитами, сложенными каолинитом, иллитом и в меньшей степени кварцем, карбонатом, халцедоном. Участки развития аргиллизитов сопровождаются вкрапленными сульфидами и прожилково-жилковыми зонами кварц-сидерит/анкеритового, сидерит/анкеритового или кальцитового состава с сульфидной минерализацией. Детальное описание

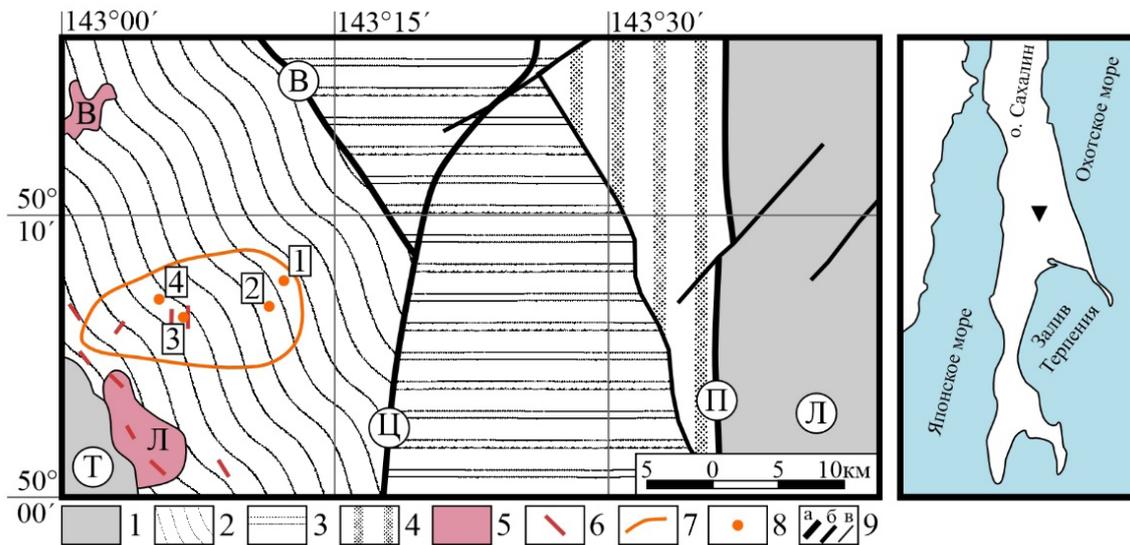


Рис. 1. Геолого-структурная схема центральной части о. Сахалин с положением Рукосуевского РРП, по материалам [1, 2] с дополнениями авторов:

1 – Тымь-Поронайский (Т) и Луньско-Пограничный наложенные прогибы; 2 – Вальзинский аккреционный террейн; 3 – Пиленгский блок; 4 – Рымникский блок; 5 – Лангерийский (Л) и Вальзинский (В) плутоны; 6 – дайки среднего-кислого состава второй фазы Лангерийского комплекса; 7 – Рукосуевское РРП; 8 – рудопроявления золота Горбуша (1), Западная Горбуша (2), Незаметное (3), Воронье (4); 9 – границы: а – главные структурные швы Центральный (Ц), Вальзинский (В) и Прибрежный (П), б – второстепенные, в – геологические границы

метасоматических пород выходит за рамки публикации и будет рассмотрено в дальнейших работах.

На территории Рукосуевского РРП известны россыпные месторождения золота (на р. Лангери, руч. Горбуша, руч. Рукосуев и др.) и несколько рудопоявлений (РП) [1]. В этой работе представлены результаты исследования четырех РП: Горбуша, Западная Горбуша, Незаметное и Воронье (см. рис. 1).

Материалы и методы исследования. Во время полевых работ были отобраны образцы керна скважин с РП Незаметное и Западная Горбуша, а также протолочные пробы и образцы с полотна канав, пройденных на всех четырех РП. В целях изучения минерального состава руд был проведен минераграфический анализ коллекции полированных шлифов и минералогический анализ тяжелой фракции протолочных проб. Данные об элементном составе минералов были получены посредством сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (ФГБУ «ЦНИГРИ», аналитик С. Г. Кряжев) и микрозондового анализа (РСМА) (ФГБУН ИГЕМ РАН, аналитик Е. В. Ковальчук). Морфологическое описание самородного золота приведено с учетом данных Л. В. Шатиловой (ФГБУ «ЦНИГРИ»).

Результаты исследования. Сульфидная минерализация в пределах Рукосуевского РРП представлена ограниченным количеством минеральных видов, среди которых наиболее распространенными являются пирит, арсенопирит и пирротин. Реже встречаются такие минералы как сфалерит, халькопирит, галенит и марказит. Самыми малораспространенными рудными минералами являются самородное золото, ульманит, аргентопентландит, касситерит, шеелит и киноварь. Гипергенные минералы представлены гетитом, гематитом, лепидокроцитом, ярозитом, скородитом, оксидами марганца, англезитом и акантитом.

Пирит – наиболее распространенный рудный минерал, локализованный в метаморфических, метасоматических и гидротермальных образованиях. Для пирита характерно несколько морфологических типов – идиоморфные кристаллы (кубы, пентагондодекаэдры, редко октаэдры), субизометричные формы (порфиروبласты в сланцах), аллотриоморфные прожилковидные образования в сростании с карбонатами. Помимо этого, минерал также слагает скрытокристаллические агрегаты в ассоциации с марказитом (псевдоморфозы по пирротину) или без него (порфиروبласты в сланцах).

Табл. 1. Элементный состав минералов по данным РСМА (мас.%)

Минералы	Sb	Ni	S	Co	Ag	Fe	Cu	Сумма
Аргентопентландит		21,76	32,26	0,09	13,15	33,89	0,11	101,24
Ульманит	57,29	27,45	14,91	0,16		1,15		100,95

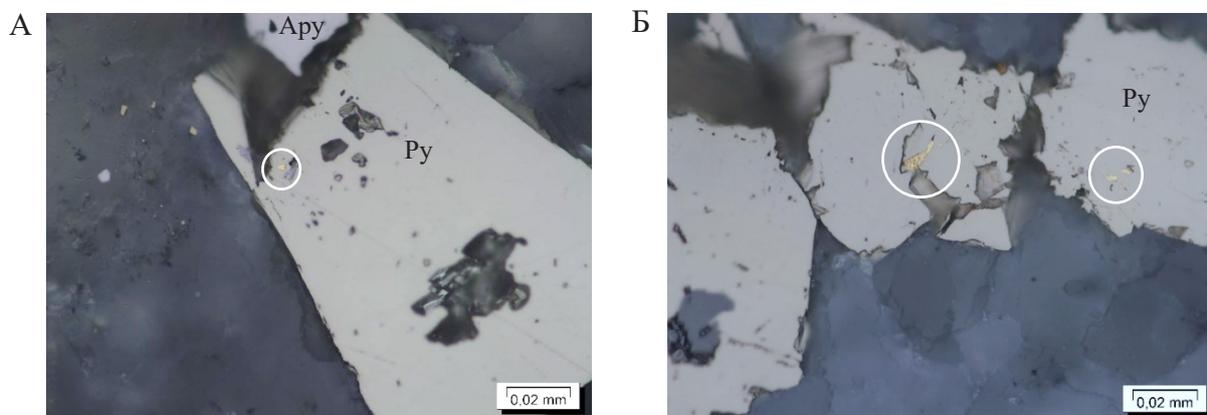


Рис. 2. Полированный шлиф из образца зерна с РП Незаметное (А) и РП Горбуша (Б). Вкрапления самородного золота в пирите

В кавернах и трещинах в пирите либо его агрегатах также были встречены другие рудные минералы – сфалерит, галенит, борнит и халькопирит, в единичных случаях реликты пирротина.

Арсенопирит встречается в виде панидиоморфных кристаллов, сростков и скрытокристаллических агрегатов гипидиоморфных кристаллов. Для индивидов характерно мелкоситовидное неоднородное и зонально-неоднородное строение. Первое объясняется наличием мелких пустот неправильной формы, включениями обломков прозрачных минералов и сланцев. Все индивиды в той или иной степени катаклазированы в отличие от пирита. Арсенопирит отличается высокой степенью идиоморфизма относительно других минералов; локализован в кварцевых и кварц-альбитовых гидротермальных брекчиях, кварц-карбонатных прожилках.

Ульманит и аргентопентландит определены по результатам РСМА в полированном шлифе из образца зерна с РП Западная Горбуша (табл. 1). Ульманит $(\text{Ni,Fe,Co})_{1,03}\text{Sb}_{0,99}\text{S}_{0,98}$ (3 ф. ед.) представлен аллотриоморфным образованием, которое находится в ассоциации с пирротинном в просечке по пириту. Аргентопентландит $(\text{Ag,Cu})_1(\text{Fe,Ni})_{7,89}\text{S}_{8,11}$ (17 ф. ед.) локализован в халькопирите в виде субизометричного вкрапления.

Самородное золото в полированных шлифах было встречено преимущественно в окисленном пирите и арсенопирите, в агрегатах гипергенных минералов по ним в форме тонкодисперсных и субмикроскопических выделений. В неизмененных сульфидах самородное золото каплевидной и интерстициальной формы (рис. 2).

Самородное золото из протолочных проб отмечено в сростании с окисленными сульфидами, в единичном случае были встречены включения кварца, арсенопирита и пирротина. В пробе с РП Воронье самородное золото было встречено в ассоциации с касситеритом. В целом для золота характерна интерстициальная форма, в единичных случаях отмечались кристаллы, искаженные кристаллы и гемиидиоморфные выделения.

Пробность золота по результатам СЭМ и РСМА варьирует в широких пределах – от 610 до 925 ‰. При этом основной примесью является серебро, реже отмечалась ртуть, а в единичных случаях теллур и висмут. Низкопробное золото с примесью ртути характерно для РП Западная Горбуша, реже оно встречалось в пробах с РП Незаметное.

Киноварь была встречена только в протолочных пробах с РП Незаметное и Воронье. Для минерала характерны мелкие неправильные зерна и их шероховатые обломки алого цвета.

Заключение. По результатам проведенных исследований впервые были выделены ассоциации рудных минералов для четырех рудопроявлений Рукосуевского РРП (табл. 2).

В центральной части РРП (Незаметное и Воронье) представлен широкий спектр минеральных видов, который является достаточно контрастным по своему содержанию – присутствие

Табл. 2. Ассоциации рудных минералов на проявлениях золота Рукосуевского РПП, по данным минералогического и минераграфического анализов

Западная Горбуша	Незаметное	Горбуша	Воронье
Главные			
Пирит	Пирит	Пирит	Пирит
Арсенопирит	Арсенопирит	Арсенопирит	Арсенопирит
Пирротин	Пирротин	–	Пирротин
Второстепенные			
Халькопирит	Халькопирит	Халькопирит	Халькопирит
Галенит	Галенит	Галенит	Галенит
Марказит	Марказит	–	Марказит
Сфалерит	Сфалерит	–	–
Редкие			
Самородное золото	Самородное золото	Самородное золото (по [2])	Самородное золото
–	Киноварь	–	Киноварь
–	Шеелит	Шеелит (по [2])	–
–	Касситерит	–	Касситерит
Ульманит	–	–	–
Аргентопентландит	–	–	–

касситерита, шеелита и киновари на одном объекте. На северо-востоке площади (Горбуша и Западная Горбуша) контраст присутствует уже между самими РП. Он выражается в ограниченности минеральных видов на РП Горбуша, относительно РП Западная Горбуша.

Одновременное присутствие на объектах различных по температуре формирования минералов говорит о многостадийности и/или многоэтапности проходивших здесь процессов, что также могло отразиться на широкой вариации пробности самородного золота, на образовании нескольких морфологических типах его, а также пирита и арсенопирита.

На основании этого и полученных наблюдений предполагается возможным выделение золоторудных пирит-арсенопиритовой и киноварь-пирит-полиметаллической парагенетических ассоциаций. Дальнейшие исследования позволят выстроить последовательность минералообразования для золотых проявлений Рукосуевского РПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Сахалинская. Лист М-54-ХVIII (Пограничное). Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. – 187 с.
2. Гранник В. М. Геология и геодинамика южной части Охотоморского региона в мезозое и кайнозое. – Владивосток : Дальнаука, 2008. – 297 с.
3. Glorie S., Alexandrov I., Nixon A. [et. al.] Thermal and exhumation history of Sakhalin Island (Russia) constrained by apatite U-Pb and fission track thermochronology // Journal of Asian Earth Sciences. – 2017. – № 143. – P. 326–342. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.05.011
4. Zhao P., Alexandrov I., Jahn B. and Ivin V. Timing of Okhotsk Sea Plate collision with Eurasia Plate: Zircon U-Pb age constraints from the Sakhalin Island, Russian Far East // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2018. – № 123. – P. 8279–8293. DOI: 10.1029/2018JB015800

Лекомцева Я. Л. (st086825@student.spbu.ru)
СПбГУ, г. Санкт-Петербург

СОЗДАНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА КАМНЕСАМОЦВЕТНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИИ МЬЯНМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА В ГИС

Геоинформационные технологии являются эффективным инструментом прогноза полезных ископаемых. Многофакторный анализ территории методом максимального подобия с использованием геохимических данных позволил выделить перспективные участки коренных и россыпных месторождений цветных камней и оценить методическую вероятность прогноза.

Ключевые слова: пространственный анализ, ГИС, прогноз полезных ископаемых, камнесамоцветная минерализация, провинция Могок.

Создание геолого-прогнозных моделей позволяет решить широкий круг вопросов, связанных в первую очередь с конкретными практическими задачами. Качество и достоверность таких моделей с каждым годом увеличивается, что позволяет исследователям в области геологии проводить анализ территории более детально и изучать даже отдаленные и малодоступные регионы. Существует немало случаев, когда полевые работы нецелесообразны и экономически не выгодны из-за большого количества уже имеющейся разрозненной, но подтвержденной информации [1, 3].

Мьянма на 60 % занята горными системами и густыми лесами, из-за чего является труднодоступной для традиционных методов геологоразведочных исследований. Здесь расположен один из самых известных не только в Мьянме, но и во всем мире метаморфический пояс Могок, сложенный мраморами, гранитами, гнейсами и сиенитами, формирование которых связано с палеозойско-мезозойскими геодинамическими процессами, с последующими этапами метаморфизма и магматизма в палеогене–неогене. В пределах пояса добываются рубины, благородная шпинель и другие драгоценные и полудрагоценные камни, что делает страну одним из самых выдающихся и перспективных источников драгоценных камней в мире [5].

В ходе анализа литературы и имеющихся данных геохимии коренных пород и рыхлых отложений был выбран район Могок-Къятпин, расположенный между 22°50'–23° с. ш. и 96°20'–96°34' в. д. Район расположен у подножия Шанского плато, характеризуется серией горных хребтов с крутыми склонами, долинами, разломами и интрузиями, с широким распространением карстовых процессов, что делает его показательной территорией для применения геоморфологических методов прогноза. Метаморфические процессы в породах Могока начинались при высоких давлениях и сравнительно низких температурах, однако со временем давление постепенно снижалось, а температура геологической среды, формирующей рубиноносные мраморы, увеличивалась. Особенностью метаморфического пояса, отличающей его от других месторождений драгоценных камней Юго-Восточной Азии, является совпадение залегания гранита с максимальными температурами регионального метаморфизма [4, 5].

Сотрудниками ООО «Соколов» в 2016 г. проводилось геохимическое опробование рыхлых отложений разных генетических типов в количестве 10 штук с наличием минерализации, мраморов – 40 штук, из которых 25 с минерализацией. Таким образом, точки геохимического опробования в рамках настоящей работы позволяют точно отметить наличие или же отсутствие камнесамоцветной минерализации. Комплекс их морфометрических показателей будет выступать эталоном для проведения пространственного анализа. Это позволит не только углубленно изучить особенности и потенциал данного района, но и создать базу для возможного расширения и адаптации модели на всю территорию Мьянмы в дальнейшем. Важно подчеркнуть, что при увеличении количества подтвержденных точек результаты моделирования могут быть масштабированы и на большую территорию.

Методика исследования основана на многофакторном геоморфологическом анализе территории с применением метода максимального подобия в среде ГИС. В качестве факторов использовались модели со следующими параметрами: абсолютная высота, уклоны, профильная кривизна, расстояние до водотоков и геологическое строение. Выбор данных параметров обусловлен их значением для процессов денудации, переноса и аккумуляции минерализованного материала.

В качестве исходных данных использовались SRTM-снимки с разрешением 30 м. На их основе были построены модели-факторы, отражающие особенности строения территории и потенциально влияющие на размещение минерализации.

Классификация наличия потенциальной камнесамоцветной минерализации на изучаемом полигоне проводилась методом контролируемого алгоритма максимального правдоподобия в ArcMap 10.8, который предполагает нормальное распределение значений для каждого пикселя и вычисляет вероятность принадлежности отдельного пикселя к определенному классу. Метод относится к байесовским статистическим методам, где степень уверенности может основываться на предварительных знаниях о событии, таких как результаты предыдущих экспериментов, в данном случае – точках геохимического опробования. Метод легко адаптируется к различным данным и условиям, хорошо масштабируется и экономичен, в отличие от нейросетей [2].

Точки пробоотбора будут выступать в качестве морфометрических «эталонов», содержащих в себе данные об абсолютной высоте, уклоне, кривизне (в т.ч. профильной), геологии и расстоянии до ближайшего водотока.

Абсолютная высота указывает на следствия формирования территории, присутствие различных геологических формаций и региональных тектонических особенностей. Например, высокие районы связаны по большей части с коренными месторождениями, образованными в процессе горообразования или магматической активности, а в более низких областях будут концентрироваться россыпные месторождения. На изучаемом районе высоты варьируют от 900 до чуть более 2000 м. Точки отбора рыхлых отложений находятся на высотах от 1148 до 1627 м, пробы коренных месторождений имеют показатели абсолютной высоты от 1159 до 1857 м.

Уклон поверхности и ее кривизна могут указывать на тектонические структуры – склоны гор и долины, которые могут предоставлять условия для образования, дальнейшей концентрации, скорости транспортировки цветных камней. Также эти параметры могут говорить о присутствии и интенсивности карстовых процессов, имеющих особое распространение на изучаемом полигоне. Крутые уклоны могут способствовать повышенной интенсивности эрозии горных пород, что может выявлять скрытые или недоступные ранее минеральные залежи. Большая часть поверхности полигона характеризуется крутыми уклонами от 15° до 35°. Точки отбора проб рыхлых отложений приурочены к участкам местности с уклонами 3–25° (от очень пологих до крутых), тогда как участки размещения точек для коренных месторождений характеризуются уклонами 3–34° (от очень пологих до крутых).

Положение водотоков чаще всего тяготеет к зонам тектонической трещиноватости. Близость к водотокам определяет расстояние транспортировки минералов и влияет на доступность жильных включений. Базис эрозии водотоков представляет собой уровень, к которому стремится весь материал под действием силы тяжести и энергии водного потока. В долинах водотоков происходит накопление этого материала, а сами водотоки могут действовать как естественные дренажные системы, собирая и перенося минералы из коренных источников до мест их концентрации. Большинство точек пробоотбора находятся не дальше 200 м от водотоков. Единичные точки расположены в 500 м.

Геологическое строение: тип пород, структура горных образований и их геологическая история могут определять само наличие и концентрацию камней самоцветов. Цветные камни могут быть ассоциированы с определенными типами горных пород или тектоническими структурами. Полученные области положения коренных месторождений приурочены к поверхности с высотами от 1100 до 1700 м со средними и крутыми уклонами и выпуклой поверхностью, приурочены к мраморам, гранитам и гранат-биотитовым и лейкогранитовым гнейсам.

В результате применения метода максимального подобия было выделено 57 потенциальных участков россыпных месторождений и область 3 км² с потенциальным обнаружением здесь коренных выходов (рис. 1, 2). Полученные зоны характеризуются пространственной приуроченностью к определенным морфологическим элементам рельефа и участкам с благоприятным сочетанием анализируемых факторов.

В результате исследования разработана геоморфологическая прогнозная модель, что позволило определить наиболее перспективные участки для дальнейших поисковых работ. Также для большей наглядности были построены 3D-карты: точки россыпей расположены ниже по

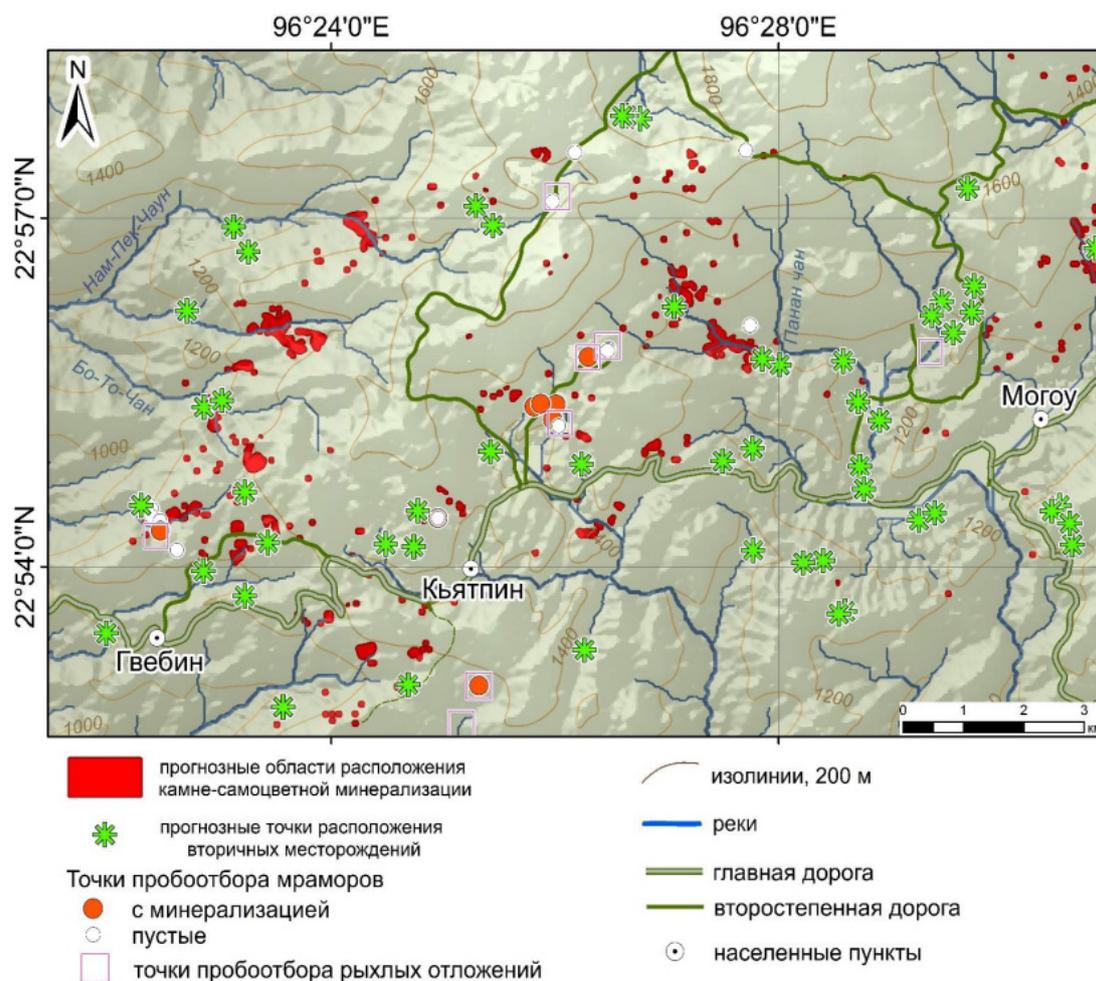


Рис. 1. Геоморфологическая модель прогноза положения камнесамоцветной минерализации

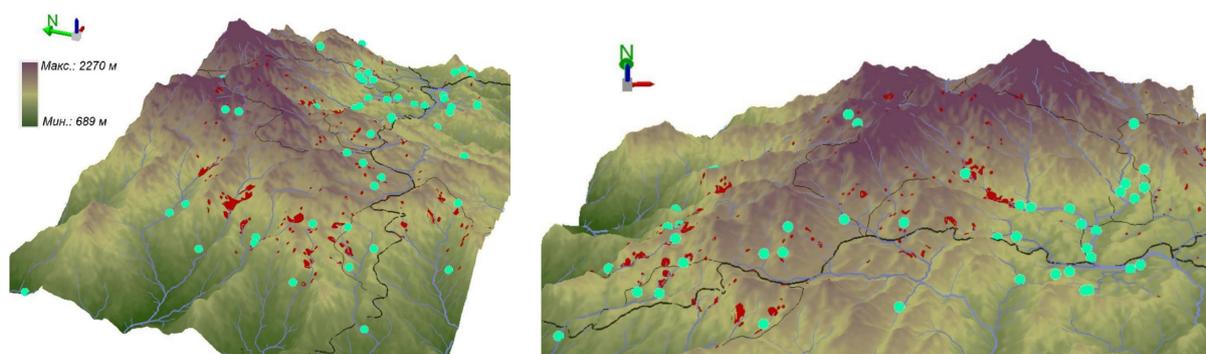


Рис. 2. 3D-карта изучаемого района с потенциальными участками проявлений камнесамоцветной минерализации (красные ареалы) и россыпных месторождений (зеленые точки). Вид с юго-запада на северо-восток (слева) и с юга на север (справа)

склону, над каждой из них расположены области потенциальной камнесамоцветной минерализации в коренном заложении. Выделенные перспективные участки согласуются с размещением известных проявлений, что свидетельствует об адекватности выбранной методики. При этом модель позволяет выявлять новые потенциально перспективные зоны, ранее не зафиксированные в имеющихся данных.

Для оценки методической вероятности выполненного прогноза были рассчитаны показатели для определения статистической значимости распределения точек россыпных месторождений, а также морфологическая оценка сложности границ выделенных участков первич-

ной минерализации. Анализ показал, что зоны с высокой вероятностью характеризуются более устойчивыми морфологическими признаками и пространственной согласованностью. Полученные результаты позволяют рассматривать предложенную модель как достаточно достоверный инструмент предварительного прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуброва Ю. Н., Мыслыва Т. Н., Ткачева Т. Н. Комплексный морфометрический анализ территории Горещкого района с использованием данных дистанционного зондирования Земли. – Горки, Беларусь : УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», 2020. – С. 2–4.
2. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Т. 2. – М. : Недра, 1990. – С. 57.
3. Позаченюк Е. А., Петлюкова Е. А. ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа центрального предгорья Главной гряды Крымских гор для целей ландшафтного планирования // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2016. – № 2. – С. 4–7.
4. Keller P. C. Gemstones Formed by Low-Pressure Regional Metamorphism: The Ruby Deposits of Mogok, Burma / Gemstones and Their Origins. – Boston, MA : Springer, 1990. – P. 13–21.
5. Themelis T. The Mogok Stone Tract: History, Geology, Gem Ruby Mines. – 2008. – P. 23.

Лобастов Б. М.¹ (lhm02@ya.ru), Макаров В. А.¹ (vmakarov58s@mail.ru),

Попова Н. А.² (knyazhenika25@gmail.com)

¹ ИЦМиМ СФУ, г. Красноярск;

² ГРК «Амикан», г. Красноярск

БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТСТОЙНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Различными методами изучены техногенные илы отстойника металлургического производства. Методом СЭМ-ЭДС установлены формы накопления ценных (МПП и цветные металлы) элементов. Данные о размере и морфологии частиц позволяют разработать технологии для извлечения полезных компонентов.

Ключевые слова: техногенные месторождения, продукты нейтрализации, МПП, современное минералообразование, сканирующая электронная микроскопия.

В настоящее время многочисленные техногенные объекты все чаще рассматриваются как месторождения полезных ископаемых. Масштабы накопления отходов горно-металлургического комплекса колоссальны: только в России объемы отвальных пород, хвостов обогащения и металлургических шлаков оцениваются в десятки миллиардов тонн [1]. Эти объекты создают значительную экологическую нагрузку за счет пылеобразования, фильтрации тяжелых металлов и дренажных вод [2], а прорывы дамб на хранилищах хвостов или иных продуктов неоднократно приводили к экологическим катастрофам различного масштаба – подобные инциденты известны практически в каждом регионе, где ведется добыча и переработка полезных ископаемых.

При всем этом стоит помнить, что техногенные объекты содержат значительные запасы ценных компонентов, утраченных на различных технологических переделах ГОКов и металлургических предприятий [3]. Активный рост стоимости металлов, особенно ускорившийся в настоящее время, и развитие более эффективных технологий извлечения потенциально делает переработку скопившихся продуктов экономически целесообразной. Особенно привлекательны хвосты обогащения и илы: зачастую они сложены тонким материалом, который не требует энергозатратного измельчения.

Для эффективной переработки важна диагностика форм нахождения ценных элементов (в виде собственных фаз, изоморфных примесей или мельчайших включений): только так можно обосновать и выбрать оптимальную технологию их извлечения. Именно на решение этой задачи направлено настоящее исследование.

Объектом исследования являются осадки техногенного озера (технического отстойника), куда на протяжении десятилетий и по настоящее время поступают подвергшиеся нейтрализации промышленные стоки с территории металлургического комбината. В ходе работ нами был произведен отбор проб на берегу этого озера, отобраны пробы донных отложений, а также пробы воды из озера и поступающих в него источников для проведения экологического мониторинга и подсчета запасов полезных компонентов, накопившихся в илах.

Береговые и донные отложения представлены как продуктами нейтрализации жидкостей, поступающих с комбината, так и естественными отложениями, которые сформировались в озере до техногенного вмешательства. Можно выделить следующие литологические типы:

- глины (в том числе диатомитовые), супеси и суглинки;
- сапропелевые илы;
- торф и слабо измененные растительные остатки;
- продукты нейтрализации (техногенные илы).

Для более полного представления о протекающих в техническом отстойнике геохимических процессах были отобраны пробы воды непосредственно из отстойника, а также из впадающего в технический отстойник потока промышленных стоков.

Исследование проб включало комплекс методов: спектральный атомно-эмиссионный анализ (СЭА), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), рентгеноструктурный анализ (РСА), рентгенофлуоресцентный макрокомпонентный анализ (РФМА), ИСР-анализ методом МЕ-ОГ62, пробирный анализ, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным спектрометром (СЭМ-ЭДС), а также полный химический анализ (ПХА) и ИСР-МС для воды. Основное внимание в данной работе уделено результатам, полученным методом СЭМ-ЭДС.

После пробоподготовки, включавшей в себя сушку и раздел проб, частицы илов при помощи токопроводящего скотча фиксировались на стандартных держателях препаратов для электронного микроскопа, напылялись углеродом и помещались в камеру электронного микроскопа. Анализы СЭМ-ЭДС выполнены в R&D центре НН ИЦМ СФУ на установке Tescan Vega III SBH

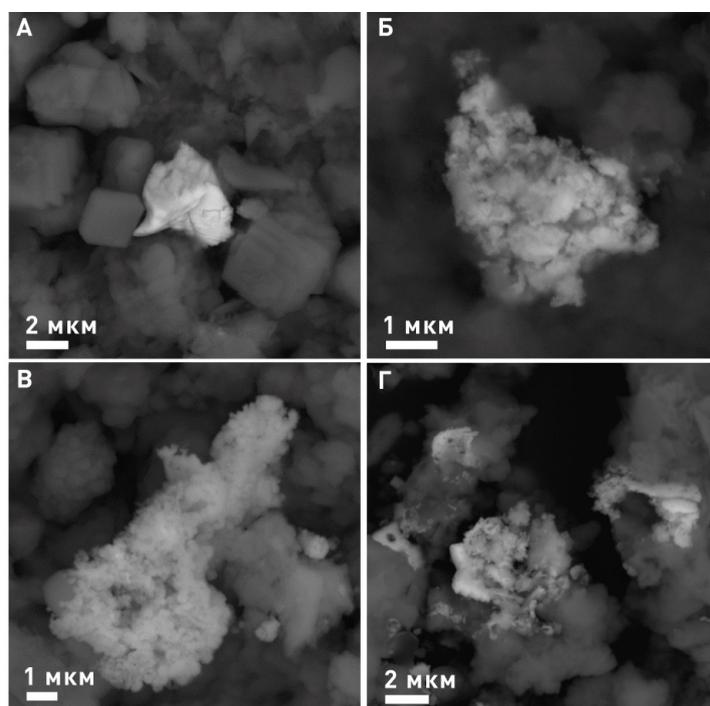


Рисунок. Частицы, содержащие благородные металлы в составе (яркие на изображениях): А – частица МПГ с крючковатыми изломами; Б – комковатый агрегат МПГ; В – МПГ-содержащая частица зернистого строения; Г – зернистые агрегаты селенидов серебра; все изображения – в обратно-отраженных электронах

с интегрированной системой Oxford X-Act при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 2,1 нА (на чаше Фарадея); накопление спектров производилось из точки до шкалы в 300 тыс. импульсов. ЭДС-картирование и накопление профилей проводилось в среднем до шкалы в 3–5 млн импульсов, до получения отчетливой картины. Образцы для электронно-микроскопических исследований напылялись слоем углерода толщиной 20 нм при помощи автоматической системы напыления токопроводящим слоем с контролем толщины напыляемого слоя Quorum 150 RES.

В пробах удалось обнаружить ряд частиц, содержащих в составе благородные металлы, в том числе и МПГ. Морфологически их можно разделить на следующие группы:

- угловатые частицы с рваными, крючковатыми очертаниями (рисунок, А);
- агрегаты, сложенные комочками неправильной формы (рисунок, Б);
- зернистые и глобулярные агрегаты (рисунок, В; Г).

Таблица. Составы некоторых МПГ-содержащих частиц

Спектр	Fe	Ni	Cu	As	Pd	Te	Pt	Bi	Сумма
99-4	0,81	2,47	68,4	4,45	18,59	1,57	3,7	0	100
211	5,77	4,02	3,71	0	32,16	46,89	0	7,45	100
223	2,38	2,74	3,09	9,11	60,89	6,29	15,5	0	100
238	7,49	6,67	1,61	0	23,89	55,8	0	4,54	100

Частицы размером около 2–3 мкм с «рваными», занозистыми краями могут быть аллотигенными, попавшими в отстойник с территории комбината в том виде, в котором мы их наблюдаем. Частицы же с более сложной морфологией, состоящие из отдельных зерен субмикронного размера (линейные измерения показывают, что их размер в среднем составляет около 100–200 нм) чешуйчатой, пластинчатой формы, скорее всего, являются аутигенными, то есть сформировавшимися непосредственно в техногенных илах.

В частицах, содержащих благородные металлы, наиболее часто преобладает палладий, платина присутствует в подчиненном количестве. Реже наблюдаются соединения серебра, золота. Составы некоторых частиц в мас.% приведены в таблице.

При интерпретации результатов стоит учесть, что железо, никель и медь могут являться фоновыми: размер исследуемых частиц очень мал (около 3–5 мкм), что сопоставимо с областью генерации характеристического рентгеновского излучения при ЭДС-анализе. То есть Fe, Ni, Cu могут попадать в спектр из окружающих частиц. Так как анализ проводился на неровной поверхности без соблюдения строгой геометрии, результаты приведены к 100 %.

В заключение можно отметить, что исследованный нами технический отстойник представляет собой крупное скопление богатых ценными компонентами осадков. При его исследовании электронная микроскопия вкупе с другими методами (рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализ, спектральный атомно-эмиссионный анализ, ИСП-анализ методом ME-OG62, пробирный анализ) позволила более полно и точно определить минеральный состав илов, проследить взаимосвязь между составом вод и донными отложениями, уточнить происхождение некоторых фаз, присутствующих в илах. Методом СЭМ-ЭДС впервые для данного объекта обнаружены частицы, содержащие металлы платиновой группы (преимущественно Pd), золото и серебро. Выделены две морфогенетические группы частиц: аллотигенные (угловатые) и предположительно аутигенные (глобулярно-зернистые агрегаты); полученные данные позволят в будущем разработать более эффективные технологии их повторной переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассказов И. Ю., Грехнев Н. И., Александрова Т. Н. Техногенные месторождения в отвалах горно-обогатительных комбинатов Дальневосточного региона. – 2014. – С. 102–114.
2. Турбинский В. В., Айзман Р. И., Бортникова С. Б., Корнеева Т. В., Никифорова Н. Г., Франковский С. Ю., Огулов А. С. Маркеры биогеохимического мониторинга в районе хвостохранилища сульфидных руд. – 2020. – С. 145–158.
3. Lottermoser B. G. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. – 2010.

**Лобастов Б. М.¹ (lbm02@ya.ru), Макаров В. А.¹ (vmakarov58s@mail.ru),
Попова Н. А.² (knyazhenika25@gmail.com)**

¹ ИЦМиМ СФУ, г. Красноярск; ² ГРК «Амикан», г. Красноярск

СОВРЕМЕННОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ХРАНИЛИЩЕ ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

Рассмотрены особенности минерального состава золотосодержащих отходов фабрики. Изучен состав оборотных вод и илов хвостохранилища. Выполнены эксперименты по изучению процессов минералообразования.

Ключевые слова: экспериментальная минералогия, золоторудное месторождение, хвостохранилище, техногенные месторождения, золотоизвлекательная фабрика.

Таблица. Состав исходных хвостов

Распространенность	Минеральный состав хвостов	
	Хвосты переработки первичных руд	Хвосты переработки окисленных руд
Главные	Кварц (36,0–75,9/54,3)*, мусковит + биотит (8,57–29,1/18,3), кальцит (6,6–14,8/9,93), хлорит (2,38–16,3/10,1)	Кварц (60,0–90,4/81,2) мусковит + биотит (5,25–17,7/11,83)
Второстепенные	Доломит (0–3,76/2,05), альбит (0–6,7/2,89), гипс (0,16–4,4/1,52)	Кальцит (0–4,8/1,15), доломит (0–0,96/0,36), хлорит (0–19,3/4,1), альбит (0–3,76/0,65)
Редкие	Рутил (0,11–0,9/0,2)	Шеелит (0–0,16/0,01), рутил (0–0,79/0,23), гипс (0–1,6/0,16)

* в скобках указаны интервал содержания от минимального до максимального и среднее содержание, %.

В статье представлены результаты изучения минерального состава хвостов одного из действующих хвостохранилищ золотоизвлекательной фабрики, расположенной в Северо-Енисейском районе Красноярского края, а также охарактеризованы протекающие в нем процессы современного минералообразования. Актуальность исследования определяется тем, что масштабы переработки золотых руд в данном регионе чрезвычайно велики и нередко содержат благородные металлы и другие полезные компоненты в концентрациях, близких к промышленным. Повторное извлечение их невозможно без знания минеральных форм и понимания процессов современного минералообразования в хвостохранилище.

Материал хвостов представлен преимущественно тонкодисперсной, пылевой фракцией. По своему строению толща накопленных хвостов напоминает слоеный пирог: выделяются три горизонта разного состава, образовавшихся при переработке в различные годы окисленных, смешанных и первичных (сульфидных) руд. Цвет варьирует от светло-серого, зеленовато-серого (продукты переработки неокисленных руд) до светло-бурого (хвосты обогащения окисленных руд).

Как видно из таблицы, минеральный состав отложений хвостохранилища хорошо согласуется с минеральным составом вмещающих пород и руд месторождения – кварц-сланцевых и гранатовых сланцев. Среди нерудных минералов наиболее распространены кварц, слюды (мусковит, биотит) и хлорит. В подчиненном количестве отмечаются карбонаты, амфиболы тремолит-актинолитового ряда, турмалин, циркон, рутил и анатаз, монацит, гипс.

Из рудных минералов в отложениях хвостохранилища чаще всего встречаются пирротин, арсенопирит, пирит, стибнит, магнетит и гидроксиды железа. Кроме того, отмечаются и самородный висмут, самородное золото, сульфиды висмута и теллура, шеелит, вторичные минералы сурьмы и мышьяка (валентинит, трипугит, скородит). Всего удалось идентифицировать в отложениях хвостохранилища около сорока минеральных видов. Среднее содержание золота составляет 0,3 у.е. в хвостах переработки окисленных руд, 0,6 у.е. в хвостах переработки первичных руд.

Минеральный и химический состав илов хвостохранилища, отобранных методом драгирования по профилю в пределах обводненной части хвостохранилища, существенно отличен от хвостов, изученных по керновым пробам. В них фиксируется повышенное содержание гипса (максимально до 14 %). Также характерно повышенное содержание железа (до 7,12 % относительно среднего по хвостам 3,52 %), мышьяка (1,14/0,13 %), серы (2,73/0,44 %), цинка (0,033/0,009 %), калия (2,80/2,42 %) и пониженное – кремния (19,55/29,58 %). Содержание золота с глубиной также увеличивается: от 0,3 у.е. в пляжной зоне до 1,5 у.е. на глубинах больше 8 метров. Это хорошо увязывается как со снижением в иловой фракции доли кварца и соответствующим возрастанием количества слюд, так и с накоплением, кроме гипса, новообразованных рентгеноаморфных тонкодисперсных фаз железа, мышьяка, сорбирующих на активную поверхность менее распространенные компоненты (Zn, Se и др). На рентгеноаморфный характер новообразованных фаз указывает отсутствие диагностированных рентгенофазовым анализом минералов железа и мышьяка, но высокие содержания данных элементов, диагностированные методом ICP-MS.

Установлена изменчивость химизма оборотных вод хвостохранилища, наиболее отчетливая граница в составе вод отмечается на глубине 6–8 метров. Отмечено изменение рН от 7,5 (у поверхности) до 6,6; значительно увеличивается общее содержание цианидов от примерно 1400 мг/л у поверхности до 1600 мг/л; железо в приповерхностном слое вод не обнаруживается ($< 0,1$ мг/л), однако его содержание с глубиной составляет в среднем 0,88 мг/л; также увеличиваются содержания меди (от 6 до 8 мг/л), кальция (от 650 до 750 мг/л).

Для изучения проходящих в хвостохранилище процессов (растворение-осаждение вещества) проведено два натуральных эксперимента по закладке в надхвостовые оборотные воды различных веществ. В экспериментах были использованы образцы минералов и техногенных образований, в первом эксперименте: резина, сера, ртутная амальгама на меди, медь, сталь, графит, самородное золото в кварце, пирит и пирротин, арсенопирит.

В первом эксперименте были подготовлены 3 набора образцов, образцы были закреплены на изолированный алюминиевый провод при помощи алюминиевой проволоки и капроновых кабельных стяжек и погружены на глубину 9–10 м, запланированная экспозиция составляла 1, 2 и 3 месяца соответственно. Точка закладки образцов выбиралась с учетом движения оборотных вод: это не должна была быть застойная зона – поэтому установлены образцы были примерно между точками сброса пульпы и водозабором. Однако из-за раннего таяния льдов вовремя удалось извлечь только первую партию образцов. Вторая была извлечена уже после полного таяния льдов с началом «навигации» на хвостохранилище. Частица самородного золота за месяц практически не изменилась, несмотря на достаточно высокое содержание остаточных цианидов в оборотных водах хвостохранилища, явных следов травления золота не обнаружено. Однако при детальном исследовании поверхности золотины были обнаружены кристаллы новообразованного гипса (рис. 1а).

Арсенопирит подвергся более значительным изменениям: на его поверхности также образовались кристаллы гипса обычно хорошо оформленные, нередко – с трещинками, образовавшимися, предположительно, при потере гипсом воды. Встречены небольшие островки (пятна) агрегата вторичных минералов: главным образом скородита (продукт окисления арсенопирита, $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и гипса. Как хорошо видно на рисунке 2а, новообразованные кристаллы имеют кубический облик. Третья партия, несмотря на все предосторожности, затонула полностью.

Во втором эксперименте образцы были установлены в непосредственной близости от насосной станции на глубине около 2–3 метров, что также позволило обеспечить интенсивный водообмен вокруг образцов. Как оказалось, такое решение позволило пронаблюдать очень высокую скорость процессов минералообразования. Несколько изменился состав образцов: было взято химически чистое золото (фрагменты небольшого банковского слитка), медь, ртутная амальгама на меди, сталь, сера, графит.

На поверхности химически чистого золота (фрагмент слитка) уже спустя месяц наблюдались следы травления (рис. 1б). На образце серы образовались мелкие (первые микроны) кубические кристаллы, предположительно, цианида железа и марганца (рис. 2б). Аналогичные кристаллы были ранее отмечены на арсенопирите в первом эксперименте (рис. 2а).

Размеры кристаллов как в первом, так и во втором эксперименте – первые микроны, до 5, реже до 10 микрон в поперечнике. Предположительно, это цианид железа и марганца. Однозначная диагностика его затруднена, однако это удается сделать по ряду признаков. К сожалению, из-за неровной поверхности образца, не удалось выйти на стехиометрию, но по большому количеству анализов накоплена следующая статистика: N – 15–20 %, O – 18–22 %, S – 0,5–1,5 %, Fe – 8–14 %, Mn – 5–10 % и неизвестное количество углерода, которое невозможно точно диагностировать из-за напыления токопроводящим слоем углерода исследуемых образцов. По косвенным признакам – резкое большее количество углерода в реальном спектре, нежели в теоретическом – можно говорить о значительном содержании углерода в образце.

На медной пластине образовалось достаточно большое количество тиоцианата меди (рис. 3а). Определение его состава, как и в случае с цианидом железа, было затруднено некоторыми особенностями метода. Примерный состав следующий: N – 23–24 %, O – 5–10 %, S – 12–13 %, Cu – 41–45 %, C – неизвестно.

Как и в случае с цианидом железа, значительно превышающее теоретические значения количество импульсов углерода позволяет говорить о значительном его содержании в образце.

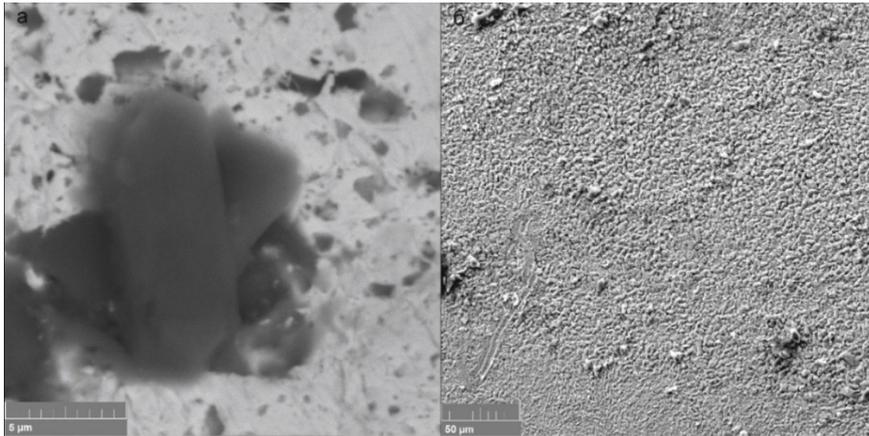


Рис. 1. а – кристаллы гипса на природном золоте, б – следы травления золотой пластины

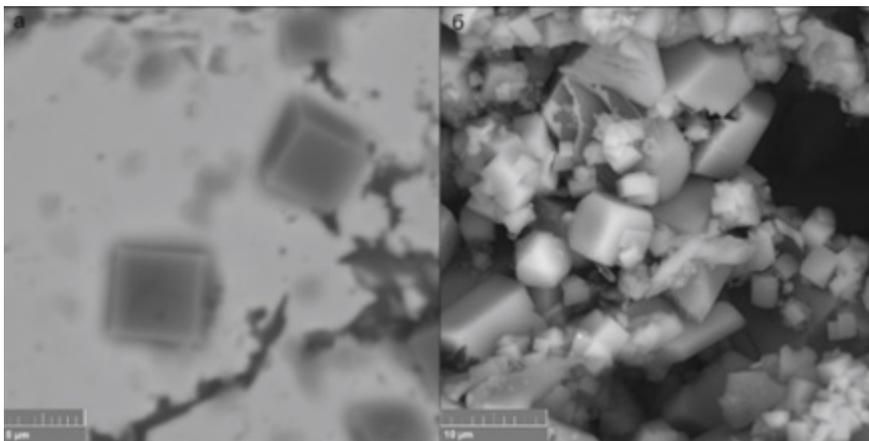


Рис. 2. а – кристаллы цианида железа на арсенипирите, б – агрегат кристаллов цианида железа и марганца на сере

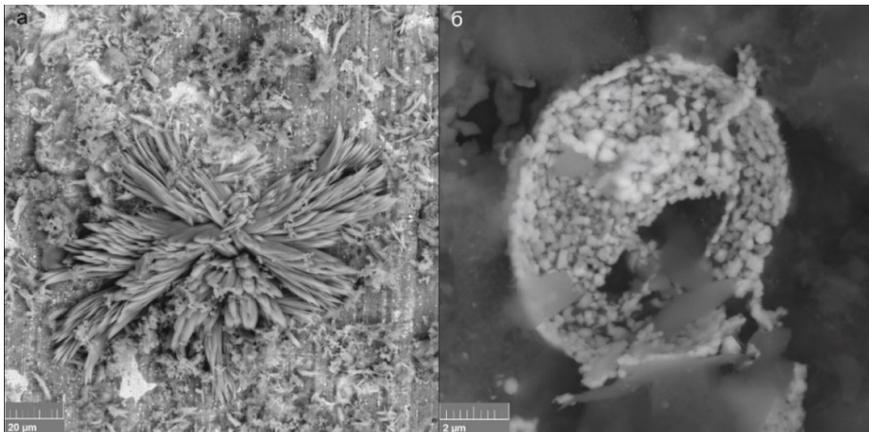


Рис. 3. а – розетка кристаллов тиоцианата меди, окруженная сульфатом и оксидами меди, б – агрегат кристаллов CuHg с гипсом и оксидами меди

Кроме того, на поверхности меди наблюдаются крупные скопления мельчайших (от сотен нанометров до первых микрон в поперечнике) глобул гидроксидов железа. Особенностью последних является постоянное присутствие мышьяка – 2,5–2,8 % масс. Это же отмечалось и в агрегатах гидроксидов железа, сформировавшихся на железной пластине. Все это может говорить как о высоких сорбционных свойствах гидроксидов железа, так и о значительном количестве мышьяка, растворенного в оборотных водах хвостохранилища. Сульфат меди, неоднократно встреченный в образце, не формирует хороших кристаллов, только тонкие пленки, встреченные в агрегатах с другими фазами.

Новые минеральные фазы были обнаружены в ртутной амальгаме на медной пластине, а точнее уже собственно на медной пластине. Изучен образец, который в первом эксперименте пробыл в оборотных водах около 4 месяцев. Ртуть там практически не осталось – единичные крошечные (размером в первые десятки микрон) ртутьсодержащие фазы (близки к CuHg) в ажурных агрегатах, сложенных оксидами и сульфатом меди (рис. 3б). Изредка отмечаются незначительные (до 1 %) содержания кислорода (тонкие оксидные пленки на поверхности) и серы.

Для интегральной оценки процессов, выявленных в ходе полевых и экспериментальных исследований, было проведено термодинамическое моделирование окисления хвостов. Применение метода компьютерного термодинамического моделирования позволяет рассчитать техногенные процессы, протекающие в хвостах обогащения, определить элементный и ионный состав, Eh-pH параметры формирующихся растворов, кристаллизующиеся минералы, их ассоциации, формирование вторичных концентраций золота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко В. А. Экологическая геохимия: учебник – М. : Логос, 2000. – 627 с.
2. Зарецкий М. В. [и др.] Оценка минерально-сырьевого потенциала техногенного сырья // Тез. докл. Сборник статей IX Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2015. – С. 30–35.
3. Меркутов М. А. [и др.] Геотехнологические исследования для извлечения золота из минерального и техногенного сырья. – М. : Горная книга, 2011. – 438 с.
4. Наумов В. А. Особенности формирования и распределения благородных металлов в техногенных россыпях и отвалах Урала // Горный журнал – 1994. – № 8. – С. 39–50.

Лобастов Б. М.¹ (lbm02@ya.ru), Попова Н. А.² (knyazhenika25@gmail.com)

¹ ИЦМиМ СФУ, г. Красноярск; ² ГРК «Амикан», г. Красноярск

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗОЛОТА В ШЛАМОВЫХ ВОДАХ ХРАНИЛИЩА ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАЮЩЕЙ ФАБРИКИ

С использованием программного комплекса (ПК) «Селектор» проведено моделирование физико-химических процессов, протекающих в действующем хранилище хвостов золотоизвлекающей фабрики. Показаны возможности данного подхода для оценки изменчивости химизма оборотных вод, динамики техногенного минералообразования и прогнозирования форм нахождения остаточного золота в хвостах.

Ключевые слова: хвостохранилище, техногенные месторождения, термодинамическое моделирование, программный комплекс «Селектор», вторичные концентрации золота.

В статье представлены результаты изучения процесса формирования вторичных концентраций золота в шламовых водах хранилища текущих хвостов золотоизвлекающей фабрики, расположенной в Северо-Енисейском районе Красноярского края, а также построена физико-химическая модель современного процесса образования вторичных минералов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью исследования техногенных и гипергенных процессов, протекающих в хвостохранилище. Стремительное совершенствование вычислительной техники, рост быстродействия и многообразие программного обеспечения позволяют изучить распределения элементов сульфидных руд в водных растворах и рассчитать возможности образования вторичных концентраций золота в водах хвостохранилища. Применение метода компьютерного термодинамического моделирования позволяет рассчитать техногенные процессы, протекающие в хвостах обогащения, определить элементный и ионный состав, Eh-pH параметры формирующихся растворов, кристаллизующиеся минералы, их ассоциации, формирование вторичных концентраций золота.

Таблица 1. Состав моделей исходных хвостов переработки

Компонент	Содержание, %	
	Хвосты переработки первичных руд	Хвосты переработки окисленных руд
Кварц	54,28	80,85
Альбит	2,89	0,65
Гипс	1,52	0,16
Доломит	2,05	0,36
Кальцит	9,93	1,14
Мусковит + биотит	18,29	11,78
Рутил	0,20	0,23
Хлорит	10,10	4,08
Сера	0,75	0,75
Золото	0,000043	0,000043

Составлено авторами на основании данных рентгенофазового и элементного анализа керновых проб.

В данной работе для физико-химического моделирования гипергенных процессов формирования шламовых вод хвостохранилища был выбран программный комплекс «Селектор-Windows». ПК «Селектор» снабжен системой встроенных баз термодинамических данных и модулем формирования моделей различной сложности и архитектуры.

Рассматриваемый процесс – формирование шламовых вод на поверхности хвостохранилищ в результате взаимодействия агентов выветривания и хвостов переработки первичных и окисленных руд, содержащих золото. Химический состав модели формирует независимые компоненты системы – стехиометрические составляющие, из которых путем их линейной комбинации могут быть получены составы всех фаз и компонентов. В соответствии с методологией эксперимента по физико-химическому (термодинамическому) моделированию [4], модели состояли из 10 кг атмосферы, 1 кг воды и 0,1 кг хвостов обогащения. Были установлены единые термо-барометрические условия: T от + 5 до +30 °С и $P = 1$ бар [6]. В расчетах учитывались зависимые и независимые компоненты: растворенные частицы, минералы и твердые растворы, т.е. наиболее вероятные газы, гипогенные, а также гипергенные и техногенные минералы. Использовались термодинамические параметры из комплекта поставки программы и соответствующей литературы [2, 3].

Было рассчитано несколько вариантов развития системы: в первом варианте не образовались вторичные (гипергенные и техногенные) минералы – их элементы ушли в раствор; во втором эти вторичные минералы из раствора выпадают. Химический состав атмосферы рассчитан на основании работы Р. Хорна [5]. Состав хвостов переработки первичных и окисленных руд приведен в таблице 1 и составлен на основании данных рентгенофазового и элементного анализа керновых проб.

Модели также учитывают химический состав оборотных вод минимизацией свободной энергии Гиббса [1] и в соответствии с алгоритмами, заложенными разработчиками, программа «Селектор-Windows» производит расчет равновесного состава газовой, жидкой и твердой фаз систем. Количественные характеристики полученных систем изложены в таблице 2.

Величина потенциала Eh для первичных руд 0,84 В и окисленных руд 0,83 В. Водородный показатель системы изменяется незначительно и принимает близнейтральное значение от 6,36 до 6,98 для указанных руд. Растворы моделируемой системы содержат следующие ионы и молекулы: $(Al(NO_3)_2)^+$, $(Au(OH)_2)^-$, $(HCO_3)^-$, $AuOH$, CO_2^* , $Ca(NO_3)_2^*$, $H_2CO_3^*$, $H_4SiO_4^*$, $KHSO_4^*$, KNO_3^* , $Mg(NO_3)_2^*$, $NaNO_3^*$, $Si(OH)_4^*$, SiO_2^* , CO_2^* , CO_3^{-2} , HCO_3^- , N_2^* , O_2^* , SO_4^{-2} , SiO_2^* ,

- элементы сульфидных руд: $KHSO_4$, $NaAsO_4^{2-}$, $NaSO_4^-$.
- элементы вмещающих пород: $Ca(HCO_3)^+$, SiO_2 .

Концентрация элементов сульфидных руд в растворах составляет (г/л): Au – до 0,00043, N – до 5,69 и 1,46, Mg – до 1,39 и 0,51, Ca – до 4,72 и 5,64, O – до 22,7 и 7,87 (для первичных и окисленных руд соответственно).

Таблица 2. Результаты моделирования окисления хвостов переработки руд с образованием техногенных минералов

T, °C	Первичные руды					Окисленные руды						
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
	Независимые компоненты, мг/л											
C	6,14E+01	1,87E+01	6,57E+00	2,79E+00	1,50E+00	1,04E+00	4,59E+01	1,38E+01	4,73E+00	1,91E+00	9,43E-01	5,87E-01
N	5,62E+03	5,45E+02	5,72E+03	5,69E+02	5,67E+03	5,66E+03	1,46E+03	1,31E+03	1,46E+03	1,44E+03	1,42E+03	1,41E+03
S	7,47E+02	7,46E+02	2,00E-01	3,92E-02	1,04E-01	3,67E-01	4,81E+02	4,80E+02	1,41E-01	6,39E-02	1,38E-01	3,09E-01
Ag	5,05E-02	5,04E-02	5,05E-02	5,05E-02	5,05E-02	5,05E-02	5,03E-02	5,03E-02	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02
As	9,01E-01	8,98E-01	8,95E-01	8,90E-01	8,77E-01	8,44E-01	8,25E+02	8,98E-01	8,98E-01	8,98E-01	8,98E-01	8,98E-01
Cu	6,75E-01	6,65E-01	6,54E-01	6,47E-01	6,54E-01	6,99E-01	6,67E-01	6,99E-01	6,65E-01	6,54E-01	6,47E-01	6,40E-01
Au	4,34E-01	4,34E-01	4,34E-01	4,34E-01	4,34E-01	4,34E-01	4,33E-01	4,33E-01	4,33E-01	4,33E-01	4,33E-01	4,33E-01
Al	1,30E+02	3,66E+01	1,12E+01	3,74E+00	1,31E+00	4,06E-01	9,87E+01	2,81E+01	8,62E+00	2,93E+00	1,13E+00	4,41E-01
Ca	4,72E+03	4,72E+03	4,73E+03	4,73E+03	4,73E+03	4,73E+03	5,64E+02	5,64E+02	5,65E+02	5,65E+02	5,65E+02	5,65E+02
Fe	3,80E-06	1,17E-06	4,14E-07	2,15E-07	2,03E-07	2,75E-07	3,78E-06	1,17E-06	4,13E-07	2,15E-07	2,03E-07	2,76E-07
K	9,10E+02	9,10E+02	9,11E+02	9,11E+02	9,11E+02	9,11E+02	5,86E+02	5,86E+02	5,86E+02	5,86E+02	5,86E+02	5,86E+02
Mg	1,39E+03	1,39E+03	1,39E+03	1,39E+03	1,39E+03	1,39E+03	5,14E+02	5,13E+02	5,14E+02	5,14E+02	5,14E+02	5,14E+02
Na	6,65E+02	6,65E+02	6,66E+02	6,66E+02	6,66E+02	6,66E+02	3,21E+02	3,21E+02	3,22E+02	3,22E+02	3,22E+02	3,22E+02
Si	9,95E+02	2,54E+02	7,23E+01	2,71E+01	1,67E+01	1,56E+01	1,00E+03	2,56E+02	7,29E+01	2,73E+01	1,68E+01	1,57E+01
H	1,71E+02	6,09E+01	1,04E+01	3,46E+00	1,71E+00	1,34E+00	1,63E+02	5,26E+01	1,03E+01	3,43E+00	1,69E+00	1,33E+00
O	2,27E+04	2,05E+04	1,96E+04	1,94E+04	1,94E+04	1,94E+04	7,84E+03	5,75E+03	4,99E+03	4,86E+03	4,82E+03	4,81E+03
Характеристики моделируемой системы												
Eh, Вольт	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
pH, ед	6,86	6,76	6,66	6,55	6,44	6,40	6,98	6,88	6,78	6,66	6,50	6,36
Минерализация, мг/л	37 880,0	34 586,0	33 002,0	32 786,0	32 729,0	32 716,0	12 883,0	9 761,7	8 464,0	8 261,5	8 209,7	8 198,6
Фазы системы, г												
Водная фаза	1028,83	1026,37	1023,04	1022,85	1022,79	1022,77	1006,06	1003,78	1001,45	1001,27	1001,22	1001,21
Газовая фаза	9981,94	9982,53	9981,47	9981,54	9981,56	9981,58	9993,41	9993,89	9993,24	9993,29	9993,32	9993,33
Гелит FeOОН	5,98	5,98	3,93	3,93	3,93	3,93	1,77	1,77	0,44	0,44	0,44	0,44
Лимонит Fe ₂ O ₃	4,57	4,57	4,58	4,58	4,63	1,41	1,68	1,61	1,62	1,69	1,57	1,48
Фиброферрит Fe[SO ₄](ОН) · 5H ₂ O	8,67	8,67	14,65	14,65	14,65	14,64	8,75	8,75	12,60	12,60	12,60	12,60
Аллофан SiO ₂ · 2Al ₂ O ₃ · 8H ₂ O	16,03	16,38	16,47	16,50	16,51	16,51	8,26	8,53	8,60	8,62	8,63	8,63
Кварц SiO ₂	59,12	60,64	61,01	61,10	61,12	61,12	82,97	84,52	84,89	84,99	85,01	85,01

Образование из растворов твердых фаз – процесс минералообразования – протекает во всем рассматриваемом диапазоне температур. В системах выпадают минералы различных классов:

- класс оксидов и гидроксидов (г): Fe – гетит – до 5,98 для первичных руд и до 1,77 для окисленных руд; – лимонит – до 4,63 для первичных руд и до 1,68 для окисленных руд;
- класс силикатов (г): Al – аллофан – до 16,51 для первичных руд и до 8,63 для окисленных руд;
- класс сульфатов (г): Фиброферрит до 14,64 для первичных руд и до 12,6 для окисленных руд.

Кристаллизация данных твердых фаз возможна только из насыщенных растворов, содержащих высокие концентрации элементов сульфидных руд, что говорит об образовании таких растворов и присутствии их в системах при окислении хвостов обогащения и протекании гипергенных процессов.

Присутствие в системе свежесформированных фаз гетита и лимонита может приводить к процессам сорбции и восстановления золота.

Выводы. В рассматриваемых моделях хвостохранилища формируются растворы с окислительным Eh 0,84В и рН, близким к нейтральным значениям (от 6,36 до 6,98). Из образующихся в результате процессов окисления насыщенных растворов кристаллизуются вторичные минералы и соединения. При нейтральных значениях рН вероятно протекание процессов сорбции и восстановления ионов золота из раствора на свежесформированной поверхности лимонита и гетита.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бектурганов Н. С. [и др.] Расчет термодинамических свойств комплексов золота и серебра смешанного состава // Журнал неорганической химии. – 2014. – Т. 59, № 4. – С. 492.
2. Еремин О. В. [и др.] Оценка стандартных потенциалов Гиббса сульфатов меди при помощи задач линейного программирования // Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН». – 2006. – № 1. – С. 19–20.
3. Еремин О. В. Расчет стандартных потенциалов Гиббса для комплексных сульфатов // Труды II Всероссийского симпозиума с международным участием и VIII Всероссийских чтений памяти акад. А. Е. Ферсмана : Тез. докл. – Чита : Экспресс-издательство, 2008. – С. 98–100.
4. Моделирование техногенных и природных систем : учебно-методич. пособие по выполнению лабораторн. работ: для обучающихся по направлению 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии». – Дальневост. Федерал. Ун-т, Школа естественных наук, базовая каф. хим. и ресурсосберегающих технологий / сост. К. Р. Фролов, В. П. Зверева, А. М. Костина. – Владивосток : ДФУ, 2017. – 72 с.
5. Хорн Р. Морская химия. – М. : Мир, 1972. – 211 с.
6. Johnson J. V. SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bar and 0–1000 °C // Comput. Geosc. – 1992. – Vol. 18. – P. 899–947.

Лосев В. И. (vovalosev98@gmail.com), Макаров В. А. (vmakarov@sfu-kras.ru)

СФУ, г. Красноярск

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВОГО СУХОЛОЖСКО-СОСНОВСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЗАПАДНЫЙ САЯН)

На примере Сухоложско-Сосновского рудного узла, локализованного в пределах Куртушибинской металлогенической зоны Западного Саяна установлена уникальная скарново-порфировая система. Ее локализация контролируется унаследованной структурой Усинской впадины раннепалеозойской аккреционной окраины, что важно для корректировки прогнозно-поисковых моделей порфировых объектов региона.

Ключевые слова: АССО, медно-порфировая система, Сухоложско-Сосновский рудный узел, тектонический контроль, поисковые критерии.

В последние годы интерес к Алтае-Саянской складчатой области (АССО) на предмет поисков медно-порфировых месторождений заметно вырос. В частности, открыто крупное Ак-Сугское медно-порфировое месторождение, производится разведка схожего с ним объекта – месторождения Кызык-Чадр, ведутся поисковые работы на аналогичные объекты в пределах Куртушибинской металлогенической зоны Западного Саяна, где определенный интерес вызывает Сухоложско-Сосновский потенциальный рудный узел с медно-скарновыми и медно-порфировыми проявлениями [7, 8]. Геотектоническая позиция данных объектов остается дискуссионной.

Палеогеодинамические условия являются ключевым фактором формирования месторождений порфирового типа, и это определяет первостепенное значение анализа структурно-тектонических особенностей для реконструкции геологической эволюции потенциально рудоносных регионов. Однако для Западно-Саянского региона подобные реконструкции остаются крайне малочисленными. Парадоксальным образом его палеогеодинамическая изученность ниже, чем у значительно более труднодоступного Таймыра. Издание в 2007–2012 гг. Государственных геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 Алтае-Саянской серии [1–4], безусловно, обновило фактологическую основу. Тем не менее оно не разрешило фундаментальных разногласий в понимании геодинамической истории развития Западного Саяна и Алтае-Саянской складчатой области в целом.

Исследуемый сегмент Алтае-Саянской складчатой области представляет собой сложную аккреционно-коллизонную структуру, сформированную в результате позднекембрийско-ордовикской (C_3 -O) коллизии и последующей аккреции к кратону. Ключевую роль в его деформации сыграло вращение Сибирского палеоконтинента по часовой стрелке, приведшее в обстановке сжатия к образованию крупных периконтинентальных сдвиговых зон (рис. 1).

Эти сдвиги контролировали перемещение фрагментов островодужных систем и формирование депрессионных структур (Усинская, Кужебазинская впадины), заполненных силуро-девонскими (S-D) отложениями. Зоны литосферного ослабления, связанные со сдвигами, стали основными каналами для подъема магм и локализации порфирового оруденения.

Наиболее ярким проявлением позднепалеозойского магматизма, связанного с унаследованными зонами литосферного ослабления, являются интрузивные комплексы Западного Саяна, сформированные на рубеже силура и девона (425–406 млн лет). Среди них наиболее распространены большепорожский диорит-гранодиорит-гранитовый и джойский гранит-лейкогранитовый комплексы. Их массивы, как правило, имеют согласную удлиненно-линзовидную форму, подчеркивающую структурный контроль со стороны вмещающих пород. Крупнейшее тело – Онинский лополит (площадь ~ 1000 км²), сложенный дифференцированным рядом умеренно кислых пород, внедрившихся в две гомодромные фазы [9].

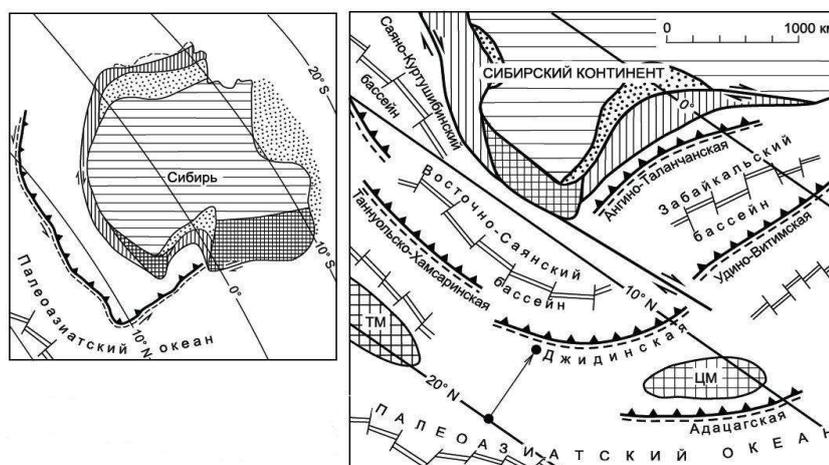


Рис. 1. Палеогеодинамическая реконструкция венд-раннепалеозойской активной окраины Сибирского континента для 540–520 млн лет [5]. Слева – глобальная реконструкция; справа – региональная

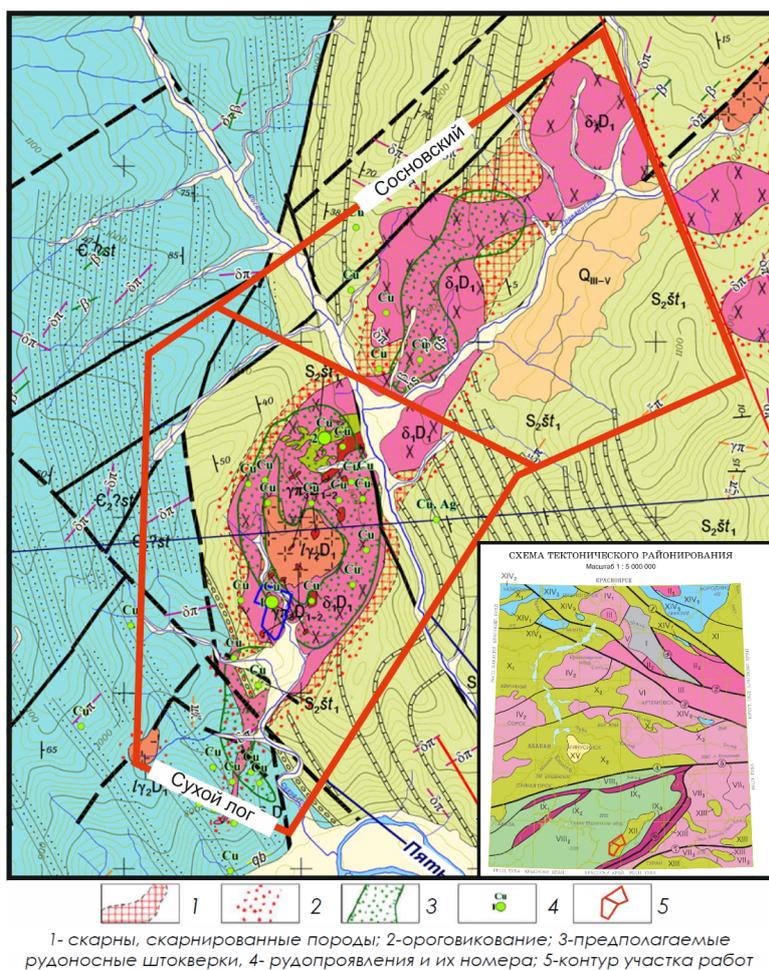


Рис. 2. Геологическая карта Сосновского массива: 1 – скарны; 2 – ороговикование; 3 – предполагаемые рудные штокверки; 4 – рудопроявления и их номера; 5 – контур участка работ

Ключевым фактором металлогенической специализации региона является не масштаб магматизма, а точная пространственная локализация малоглубинных интрузивов в подготовленных структурных ловушках. Ярким подтверждением этого предположения служит Усинская медно-золото-порфировая рудно-магматическая система (РМС), связанная с малым интрузивом большепорожского комплекса и приуроченная к одноименной межгорной впадине.

Усинская впадина представляет собой грабен-синклираль субширотного (ВСВ) простираения размером 80×25 км. Ее стратиграфический разрез имеет трехчленное строение: венд-кембрийский фундамент, верхнесилурийский терригенный чехол и перекрывающая его актуругская свита (D_1) кужебазинского вулканогенного комплекса. Мощность свиты варьирует от 300 до 2100 м; ее слагают ритмично чередующиеся потоки андезитов, андезибазальтов и базальтов, среди которых породы нормальной и умеренной щелочности представлены примерно в равной пропорции.

Формирующий Усинскую РМС рудогенерирующий интрузив – это Сосновский массив кукшинского интрузивного комплекса. Он расположен на юго-западном замыкании впадины, где развита Федоровская синклиналь, сложенная сероцветными терригенно-карбонатными породами шиштыгской свиты (S_2). Массив имеет вытянутую форму СВВ простираения (4×1 км²). Падение слоев на крыльях синклинали составляет $15\text{--}25^\circ$. В его составе выделяется два этапа внедрения: 1) равномерно-зернистые кварцевые диориты, диориты и габбро-диориты, с которыми связывают ороговикование; 2) граниты, гранит-порфиры и сиенит-порфиры, ответственные за образование скарнов и гидротермального оруденения. Это привело к образованию трех основных рудопроявлений – Сосновского, Сухого Лога и Шиштыгского, формирующих изучаемый рудный узел [6] (рис. 2).

Проведенный анализ позволяет сделать следующие основные выводы.

Усинская РМС, с которой пространственно сопряжен Сухоложско-Сосновский рудный узел, представляет собой комбинированную систему, где сочетаются черты скарнового и порфиорового оруденения.

Процесс рудообразования протекал в постсубдукционной обстановке, наложившейся на древнюю структуру Усинской впадины.

Обнаружение подобных совмещенных скарново-порфиоровых объектов говорит о необходимости корректировки региональных прогнозно-поисковых моделей [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамович А. Ф., Вайнтроб Н. Л., Семенова О. А. Геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000 (первое поколение). Серия Западно-Саянская. Лист N-46-XXXIII. Объяснительная записка. – 1964. – 77 с.
2. Бабин Г. А., Гусев Н. И., Юрьев А. А., Уваров А. Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. – 665 с.
3. Беззубцев В. В., Махлаев М. Л., Кириченко В. Т., Перфилова О. Ю. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 – Абакан. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 391 с.
4. Галимова Т. Ф., Пашкова А. Г., Поваринцева С. А., Перфильев В. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-47 – Нижнеудинск. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. – 652 с.
5. Гордиенко И. В., Метелкин Д. В. Эволюция субдукционного магматизма на неопротерозойской и венд-раннепалеозойской активных окраинах Палеоазиатского океана // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 1. – С. 91–108.
6. Гусев Н. И., Романова Л. Ю., Берзон Е. И., Лобанов К. В. Золото-меднопорфиоровое оруденение в связи с малыми интрузивами большепорожского комплекса Западного Саяна // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. – Иркутск : ИЗК, 2024. – Вып. 22. – С. 71–73.
7. Лосев В. И., Макаров В. А., Макаров И. В. Отражение медно-порфиорового оруденения Сухоложско-Сосновского потенциального рудного узла в геохимических и геофизических полях (Западный Саян) // Сборник тезисов докладов. Рудная школа ЦНИГРИ 2023. – М. : ЦНИГРИ, 2023 – С. 104–110.
8. Макаров В. А., Шадчин М. В., Лосев В. И., Глушков Ю. В. Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения – эталонного медно-порфиорового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции и перспективы обнаружения Au-Cu и Cu-порфиоровых объектов в структурах Западного и Восточного Саян // Геология и металлогения Центральной Сибири. Модели рудных месторождений (современная теория и практика). Сборник докладов II научно-практического семинара 6.12.2024. – Красноярск, 2025. – С. 14–31.
9. Руднев С. Н., Бабин Г. А., Семенова Д. В., Травин А. В. Эволюция интрузивного магматизма Западного Саяна // Геология и геофизика. – 2024. – № 10. – С. 1366–1384.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РУДОНОСНОСТЬ СУРГУТАНОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (РУДНЫЙ АЛТАЙ)

В работе исследуется геологическое строение и рудоносность Сургутановского рудного поля (Рудный Алтай). Результаты геохимической съемки, а также данные бурения предшественников подтверждают потенциал территории для обнаружения медно-свинцово-цинковых залежей и обосновывают целесообразность проведения дальнейших геологоразведочных работ.

Ключевые слова: медь, свинец, цинк, геохимия, Рудный Алтай.

Сургутановское рудное поле располагается в Золотушинском рудном районе в Рудно-Алтайской структурно-формационной зоне в пределах номенклатурного листа М-44-Х масштаба 1 : 200 000. В его пределах распространены вулканогенно-осадочные отложения нижнего палеозоя, эмского, эйфельского, живетского, франского и фаменского ярусов девона. Вулканогенные и вулканогенно-осадочные комплексы как в пределах других рудных районов (Змеиногорский, Рубцовский, Зыряновский и т.д.), так и на рассматриваемом Сургутановском рудном поле на основании состава, возраста и соотношения вулканогенной и осадочной составляющих разделяются на нижнюю (эмс – эйфель – ранний живет) базальтсодержащую андезит-дацит-риолитовую известково-кремнисто-терригенную калиевую (РКТ) и верхнюю (поздний живет – ранний фран) базальт-риолитовую кремнисто-терригенную калиево-натриевую формации [3].

Нижняя субформация базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации представлена туфогенно-осадочными породами (алевролиты, туфы кислого состава), которые отвечают образованиям мельничной свиты ($D_{1-2}e-ef$), имеющей распространение на восточном фланге Сургутановского рудного поля. Средняя субформация – риолитовая (риолиты и риодациты, туфы кислого состава), отвечающая образованиям сосновской свиты ($D_{2}ef-gv_1$) – также распространена на восточном фланге исследуемого рудного поля. Верхняя субформация РКТ в пределах исследуемой территории не представлена.

Верхняя базальт-риолитовая кремнисто-терригенная формация (БР) имеет трехчленное строение (снизу вверх): нижняя субформация – риодацитовая (риолиты, туфы кислого состава, редко дациты) – отвечает образованиям давидовской свиты ($D_{2}gv_2^2$), которая имеет широкое распространение в центральной и южной частях рудного поля; средняя субформация – риолитовая туфогенно-осадочная (алевролиты, туфы кислого состава, туфопесчаники, редко риолиты, их лавобрекчии) – соответствует нижней подсвите каменевской свиты ($D_{2}gv_2^2-D_{3}f_1$), окаймляющей отложения давидовской свиты с запада, севера и востока, верхняя субформация – туфогенно-осадочная (рифогенные известняки, алевролиты, туфы кислого состава) – на данной территории представлена верхней подсвитой каменевской свиты ($D_{3}f_1$), имеющей распространение на западном фланге Сургутановского рудного поля.

Подрудной формацией является известково-терригенная метаморфизованная, представленная в основном сланцами (Pz_1), локализующимися в северо-восточной части рудного поля. Перекрывающей рудоносные является вулканогенно-терригенная пестроцветная риолитсодержащая формация ($D_{3}f_2-fm$), представленная снежиревской свитой (преобладают туфопесчаники). Выходы на поверхность отложений данной свиты наблюдаются в северо-западном и юго-западном углах карты [3].

Переходя к характеристике магматизма на рассматриваемой территории, необходимо сказать, что интрузивные, субвулканические и вулканогенные породы занимают примерно 50 % от всей площади Сургутановского рудного поля. Возрастное расчленение интрузивных и субвулканических образований принято в соответствии с классификацией, разработанной для всего Золотушинского рудного района [1].

На изучаемой территории выделяются следующие интрузивные и субвулканические комплексы (начиная с древних):

1. Верхнедевонский комплекс субвулканических интрузий характеризуется наличием в разрезе риолитов (λD_3), дацитов (ζD_3) и андезитов (αD_3). В прошлом образования данного комплекса выполняли роль рудоподводящих каналов, формируя в рельефе вулканические постройки.

Оруденение и зоны минерализации локализовались в данном случае на склонах вулканов и некотором удалении от них. В качестве примера можно привести месторождение Юбилейное и рудопоявление Сургутановское, которые располагаются в пределах Сургутановского рудного поля. В обоих случаях, согласно разрезам и геометризованной модели, рудные тела представлены субсогласными пластовыми и линзовидными, реже комбинированными залежами, локализованными на склонах вулканических куполов и в мелких впадинах.

2. Змеиногорский интрузивный комплекс: граниты (γD_3) и плагиогранит-порфиры ($\gamma \pi D_3$).

3. Постзмеиногорская группа даек: габбро-долериты (νC_{2-3}) и диориты (δC_{2-3}).

В результате анализа данных поисковых работ предшественников было выделено два уровня оруденения.

Верхний уровень представлен многочисленными зонами минерализации, которые были встречены в нижней части разреза средней субформации (нижняя подсвита каменевской свиты) базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации среди переслаивающихся грубо-обломочных туфогенно-осадочных образований, представленных туфопесчаниками, туфами кислого состава, кремнистыми алевролитами и лавами риолитов. В совокупности данные породы образуют единую согласную зону минерализации мощностью до 100–120 м. Оруденение имеет вкрапленный, гнездово-вкрапленный, прожилково-вкрапленный и прожилковый характер. Преобладающим минералом является сфалерит; халькопирит и пирит встречаются реже.

Нижний уровень характеризуется зонами минерализации, которые были подсечены скважинами предшественников в нижней субформации базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации. Вмещающими данные зоны минерализации являются покровные кислые лавы давыдовской свиты. Оруденение имеет прожилково-вкрапленный и прожилковый характер.

Также единичными скважинами были подсечены маломощные минерализованные зоны, располагающиеся в субвулканических телах, которые представлены крупновкрапленными дацитами. Данная разновидность минерализации характеризуется прожилковыми и прожилково-гнездово-вкрапленными текстурными особенностями. Состав таких руд преимущественно медно-цинковый.

В пределах Сургутановского рудного поля выделяется два перспективных участка – Ермошихинский, располагающийся в юго-западной части карты, южнее месторождения Юбилейное, и Восточно-Сургутановский, тяготеющий к северо-восточному углу.

На Ермошихинском участке, имеющим размеры 7 на 2,5 км и простирающимся в субмеридиональном направлении, в результате бурения поисковых скважин предшественниками на семи профилях (общее количество поисковых профилей – 12) были подсечены минерализованные зоны, относящиеся как к верхнему уровню оруденения (глубины от 80 до 200 м), так и к нижнему (глубины от 350 до 450 м). Содержания в пределах верхнего уровня по Cu варьируют от 0,03 до 1,97 %, по Pb – от 0,02 до 1,19 %, по Zn – от 0,3 до 8,21 %. Содержания в пределах нижнего уровня по Cu варьируют от 0,04 до 3,78 %, по Pb – от 0,015 до 0,02 %, по Zn – от 0,036 до 1,54 %. Помимо вышеперечисленных уровней оруденения, также были встречены маломощные минерализованные зоны (Cu – 0,19 %, Pb – 0,12 %, Zn – 1,23 %), располагающиеся в субвулканических телах (дациты), которые в прошлом выполняли роль рудоподводящих каналов [2].

На Восточно-Сургутановском участке, имеющим размеры 6 на 1,5 км, в результате бурения поисковых скважин предшественниками также были получены подсечения минерализованных зон на трех профилях (общее число поисковых профилей – 4). Данные минерализованные зоны относятся к верхнему уровню оруденения (глубины от 70 до 300 м). Содержания полезных компонентов по Cu варьируют от 0,03 до 3,52 %, по Pb – от 0,01 до 1,49 %, по Zn – от 0,03 до 1,40 %. Также была встречена минерализация в субвулканических дацитах на глубинах 250–300 м (Cu – от 0,05 до 0,66 %, Pb – от 0,05 до 0,59 %, Zn – от 0,63 до 6,22 %) [1].

В 2024 году на Сургутановском рудном поле была проведена геохимическая съемка масштаба 1 : 50 000 ионно-сорбционным методом. Все отобранные пробы были подвергнуты обработке методом масс-спектрометрии в лаборатории ФГБУ «ЦНИГРИ». По результатам проведенных лабораторных работ был сделан вывод, что наибольшая плотность точек с аномальным содержанием свинца и цинка проявлена в северо-восточной и центральной частях исследуемого рудного поля (рис. 1). Пробы с содержанием этих элементов значимо превышают геохимический фон ($C_{\phi}(Zn) = 6,50$ г/т; $C_{\phi}(Pb) = 6,20$ г/т).

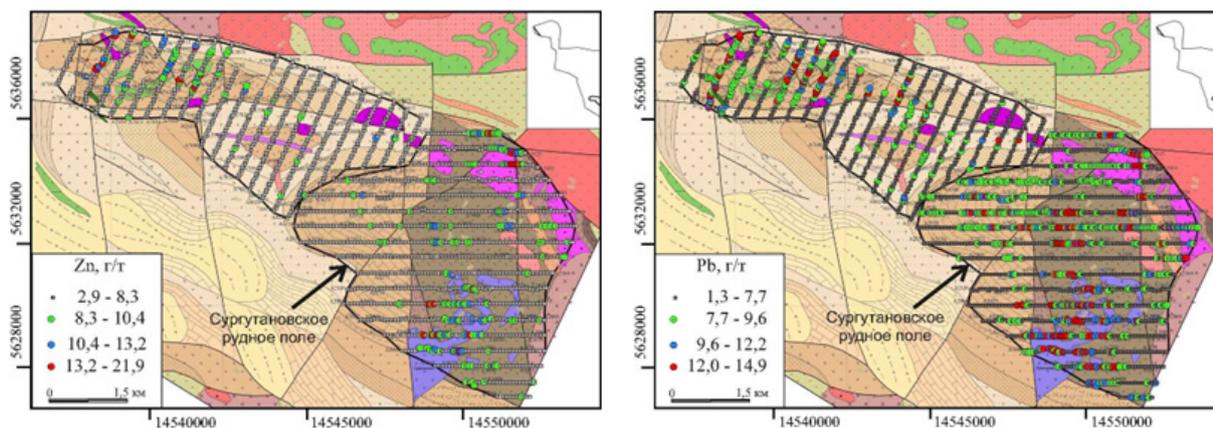


Рис. 1. Содержания свинца и цинка в точках опробования на фрагменте геологической карты

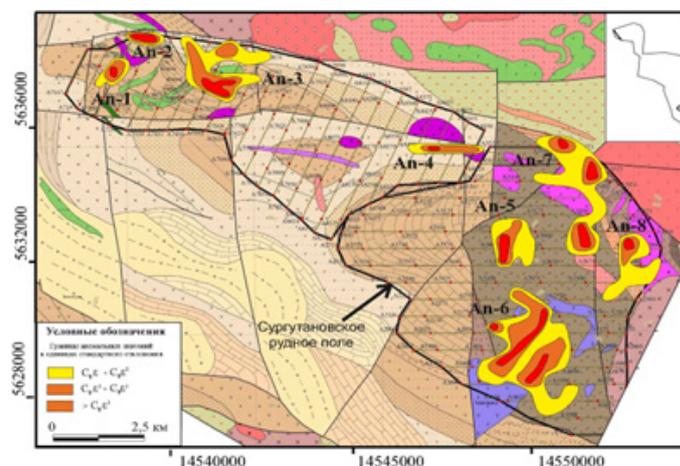


Рис. 2. Положение аномалий мультипликативного показателя $J_1 = Pb \times Cu \times Zn \times Cd$ на фрагменте геологической карты с указанием их порядковых номеров

Для подавления случайных помех в распределении рудообразующих элементов и повышения контрастности их совместных аномалий были построены карты мультипликативных показателей ($J_1 = Pb \times Cu \times Zn \times Cd$; $J_2 = Ni \times Co \times Cr \times V$; $J_3 = Ba / As$), которые отражают различную изменчивость геохимического поля.

Наибольшая плотность точек с аномально высокими значениями мультипликативных показателей $J_1 = Pb \times Cu \times Zn \times Cd$ и $J_3 = Ba / As$ в центральной части Сургутановского рудного поля говорит, вероятно, о том, что их положение соответствует проекции погребенного оруденения (рис. 2).

Стоит также отметить, что в строении Сургутановского рудного поля принимают участие структуры, играющие важную роль с точки зрения локализации медно-свинцово-цинкового оруденения. Минерализованные зоны тяготеют к мелким впадинам, которые зачастую располагаются на склонах палеовулканических построек. Также необходимо сказать, что такого типа структуры были закартированы предшественниками на Юбилейном месторождении и его флангах.

В результате анализа данных предшественников и на основании приведенной информации предварительно можно выделить два перспективных участка для проведения геологоразведочных работ поисковой стадии, по результатам которых возможно выявление двух месторождений среднего масштаба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев М. П., Астафьева Л. А., Фалейчик И. В., Кириллова Т. А. Отчет о поисковых работах на Сургутановском участке (Титовско-Сургутановская структура), проведенных Успенской партией в 1974–1977 гг. В 2-х томах. Том 1. – Горняк : Министерство геологии РСФСР.

Западно-Сибирское геологическое управление. Рудно-Алтайская экспедиция. Успенская партия, 1977.

2. Боков В. К., Бокова Г. И., Сухарева М. П., Фатин В. И., Кейно В. Л., Синдяев Ю. В., Карасев Б. Н. Отчет о детальном поиске полиметаллических руд на флангах Юбилейного месторождения и общих поисках на площади Ермошихинского участка (Золотушинский рудный район), проведенных Успенской партией в 1970–1986 гг. В 3-х книгах. Книга I. – Новокузнецк : Министерство геологии РСФСР. Производственное геологическое объединение «ЗапСибГеология». Рудно-Алтайская экспедиция, 1991.
3. Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В., Мурзин О. В., Корчагина Д. А., Кузнецова С. В., Миляев С. А. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – 207 с.

Мартынович Д. И. (danidani88888s@gmail.com)

ПГНИУ, г. Пермь

О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ УКРУПНЕНИЯ ЗОЛОТА В ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЯХ ПРИ ПОМОЩИ МИКРООРГАНИЗМОВ

В данной статье предложен способ улучшения перспективности техногенных россыпей при помощи микроорганизмов. Обнаружены критерии поиска необходимых для данной цели бактерий и организмов. Выделены наиболее удобные для данной цели организмы.

Ключевые слова: золото, микроорганизмы, техногенные россыпи, отвалы, укрупнение зерен.

Введение. При добыче золота формируются техногенные отвалы – россыпи. По данным исследователей, в отвалах всегда находится определенное количество металла, которое может достигать промышленных значений, особенно при улучшении аппаратуры, применяемой для добычи полезного компонента [10].

По гранулометрическому составу золото в отвалах или очень крупное, или тонкое, а средние фракции представлены слабо из-за того, что они легче извлекаются [10]. Однако, несмотря на то, что металл в подобных отвалах преимущественно мелкий, наблюдается тенденция к росту его частиц в сжатые сроки (1–5 лет) [4, 5]. При таком росте образуются агрегаты золота, обычно состоящие из глобул. Основной известный механизм укрупнения золота связан с образованием кристаллических центров, вокруг которых происходит рост золота. То есть золото осаждается из растворов или коллоидов на «затравки», которыми могут стать соединения гидроксидов железа, глинистые минералы или золото. Затем осажденные частицы укрупняются, проникают друг в друга благодаря процессам диффузии [9]. Кроме того, золото может осаждаться из пересыщенных поровых вод на поверхности пирита в техногенно-минеральных образованиях месторождений сульфидного типа [8]. Однако, ученые также отмечают, что закономерности этих процессов детально не изучены, и допускают, что они протекают при положительном влиянии бактерий [4, 5, 8]. На данный момент найдены зерна золота, морфология которых позволяет предположить, что они были образованы при прижизненной деятельности микроорганизмов [9]. Из этого следует, что необходимо уделять данному аспекту больше внимания, ведь на настоящий момент отвалы горнорудных предприятий – потенциальные месторождения полезных ископаемых. Кроме того, знание о влиянии микроорганизмов при образовании золота позволит придумать способы стимулирования процессов, направленных на увеличение содержания полезного компонента в отвалах или же на упрощение его обогащения.

Объект исследования. Цель данного исследования заключается в том, чтобы показать возможность применения микроорганизмов для интенсификации роста золота в отвалах. По мнению автора настоящей статьи, если культивировать определенный объем организмов и внедрить в отвалы, то можно ускорить рост зерен золота. Но для этого нужно выделить несколько критериев, которыми должен обладать микроорганизм. Первым и наиболее важным из критериев

является способность организма восстанавливать золото из растворов или коллоидов внеклеточно. Вторым критерием является их способность существовать в условиях, приблизительно соответствующих отвалу, то есть организм должен быть почвенным. Третьим критерием является простота культивации организма. Кроме того, с экономической точки зрения желательно, чтобы этот организм был широко распространен, так как для культивирования необходимо определенное начальное количество организмов.

Исследования показали, что такие микроорганизмы, как экстремальные термофильные актиномицеты способны восстанавливать ионы золота и стабилизировать наночастицы золота, что обусловлено ферментативным процессом [13]. Кроме того, данные микроорганизмы можно культивировать [1], и они живут в почвах. Таким образом, можно предположить, что их внедрение в отвалы позволило бы ускорить процесс укрупнения золота путем его восстановления из растворов. Единственным недостатком этих организмов является то, что они растут при температуре свыше 70 градусов, что может вызвать сложности при культивировании [3].

Однако существуют организмы, которые намного легче культивировать и которые также способны восстанавливать золото из растворов. Бактерии *Rhodospseudomonas capsulata* широко распространены в природе и образуют стабильные наночастицы золота внеклеточно [15]. Кроме того, их достаточно легко культивировать, ведь они способны расти даже на глюкозе и фруктозе [20].

Кроме того, микроорганизм *Verticillium sp.* можно применять и для восстановления золота [16], но он в активном состоянии существует лишь в растениях [11], поэтому не подходит для внедрения в техногенные россыпи золота. Однако существуют исследования по применению экстракта из разрушенных клеток *Verticillium*, с помощью которого были образованы наночастицы золота из ионов золота [14].

Также существуют микроорганизмы – *Fusarium oxysporum*, – способные восстанавливать золото внеклеточно [17], они живут в почве [19]. При этом данные организмы культивируются в различных средах при невысокой температуре (23 °C) [6]. Таким образом, данный организм подходит согласно всем выделенным критериям.

Стоит отметить, что микроорганизм *Marinobacter Pelagius JCM 14804*, а точнее штамм RS11 на 99,6 %, совпадающий с ним, также способен синтезировать частицы золота. Данный организм культивируется при температуре 30–37 °C, но у него есть некоторые недостатки. Во-первых, организмы рода *Marinobacter* морские, а значит им необходима минерализованная вода (2–4 % NaCl (по массе)) [18]. Это подтверждается и другим исследованием, в котором отмечено, что организм, относящийся к данному роду, был обнаружен в нефтяных пластах с высокоминерализованной пластовой водой [7].

Таким образом, наиболее перспективными организмами для интенсификации роста зерен золота в отвалах являются *Rhodospseudomonas capsulata* и *Fusarium oxysporum*.

Хотя, по мнению автора настоящей статьи, важнейшим критерием для микроорганизма является способность его к внеклеточному восстановлению золота, нельзя отрицать существования перспективы применения и микроорганизмов, способных восстанавливать золото внутриклеточно. Данная перспектива связана с тем, что экстракт из разрушенных клеток также способен восстанавливать частицы золота [14]. В связи с этим стоит перечислить данные организмы: *Rhodococcus sp.* [12], *P. jadinii* и *V. luteoalbum* [14].

Также нельзя исключать микроорганизмы, которые не восстанавливают золото из растворов, но способны создавать условия для аккумуляции золота, для укрупнения его зерен. Таковыми бактериями являются железooksисляющие бактерии [5]. Вероятнее всего, данные бактерии создают необходимую «затравку», на которой осаждается золото, поскольку, основой для осаждения могут служить гидроксиды железа [9]. Наиболее известными из этих бактерий являются *Acidithiobacillus ferrooxidans*, которые активны в широком диапазоне температур (5–55 °C) и способны в 106 раз превышать скорость небактериального окисления [2]. При внедрении таких микроорганизмов в отвалы в комплексе с бактериями, способными восстанавливать золото, можно добиться наиболее эффективного восстановления и укрупнения золота в техногенных россыпях.

Вывод. По результатам данного исследования выделены наиболее удобные для применения в отвалах микроорганизмы для интенсификации роста зерен золота и повышения

перспективности техногенных месторождений золота. Приведенные в статье материалы являются начальным этапом исследований в направлении дальнейшего развития способов повышения извлекаемости золота из отвалов горнорудных предприятий. Последующая деятельность, направленная на уточнение и конкретизацию аспектов осуществления биотехнологии доизвлечения золота, должна, в первую очередь, быть связана с лабораторными испытаниями по восстановлению золота с участием предложенных микроорганизмов. Вероятно, дальнейшую апробацию данной технологии можно также осуществить путем создания уменьшенной модели отвала с последующим внедрением микроорганизмов и как можно более полным воспроизведением в данной модели природных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуганов Г. Э., Бикбаева А. Р. Биология развития актиномицетов // E-Scio. – 2019. – № 6 (33). – С. 577–580.
2. Алексеев В. А. Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // Геохимия. – 2022. – № 1. – С. 69–83.
3. Курапова А. И., Зенова Г. М., Орлеанский В. К., Манучаров А. С., Норовсурэн Ж. Мезофильные и термотолерантные актиномицеты в разогреваемых почвах // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2008. – № 3. – С. 45–50.
4. Наумов В. А., Наумова О. Б. Преобразование золота в техногенных россыпях // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5 (URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9984> (дата обращения: 11.01.2026)).
5. Наумов В. А., Наумова О. Б. Формы нахождения и перспективы освоения золота в природных и техногенно-минеральных образованиях Западного Урала // Вестник Пермского университета. Геология. – 2019. – № 1. – С. 55–63.
6. Султанова М. Х. Влияние источников питания на рост, развитие и патогенность гриба *Fusarium oxysporum* f. *vasinfectum* // Доклады академии наук Республики Таджикистан. – 2011. – № 10. – С. 851–855.
7. Турова Т. П., Соколова Д. Ш., Семенова Е. М., Ершов А. П., Грузлев Д. С., Назина Т. Н. Геномные и физиологические характеристики галофильных бактерий родов *Halomonas* и *Marinobacter* из нефтяных пластов // Микробиология. – 2022. – № 3. – С. 285–299. DOI: 10.31857/S0026365622300036
8. Хусаинова А. Ш. Поведение золота в техногенно-минеральных образованиях месторождений золото-сульфидного типа : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.11 / Хусаинова А. Ш. – Новосибирск, 2020. – 25 с.
9. Хусаинова А. Ш. Признаки гипергенного роста самородного золота в отвалах полиметаллических месторождений // Металлогения древних и современных океанов. – 2019. – С. 155–159.
10. Шило Н. А. Основы учения о россыпях – М. : Изд-во Наука, 1985. – 400 с.
11. Шуберт П., Голбэк Дж., Шверзел Х., Лентч П., Кусаинова М. Д. Температурная зависимость патогена *Verticillium dahlia* Kleb. на культуру клубники сорта «Elsanta» // Почвоведение и агрохимия. – 2012. – № 2. – С. 38–44.
12. Ahmad A., Senapati S., Khan M. I., Kumar R., Ramani R., Srinivas V., Sastry M. Intracellular synthesis of gold nanoparticles by a novel alkalotolerant actinomycete, *Rhodococcus* species // Nanotechnology. – 2003. – P. 824–828. DOI:10.1088/0957-4484/14/7/323
13. Ahmad A., Senapati S., Khan M. I., Kumar R., Sastry M. Extracellular biosynthesis of monodisperse gold nanoparticles by a novel Extremophilic actinomycete, *Thermomonospora* sp. // Langmuir. – 2003. – № 19. – P. 3550–3553. DOI:10.1021/la026772l
14. Gericke M., Pinches A. Microbial production of gold nanoparticles // Gold bulletin. – 2006. – № 39. – P. 22–28.
15. He S., Guo Z., Zhang Y., Zhang S., Wang J., Gu N. Biosynthesis of gold nanoparticles using the bacteria *Rhodospseudomonas capsulata* // Materials Letters, Issue 18. – 2007. – P. 3984–3987. DOI:10.1016/j.matlet.2007.01.018
16. Mukherjee P., Ahmad A., Senapati S., Sainkar S.R., Khan M.I., Ramani R., Parischa R., Ajayakumar P.V., Alam M., Sastry M., Kumar R. Bioreduction of AuCl₄⁻ ions by the fungus, *Verticillium* sp.

- and surface trapping of the gold nanoparticles formed // *Angewandte Chemie – International Edition*, Issue 19. – 2001. – P. 3585–3588. DOI:10.1002/1521-3773(20011001)40:19<3585::AID-ANIE3585>3.0.CO;2-K
17. Mukherjee P., Senapati S., Mandal D., Ahmad A., Khan M.I., Kumar R., Sastry M. Extracellular synthesis of gold nanoparticles by the fungus *Fusarium oxysporum* // *ChemBioChem*. – 2002. – 3(5). – P. 461–463. DOI:10.1002/1439-7633(20020503)3:5<461::AID-CBIC461>3.0.CO;2-X
 18. Sharma N., Pinnaka A.K., Raje M., Ashish A. Exploitation of marine bacteria for production of gold nanoparticles // *Microbial Cell Factories*. – 2012. – V. 11(1). – P. 86. DOI:10.1186/1475-2859-11-86
 19. Srinivas C., Devi D. N., Murthy K. N., Mohan C. D., Lakshmeesha T., Singh B. P., Kalagatur N. K., Niranjana S. R., Hashem A., Alqarawi A. A., Tabassum B., Abd-Allah E. F., Nayaka S. C. *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: Biology to diversity – A review // *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2019. – 26(7). – P. 1315–1324. DOI:10.1016/j.sjbs.2019.06.002
 20. Van Niel C. B. The culture, general, physiology, morphology, and classification of the non-sulfur purple and brown bacteria // *Bacteriology Reviews*. – 1944. – 8(1). – P. 1–118. DOI:10.1128/br.8.1.1-118.1944

Мильская А. А. (a.milskaya@alumni.nsu.ru)

ИГМ СО РАН, г. Новосибирск

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУМРОЧ, КАМЧАТКА

Рассматривается минералогия и геохимия золоторудного месторождения Кумроч, являющегося одним из наиболее перспективных объектов Камчатки. Выявлены и изучены минеральные ассоциации, построена схема последовательности рудообразования. С помощью ЛА-ИСП МС исследован микроэлементный состав пирита и халькопирита разных генераций.

Ключевые слова: Камчатка, золоторудное месторождение, ЛА-ИСП МС, пирит, халькопирит.

Основой данного исследования является бакалаврский диплом на ГГФ НГУ, выполненный автором по материалам лаборатории Прогнозно-металлогенических исследований ИГМ СО РАН.

Месторождение Кумроч, расположенное в средней части Восточно-Камчатской тектонической зоны, является одним из наиболее значимых объектов на Камчатке и характеризуется комплексной многостадийной структурой рудоотложения [1], в которой сочетаются признаки как Au-Cu-порфирового, так и золото-серебряного жильного рудогенеза [2]. Источником гидротермальной рудоносной системы месторождения являлись интрузии диоритовых порфиров миоцен-плиоценового возраста, содержащие вкрапленную медную минерализацию, и зоны объемной гидротермальной проработки с золоторудными полисульфидно-кварцевыми жилами. Вместе они могут рассматриваться как части единой золото-медно-порфировой рудно-магматической системы «кумрочского типа» [3].

В геологическом строении месторождения выделяют два структурных этажа: нижний – позднемиоценового-раннепалеогенового возраста со складчато-надвиговой структурой, представлен туфогенной хапицкой и песчано-алевролитовой дроздовской свитами, и верхний – вулканогенные отложения миоцен-плиоценового и четвертичного возраста [4]. Интрузивные образования разделяются на три комплекса: миоцен-плиоценовый, плиоценовый и четвертичный комплекс. Наибольшее распространение имеет миоцен-плиоценовый комплекс, сложенный породами средне-основного состава нормального и субщелочного рядов, которые образуют штокообразные тела [1, 4]. Широко развиты разрывные нарушения, в которых выделяется четыре системы разломов. Наиболее важную роль в локализации эпitherмального оруденения играет система тектонических нарушений субширотного и субмеридионального простираний [1].

Рудовмещающий комплекс представлен жилами и жильными зонами в диоритовых порфири-тах миоцен-плиоцена и в вулканогенно-осадочных образованиях хапицкой и терригенно-осадочных отложениях дроздовской свит, причем, как правило, оруденение локализуется на расстоянии не более 300 м от контакта интрузивных массивов [4].

На Кумроче выделяются три участка: Южный, Центральный (наиболее продуктивный) и Северный.

В результате минералогических исследований было выделено четыре стадии минерало-образования и пять минеральных ассоциаций: халькопирит-магнетитовая, пирит-рутиловая, пирит-арсенопиритовая, золото-полиметаллическая и блеклорудно-теллуридная, из которых халькопирит-магнетитовая имеет большее распространение на Южном, пирит-арсенопиритовая – на Южном и Центральном, золото-полиметаллическая – на Центральном, блеклорудно-теллуридная – на Центральном и Северном участках.

С помощью ЛА-ИСП МС был проанализирован пирит из пирит-арсенопиритовой (пирит III) и золото-полиметаллической (пирит IV) ассоциаций, а также из полиметаллической ассоциации Южного участка, где самородное золото было встречено в единичном случае. В последнем случае кристалл пирита был зональным, поэтому был проанализирован по секторам (от центра к периферии пирит IV-а, IV-б, IV-в, IV-д).

Пирит III имеет повышенные концентрации Co относительно других разновидностей пирита, а также Ni относительно Py IV-г и Py IV. Содержания Cr, Mo, W, Ti, V, Mg, Ba, Te в тех же пределах, что и у Py IV. Самые низкие медианные значения по таким элементам, как Mg, Ti, V, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Ag, Sn, Sb, Te, Ba, W, Au, Pb, Bi. Наблюдаются в основном плоские графики, указывающие на равномерное распределение элементов, и редко отмечаются «всплески» (аномалии) Cu.

Пирит IV-а среди пирита генерации IV имеет самые низкие (медианные) значения As, Ag, Sb и Te, а также Au наряду с Py IV, самые высокие значения Mg, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Sn, Ba, Pb относительно других разновидностей и Bi наряду с Py IV-г, а также повышенные значения Co и Zn относительно Py IV-б, Py IV-в, Py IV-г. Содержание Au от 0,04 до 2,38 г/т (медиана – 0,2 г/т) понижено относительно Py IV-б, Py IV-в, Py IV-г, а Ag от 0,37 до 155,88 г/т (медиана – 2,4 г/т) – также понижено относительно других разновидностей, за исключением Py III. Распределение элементов на графике относительно равномерное, однако редко встречаются всплески Pb-Bi.

Пирит IV-б обогащен Cu и Te относительно остальных разновидностей. Содержание Au от 0,06 до 7,07 г/т (медиана – 0,47 г/т), а Ag от 0,47 до 437,18 г/т (медиана – 24,63 г/т). Распределение элементов на графике относительно равномерное, часто встречаются всплески Pb-Ag-Bi.

Пирит IV-в имеет самые низкие (медианные) значения Mg, V, Cr, Mn, Co, Zn, Sn, W, Bi, а также Ba (наряду с Py IV-г) относительно Py IV-а, Py IV-б, Py IV-в, самые низкие содержания Pb и самые высокие Mo относительно других проанализированных разновидностей пирита. Содержание Au от 0,06 до 2,65 г/т (медиана – 0,59 г/т), а Ag от 0,34 до 47,52 г/т (медиана – 6,19 г/т). Распределение элементов на графике относительно равномерное, редко встречаются всплески Pb-Ag-Bi и Zn.

Пирит IV-г имеет самые низкие (медианные) значения Ti, Ni, Mo, а также Ba наряду с Py IV-в относительно Py IV-а, Py IV-б, Py IV-в, самые высокие содержания As, Ag, Sb, W, Au относительно других проанализированных разновидностей пирита и Bi наряду с Py IV-а. Содержания Au от 0,86 до 206,22 г/т (медиана – 49,19 г/т) и Ag от 0,53 до 127,16 г/т (медиана – 35,4 г/т) повышены относительно других разновидностей. Распределение элементов на графике относительно равномерное, встречаются всплески Pb-Ag-Bi, реже Au.

Пирит IV имеет самые низкие содержания (медианные значения) Co, Ni, Mo, самые низкие концентрации Mg, Ti, V, Cr, Mn, Te, Ba, W, Au, Bi относительно Py IV-а, Py IV-б, Py IV-в, Py IV-г, а также самые высокие концентрации Zn относительно остальных проанализированных разновидностей пирита. Содержание Au от 0,01 до 1,21 г/т (медиана – 0,18 г/т), а Ag от 2,47 до 68,65 г/т (медиана – 17,91 г/т). Распределение Pb и Zn часто бывает неравномерным и скачкообразным.

С помощью ЛА-ИСП МС также был изучен микроэлементный состав халькопирита из халькопирит-магнетитовой (халькопирит I), пирит-арсенопиритовой (халькопирит II) и золото-полиметаллической (халькопирит III) ассоциаций.

Халькопирит I имеет самые низкие содержания Ti, Mn, Zn, As, Ag, Sb, а также Mg, V и Au наряду с Сср III, самые высокие концентрации Sn, Te, Pb относительно остальных проанализированных разновидностей халькопирита. Содержание Au от 0,007 до 0,29 г/т (медиана – 0,01 г/т), а Ag от 2,02 до 63,6 г/т (медиана – 2,35 г/т). Распределение элементов на графиках равномерное.

Халькопирит II имеет самое низкое содержание Te, самые высокие концентрации Mg, Ti, V, Mn, Co, Ni, As, Mo, Ag, Sb, Au, Bi относительно остальных проанализированных разновидностей халькопирита. Содержание Au от 0,04 до 1,1 г/т (медиана – 0,4 г/т), а Ag от 39,96 до 393,28 г/т (медиана – 78,15 г/т). На графиках присутствуют всплески Pb-Ag, Mg, Sb, распределение элементов неравномерное.

Халькопирит III имеет самые низкие содержания Co, Ni, Sn, Ba, Pb, Bi, Mg, а также V и Au наряду с Сср I, самые высокие концентрации Zn относительно остальных проанализированных разновидностей халькопирита. Содержание Au от 0,006 до 0,22 г/т (медиана – 0,01 г/т), а Ag от 1,36 до 67,14 г/т (медиана – 28,43 г/т). Равномерное распределение элементов, за исключением встречающихся всплесков Pb-Ag.

Пирит IV-а–IV-г – переходный между пиритом III и пиритом IV по содержанию Co, Zn и Ag, всплески Pb, Pb-Ag, Pb-Ag-Bi, Zn и Au указывают на наличие микровключений. Разные генерации исследованного халькопирита имеют схожие концентрации по Cr, W, Ti и Te. Сср II является переходным по содержанию Zn, Pb, Bi и Ba. Для халькопирита также было установлено наличие всплесков Pb, Pb-Ag и Pb-Ag-Bi.

Установленное в результате проведения ЛА-ИСП МС высокое Co : Ni отношение в ранних генерациях пирита и халькопирита может свидетельствовать о гидротермальном магматическом происхождении сульфидов, а уменьшение этого отношения от более ранних генераций пирита и халькопирита к более поздним – о генетической взаимосвязи золотоносной минерализации с диоритовыми порфиритами миоцен-плиоценового комплекса.

Повышенные концентрации Co в пирите III, Co, Ti, Ni в пирите IV-а указывают на потенциальное наличие на глубине материнского базитового плутона в рудном поле месторождения Кумроч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Округин В. М., Шишканова К. О., Философова Т. М. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Кумроч, Восточная Камчатка // Руды и металлы. – 2019. – № 2. – С. 84–96.
2. Волков А. В. Золотые перспективы Камчатского края // Золото и технологии. – 2019. – № 1. – С. 66–73.
3. Калинин Ю. А., Шелепаев Р. А., Жимулев Ф. И., Томиленко А. А., Куйбида М. Л., Хусаинова А. Ш., Греку Е. Д., Яковлев В. А., Шаповалова М. О., Затолокина К. И. К минералого-геохимической модели формирования оруденения Кумрочского типа (Камчатка) // Сборник тезисов докладов XII Международной научно-практической конференции (11–14 апреля 2023 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). – М. : ЦНИГРИ, 2023. – С. 188–192.
4. Шелепаев Р. А., Калинин Ю. А., Томиленко А. А. и др. Итоговый отчет по теме: «Создание минералого-геохимической модели образования золоторудных месторождений для Кумрочского рудного поля с формированием минералого-геохимических критериев для поисков объектов аналогов». – Новосибирск : ИГМ СО РАН. – 2022. – 231 с.

Михалко Н. П. (mikhalko.np@vims-geo.ru),
Попов Е. М. (egor_popov02@mail.ru), Даниленко И. С. (danilenkos766@gmail.com)
ВИМС, г. Москва

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД В ПРЕДЕЛАХ ХУНХАДИНСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО Au-Pb-Zn-W-Sn РУДНОГО УЗЛА (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Интрузивные образования Хунхадинского потенциального рудного узла представлены небольшими массивами и штокоподобными телами кислых пород уэмляхского ($\delta\gamma$ - γ K_1u) гранит-гранодиоритового комплекса. С гранитоидами уэмляхского комплекса связано жильно-штокверковое и стратиформное вольфрамовое оруденение. Проявления вольфрамовой (шелитовой) минерализации приурочены к выходам гранитоидов Джоантанджинского массива и изометричных штокообразных тел гранодиоритов в пределах двух участков: Дуга и Борикчак. Вокруг магматических тел развиты широкие контактово-метасоматические ореолы измененных пород. Схематичная геологическая карта Хунхадинского потенциального рудного узла приведена на рис. 1.

В пределах участка Дуга штокообразные тела гранодиоритов приурочены к сводовой части Лево-Хунхадинской антиклинали, осложненной серией диагональных разрывов. Наиболее крупным является дугинский шток, изометричный в плане, размером 250×250 м, прорывающий терригенные отложения дулгалахской свиты верхней перми [3].

Шток сложен светло-серыми порфирированными гранодиоритами. Отмечается зональность внутри пород штока: от центра к периферии светло-серые слабоизмененные гранодиориты сменяются буро-оранжевыми сильноизмененными гранодиоритами. Кроме того, в западной и восточной части штока отмечается грейзенизация.

Минеральный состав *гранодиоритов*: плагиоклаз (55 %), КПШ (10 %), кварц (30 %), биотит (до 5 %), рудный минерал (до 1 %). Гранодиориты сложены призматическими от $0,4 \times 0,1$ до $3 \times 0,8$ мм кристаллами *плагиоклаза*, изометричными зернами *кварца* и ксеноморфными, реже таблитчатыми кристаллами *калиевого полевого шпата* (0,3–0,5 мм). Темноцветные минералы представлены биотитом (0,5–0,8 мм), частично замещенным *хлоритом*, отмечаются включения рудного минерала. Зональные кристаллы плагиоклаза в центральной части имеют состав An_{45} , ближе к краевым зонам плагиоклаз раскисляется до An_{25} . Крупные зерна плагио-

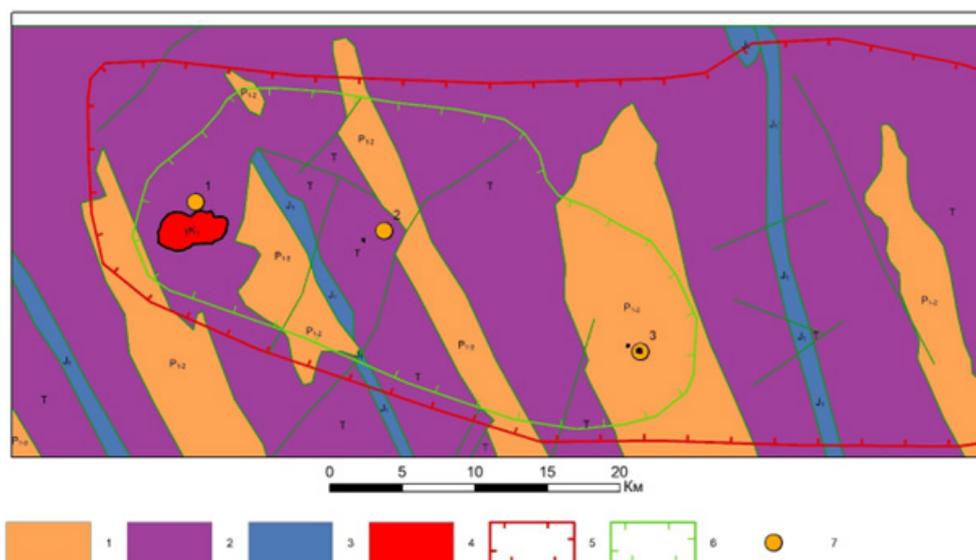


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Хунхадинского потенциального рудного узла [1]:
1 – пермские отложения; 2 – триасовые отложения; 3 – юрские отложения; 4 – гранитоиды уэмляхского комплекса; 5 – Томпо-Брюнгадинская минерагеническая зона; 6 – Хунхадинский рудный узел; 7 – проявления рудной минерализации: 1 – Джоантанджинское (W), 2 – Борикчакское (W), 2 – Дуга (W)

клаза и раннего кварца на фоне мелких зерен позднего кварца и калишпата формируют элементы порфировидной структуры. Кварц двух генераций: 1-я генерация представлена крупными округлыми зернами кварца размером 0,7–1,8 мм, образующимися в паре с крупными зернами плагиоклаза; 2-я генерация представляет собой мозаичные агрегаты мелких зерен кварца, размером 0,2–0,6 мм, заполняющих интерстиции между крупными кристаллами плагиоклаза и кварца 1-й генерации. Кварц 2-й генерации встречается в ассоциации с калишпатом. КПШ локализуется внутри агрегатов мелких зерен кварца 2-й генерации. Редко калишпат граничит с плагиоклазом. Признаков замещения плагиоклаза не обнаружено, микроклиновое решетчатость отсутствует. Калишпат заполняет интерстиции вместе с поздним кварцем, что говорит об их одновременной кристаллизации.

Магматические породы на **участке Борикчак** представлены выходом штокообразного тела светло-серых средне-мелкозернистых порфировидных гранодиоритов.

Минеральный состав гранодиоритов: плагиоклаз (40 %), кварц (35 %), КПШ (10 %), биотит (10 %), рудный минерал (до 5 %). *Плагиоклаз* формирует крупные таблитчатые кристаллы размером в среднем $1 \times 0,4$ мм с полисинтетическими и концентрическими двойниками. Состав раскисленного плагиоклаза An_{30} , мелкие зерна имеют состав An_{26} . По методу В. Н. Лодочникова насчитано 11 изохроматических колец, состав раннего плагиоклаза $An_{30} + 11 \times 2 = An_{52}$ (лабрадор). Так же, как и в гранодиоритах Дугинского участка, в гранодиоритах Борикчака встречается кварц двух генераций: 1-й генерации, ранний, представлен крупными зернами размером 1,4–1,7 мм; кварц 2-й генерации образует мелкие изометричные зерна размером 0,1–0,3 мм, заполняет интерстиции между крупными кристаллами. Калиевый полевой шпат в виде единичных ксеноморфных зерен встречается в ассоциации с поздним кварцем (рис. 2). Кроме того, в гранодиоритах Борикчака отмечается площадная грейзенизация.

Грейзенизация в гранодиоритах участков Дуга и Борикчак протекает с сохранением реликтовой гранитной структуры. Мусковит образует сплошные псевдоморфозы по полевым шпатам. Отдельно отмечаются гранобластовые зерна наложенного кварца. Кроме того, встречаются тонкие *флюоритовые* прожилки, секущие грейзенизированные гранодиориты.

Джоантанджинский массив (площадью ~ 10 км²) расположен в северо-западной части узла, вытянут в северо-западном направлении. Массив имеет зональное строение. В краевых частях преобладают существенно роговообманковые гранодиориты, сменяющиеся к центру биотитовыми гранодиоритами, центральная часть сложена гранитами. Структура среднекристаллическая, однородная. Средний минеральный состав гранитоидов: плагиоклаз (30–45 %), кварц (20–30 %), калиевый полевой шпат (25–35 %), биотит (1–5 %), роговая обманка (0–5 %).

Изменение минерального состава происходит постепенно: от периферии к центру цветное число в гранитоидах уменьшается (с 10 % до 1 %), сначала сокращается количество роговой

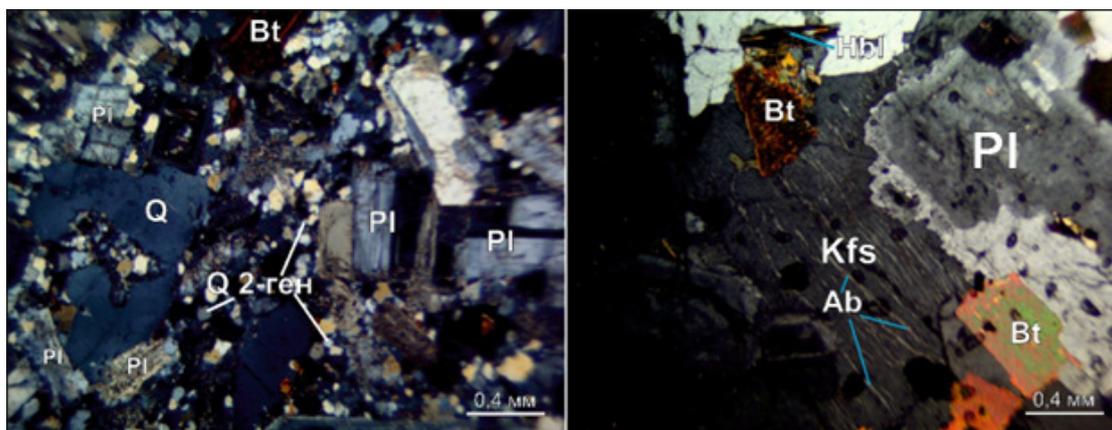


Рис. 2. Порфировидные гранодиориты, развитые в пределах Дугинского и Северо-Борикчакского проявлений (слева), и крупнокристаллические гранодиориты Джоантанджинского массива (справа):

Pl – плагиоклаз, Kfs – калиевый полевой шпат, Ab – альбит, Q – кварц, Q 2-ген – кварц второй генерации, Bt – биотит, Hbl – роговая обманка

обманки вплоть до полного исчезновения, затем количество биотита. Увеличивается соотношение калишпата к плагиоклазу. Возрастает количество кварца. Гранитоиды на проявлении Контакт практически не изменены.

Плагиоклаз образует крупные таблитчатые кристаллы размером от $0,2 \times 0,1$ до $3,1 \times 2$ мм, в среднем $2 \times 1,5$ мм. Вокруг кристаллов образуется оторочка из кислого плагиоклаза без двойников, рельеф выше, чем у кварца, состав An_{20-28} . Сдвойникованный плагиоклаз также раскислен, его состав An_{31} . Мелкие неровные кристаллы плагиоклаза встречаются в виде реликтов в калишпате.

Кварц представлен округлыми и ксеноморфными кристаллами, заполняющими интерстиции между фенокристаллами плагиоклаза. Размеры кристаллов от 0,3 до 2,5 мм, в среднем 1,1 мм. Кварц также встречается в виде включений в калишпате.

Калиевый полевой шпат образует таблитчатые кристаллы, часто с простыми двойниками, размером в среднем 1 мм. Содержит в себе многочисленные включения мелких ксеноморфных зерен раннего плагиоклаза и кварца, формируя элементы монзонитовой структуры. Кристаллы без включений отличаются наличием линейных пертитов распада [4]. Двойникование в пертитах не обнаружено.

Биотит образует чешуйки размером в среднем 1,3 мм. Биотит образуется в паре со *сфеном*, отличающимся высоким рельефом и высокими цветами интерференции. Частично замещается хлоритом.

Роговая обманка образует призматические кристаллы размером от 0,3 до 1,2 мм. Как и биотит, замещается хлоритом.

Главные отличия гранитоидов Джоантанджинского массива от гранитоидов других проявлений: отсутствие кварца 2-й генерации, дифференциация расплава, которая наблюдается от периферии к центру массива, наличие многочисленных пертитов распада в калишпате (рис. 2). Эти отличия обусловлены в первую очередь уровнем эрозионного среза. Кровля Джоантанджинского массива, где происходило накопление флюидной фазы [2], сэродирована. Кроме того, в краевых частях гранитоидного тела отмечаются поздние крупнокристаллические разновидности гранитов, по составу схожих с гранитами в центре массива.

Выводы

1. Структурные различия гранитоидов связаны с глубиной эрозионного среза. На Джоантанджинском массиве однородность в структуре, характерная для ядерной части массива, обуславливается большей глубиной эрозионного среза, в отличие от неоднородных гранитоидов Борикчакского и Дугинского проявлений, апикальная часть которых незначительно вскрыта эрозионными процессами.

2. Граниты центральной части Джоантанджинского массива кристаллизовались из позднего, наиболее насыщенного флюидными и некогерентными компонентами расплава. Гранодиориты в краевых частях массива являются продуктами ранней кристаллизации. Отсутствие грейзенизированных пород в Джоантанджинском массиве свидетельствует о более глубоком уровне эрозионного среза по сравнению с Дугинским и Борикчакским массивами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протопопов Р. И., Трущелев А. М., Протопопов Г. Х., Федорова С. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-53 – Верхоянск. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
2. Жариков В. А., Русинов В. Л. Метасоматизм и метасоматические породы. – М. : Научный мир, 1998. – 492 с.
3. Голоперов Н. В. Отчет по опытно-методическим работам по геологической интерпретации результатов дешифрирования космических фотоматериалов и геолого-геофизических данных в Южном Верхоянье (Южно-Верхоянская партия). – Министерство геологии СССР, Якутское ордена Ленина производственное геологическое объединение «Якутскгеология», 1988.
4. Tuttle O. F., Bowen N. L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system $NaAlSi_3O_8 - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O$ // Geological Society of America. – 1958. – V. 74.

Нацвин И. К. (igornkgeology34@mail.ru)

ВГУ, г. Воронеж

ОСОБЕННОСТИ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ НА РУЧЬЕ ОЗЕРНЫЙ (РЕСПУБЛИКА САХА) НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА

Статья посвящена особенностям руд ручья Озерный (Республика Саха). Приводится краткое геологическое строение Джоантанджинской поисковой площади, которое в основном контролируется тектоникой. Помимо тектонических нарушений на рудогенез повлиял магматизм. Чтобы сделать выводы о гидротермальном процессе, вследствие которого образовались рудные минералы, было проведено несколько анализов, в частности структурно-текстурное исследование плоскополированных шлифов. В ходе него удалось установить стадийность образования рудных минералов: пирит (арсенопирит)-галенит-сфалерит. В ходе микроскопического исследования шлифов было установлено, что сфалерит содержит такие элементы, как Fe и Cd.

Ключевые слова: Брюнгадинский разлом, пирит, сфалерит, кадмий.

Геологическое строение

Геологическое строение всего Южного Верхоянья имеет весьма сложный характер, и руководящую роль в рудогенезе большинства территорий играют тектонические дислокации земной коры и верхней части мантии. Имеет место два вида этих движений: пликативные и дизъюнктивные [5]. На территории изучаемого района отложения смяты в серию крупных линейных складок северо-западного простирания. Вследствие этого образуется чередование синклинальных и антиклинальных структур, что сказывается на обнаженности интрузивных образований района. Среди дизъюнктивных нарушений особую роль играют Брюнгадинский, а также Средне-Нельгехинский и Кыгылтаский корово-мантийные разломы [4]. Они пересекают Брюнгадинский разлом и совместно формируют тектонически сложное строение Джоантанджинской поисковой площади. На ней имеется два крупных рудных поля, которые контролируются разломными структурами: Джоантанджинское и Хунхадинское (Дугинское), расположенное на левом берегу реки Хунхада и формирующее Лево-Хунхадинскую антиклиналь. Оно представлено штокверком гранитоидов размером 1 км² с окварцованными зонами дробления часто с сульфидной минерализацией [5].

На Джоантанджинской поисковой площади проводились картировочные работы масштабов 1 : 50 000–1 : 200 000 (Мехоношин В. Ф., Чернобровкин А. С. и др., 1975–1977; Ерошенко М. Е., Мехоношин В. Ф., 1987) [4, 5]. В ходе этих работ были выявлены и обоснованы предпосылки для вольфрамового оруденения, однако разработка не началась. Также предшественники, упомянутые выше, характеризовали территорию как перспективную на комплексное оруденение, так как на ней присутствуют олово, золото, серебро, полиметаллы, сурьма, висмут, мышьяк и медь. Восточнее Джоантанджинской площади располагается уже разрабатываемое медно-вольфрамовое месторождение Агылки, которое имеет схожее геологическое строение и также находится в зоне действия Брюнгадинского глубинного разлома [4, 5].

Исследуемое рудопроявление ручья Озерный расположено в правом борту реки Хунхада недалеко от самого устья ручья. Тектонически территория находится на Хунхадинской синклинали. Пойма ручья Озерный сложена песчаниками и алевролитами. Рудопроявление представляет собой толщу переслаивающихся песчаников и алевролитов с большим количеством кварц-кальцитовых зон дробления с прожилковой сульфидной минерализацией. В ходе гидротермальных преобразований осадочных пород среди песчаников и алевролитов средней степени ороговикования встречаются арсенопирит, пирит и в мелких вкраплениях сфалерит и галенит.

Методы исследований

Для анализа структурно-текстурных особенностей руд было сделано несколько плоскополированных шлифов.

По структуре руды характеризуются чаще всего как идиоморфнозернистые и гипидиоморфнозернистые, с элементами корродированной структуры в отдельных минералах. Текстуры

руд прожилковые: в кварц-кальцитовом прожилке встречаются пирит, арсенопирит, галенит и сфалерит.

Выявлены четкие идиоморфные зерна пирита и арсенопирита. Пирит имеет чаще всего хорошо сформированные кристаллы кубической сингонии. Также пирит формирует массивные выделения при срастаниях изометричных зерен. Арсенопирит формирует хорошо образованные гипидиоморфные кристаллы, которые также при срастании могут слагать массивные выделения в кварц-карбонатном прожилке совместно с пиритом (рис. 1). В общей массе породы пирит и арсенопирит суммарно составляют в среднем 70–90 % от всех рудных минералов.

Галенит и сфалерит выступают как более поздние минералы. Они не имеют хорошо сформированных зерен, чаще всего слагают ксеноморфные массивные выделения небольших размеров. Эти минералы заполняют пустоты в пирите и арсенопирите, часто замещают их (рис. 1). Галенит и сфалерит суммарно составляют 10–15 % от всех рудных минералов.

В ходе микрозондовых исследований аншлифов данных пород были получены химические составы рудных минералов.

Основные минералы, такие как пирит и арсенопирит, имеют чистый состав без примесей, что является довольно редким для них [7]. Галенит также не содержит примесей, хотя зачастую были обнаружены структурные изменения галенита (рис. 2). Возможно, это связано с тем, что этот минерал довольно часто подвержен замещению англезитом при контакте с кислородом [6]. При анализе сфалерита были получены данные о содержании в нем железа и кадмия. Эти два элемента очень часто изоморфно замещают цинк в составе сфалерита [2, 8].

Выводы

Анализируя данные предшественников и современных полевых исследований, учитывая тектонические предпосылки и наличие массивных зон дробления с окварцеванием и сульфидизацией по периферии достаточно крупного тела гранитоидов в одном случае и окварцованные зоны дробления с прожилковой сульфидной минерализацией в другом, можно сделать следующий вывод [5]. Два берега реки Хунхада имеют разный уровень эрозионного среза: левый обнажается довольно хорошо, хотя, скорее всего, основная часть массива и находится не вскрытой. Правый берег, в свою очередь, практически не вскрыт, не имея видимого выхода магматического тела на поверхность, а лишь только проявляя признаки интрузивного тела на глубине.

Пирит и арсенопирит являются первичными рудными минералами. Они кристаллизовались первыми, причем при совместном нахождении арсенопирит вторичен, так как часто замещает кристаллы пирита и сопровождает его в прожилках. Галенит и сфалерит можно отнести ко второму этапу кристаллизации. Эти два минерала заполняли оставшееся пространство в трещинах и прожилках, часто замещали пирит и арсенопирит. Первый этап кристаллизации

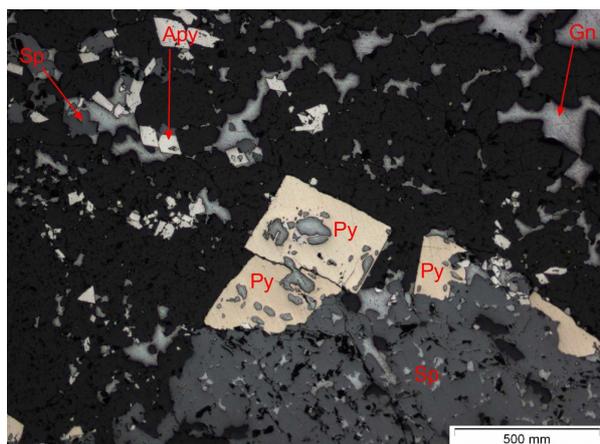


Рис. 1. Рудные минералы в кварц-кальци-товом прожилке: пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит. Отраженный свет, николи параллельно (фото И. К. Нацвина)

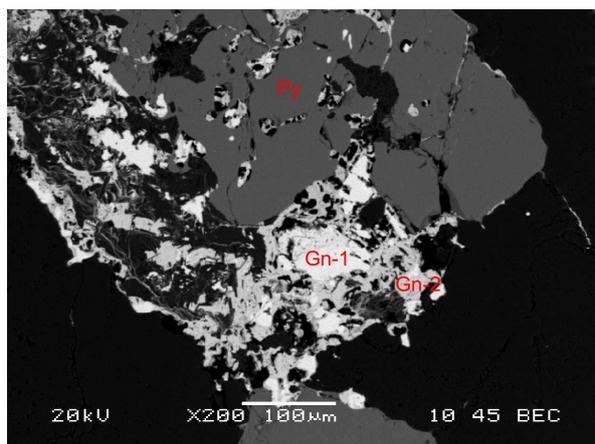


Рис. 2. Разрушенное зерно пирита (темно-се-рое), рядом с ним галенит: Gn-1 – неизменен-ный, сохранивший цвет и яркость, Gn-2 – измененный, потускневший, утративший пер-вичную структуру. Аншлиф под микрозондом (фото И. К. Нацвина)

характеризуется отсутствием примесей, а на втором этапе в сфалерите проявились примеси железа и кадмия, которые частично изоморфно заменили цинк.

Данная минеральная ассоциация с присутствием таких элементов, как свинец, цинк, мышьяк и кальций, может указывать на низкотемпературный этап гидротермального процесса [3]. Также кварц-карбонатные зоны дробления с сульфидной минерализацией могут говорить о затухании гидротермального процесса на удалении от интрузивного тела. Таким образом, можно предполагать, что магматическое тело находится на некоторой глубине при низкой степени эрозионного среза [1], а рудопроявление ручья Озерный является лишь верхушкой эрозионного среза в отличие от левого берега реки Хунхада, где штокверк гранитоидов выходит на дневную поверхность [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох Ю. И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. – М. : РГГРУ, 2009. – 232 с.
2. Васильев В. И. Новые данные о составе метациннабарита и ртутистого сфалерита с изоморфной примесью кадмия // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 7. – С. 896–905.
3. Минералообразующие процессы / Бакуменко И. Т. [и др.]. – Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 2001. – 81 с.
4. Отчет о групповой геологической съемке м-ба 1 : 50 000 в междуречье Нельгесе – Имнекан на площади листов Q-53-II5; I25-A, Б; I26-A, Б; I27-A, Б по работам Нелкачанской партии за 1983–1987 гг. Том I / Ерошенко М. Е., Мехоношин В. Ф. [и др.] – Пос. Хандыга, 1987. – 195 с.
5. Отчет о результатах геологического доизучения масштаба 1 : 200 000 площади листа Q-53-XXXVI и северной половины листа Q-53-XXXIII и поисковых работ на вольфрам в пределах Агылкинского и Хунхадинского рудных узлов. Том II / Мехоношин В. Ф. и др., Чернобровкин А. С. [и др.]. – Пос. Хандыга, 1975. – 277 с.
6. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М. : Издательство иностранной литературы, 1962. – 1133 с.
7. Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете / Чвилева Т. Н. [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 504 с.
8. Pan-Pan Niu [et al.] Cadmium-Fe-Mn coupling in sphalerite from MVT Pb-Zn deposits: Implications for critical metal Cd enrichment // Ore Geology Reviews. – 2025. – V. 186, No 11. – 106880.

**Омар Д. А.¹ (jabomar1996@gmail.com), Масунга Э. М.¹ (eunicemoses8@gmail.com),
Иванова Ю. Н.^{1,2} (jnivanova@yandex.ru)**

¹ РУДН, г. Москва; ² ИГЕМ РАН, г. Москва

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ УРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В РАЙОНЕ БАСЕЙНА РЕКИ КАРУ, ЮЖНАЯ ТАНЗАНИЯ

Впервые для бассейна реки Кару, Южная Танзания с помощью проекта Harmonized Landsat Sentinel-2 построена морфоструктурная карта территории, выделены крупная морфоструктура округлой формы и зона СВ простираения, к которым приурочена известная минерализация в регионе.

Ключевые слова: линеаменты, морфоструктура, спутниковые снимки, урановая минерализация, бассейн Кару, Южная Танзания.

В настоящее время наблюдается тенденция растущего спроса на урановое сырье для нужд атомной энергетики, что, в свою очередь, стимулирует развитие урановой сырьевой базы за счет поиска и прогнозирования новых месторождений, пригодных для эксплуатации.

Для удовлетворения растущих потребностей необходимы инновационные подходы к разведке и разработке урановых месторождений. Это включает в себя применение не только пе-

редовых геофизических и геохимических методов, но и космических технологий, которые позволяют проводить масштабные наблюдения, охватывая значительные территории, и обладают относительной экономической эффективностью.

Развитие урановой сырьевой базы является стратегически важной задачей, обеспечивающей энергетическую безопасность и устойчивое развитие любой страны, использующей атомную энергию.

Бассейн реки Кару расположен в южной части Танзании, простираясь от юго-восточной Кении и северо-восточной Танзании в сторону озер Ньяса и Руква и далее в Замбию, Малави и Мозамбик. Он представляет собой осадочный бассейн, характеризующийся волнистым рельефом с хорошо развитыми дренажными системами [2].

Он образовался в позднекарбонном–раннеюрском периоде (примерно 300–180 млн лет назад) в результате рифтогенеза Гондваны. Формирование бассейна в позднекарбонном–пермском периоде произошло из-за разломов, создавших благоприятное пространство для накопления осадочных пород. Осадконакопление происходило в континентальной среде, где преобладали речные, ледниковые, озерные и дельтовые процессы. Структурные преобразования привели к изменению распределения осадочных пород и развитию путей циркуляции флюидов, что является значимым для урановой минерализации.

Бассейн Кару в основном состоит из осадочных пород, залегающих над докембрийскими породами фундамента Мозамбикского пояса, включая песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы и угольные пласты. Состав пород отражает континентальное осадконакопление в условиях, меняющихся от позднего карбона до ранней юры. Песчаники обычно средне- и крупнозернистые, полевошпатовые или кварцсодержащие, с осадочными слоистыми структурами [3].

В этом районе урановая минерализация контролируется структурой бассейна, литологией, разломами и трещинами, образовавшимися в результате рифтогенеза докембрийского фундамента. Связана с осадочными породами и речными песчаниками.

Предполагается, что уран переносился в окисленных флюидах и впоследствии осаждался в восстановительных условиях с богатыми органическими веществами сланцами. Структурные особенности, включая разломы, трещины и пересечения, повышают проницаемость и оказывают значительное влияние на минерализацию, выступая в качестве проводника для минерализующих флюидов. Доминирующей урановой рудой является уранинит (U_3O_8), встречающийся в виде видимых зерен в песчанниковой матрице [4].

Помимо месторождений урана, в бассейне Кару в Сонгеа находятся месторождения угля, в частности Сонгеа-Мбамба-Бей, которые являются одними из крупнейших угольных ресурсов в Танзании. Угольные пласты встречаются в пермских отложениях Кару и образовались в болотистых, речно-дельтовых условиях при влажном климате. Угольные пласты служат эффективными восстановителями для осаждения урана, усиливая генетическую связь между образованием угля и урановой минерализацией [1].

Цель работы – построить морфоструктурную карту бассейна Кару, составленную по результатам обработки данных проекта дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS-2), полученных с космических аппаратов миссий Landsat и Sentinel-2, для дальнейшего выделения структурных и прогнозно-поисковых критериев на урановый тип минерализации в пределах исследуемой территории.

В работе была использована безоблачная дневная сцена (HLS.S30.T36LYP.2025277T073801.v2.0 от 4 октября 2025 года). Изображение было получено из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

Анализ космического снимка (КС) основывался на комплексном подходе, включающем морфоструктурный анализ [1]: снятие информативных структурных показателей рельефа и гидрографической сети с различных изображений земной поверхности; выявление главнейших морфоструктурных элементов. Систематизация и обобщение данных выполнены в программной среде QGIS.

На рисунке показана морфоструктурная карта изучаемой площади и сопредельной территории с нанесенными на нее линеаменами, выделенными ручным способом, по данным HLS-2.

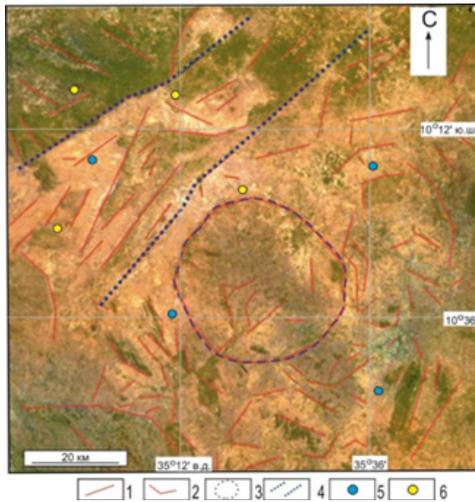


Рисунок. Морфоструктурная карта бассейна реки Кару, полученная на основе HLS-2:

1, 2 – линеаменты: радиальные (1), полукольцевые (2); 3 – морфоструктура; 4 – зона СВ простираия; 5, 6 – месторождения: угля (5), урана (6)

Основная локализация в периферии этой морфоструктуры и вдоль/внутри структуры СВ направления. Эти структурные особенности в будущем помогут выделить новые прогнозно-поисковые и вещественные критерии для урановой минерализации.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Ю. Н., Выхристенко Р. И., Викентьев И. В. Геологический позиционный структурный контроль золоторудной минерализации Малоуральского вулканоплутонического пояса (Полярный Урал) по мультиспектральным изображениям космического аппарата Landsat 8 // Исследования Земли из космоса. – 2020. – № 4. – С. 51–62.
2. Langer M. C, da Rosa Á. A. S., Montefeltro F. C. Supradapedon revisited: geological explorations in the Triassic of southern Tanzania. – 2017. – PeerJ 5:e4038.
3. Macheyekí A. S., Kafumu D. P. Geochemical characteristics of surface samples in the Mkuju River uranium project, southern Tanzania: implications for uranium geochemical exploration and provenance studies // Ore and Energy Resource Geology. – 2025. – V. 19.
4. Wopfner H. Tectonic and climatic events controlling deposition in Tanzanian Karoo basins // Journal of African Earth Sciences. – 2002. – V. 34, Is. 3–4. – P. 167–177.
5. Wopfner H., Xiaochi. J. C. Pangea Megasequences of Tethyan Gondwana-margin reflect global changes of climate and tectonism in Late Palaeozoic and Early Triassic times-A review // Palaeoworld. – 2009. – V. 18, Is. 2–3. – P. 169–192.

Орса Ч. Н.¹ (orsa@tsnigri.ru), Ляпин С. Г.²
¹ ЦНИГРИ, г. Москва; ² ИФВД РАН, г. Троицк

СРАВНЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАРЦА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПОМОРФНЫХ ПРИЗНАКОВ ЕГО РУДОНОСНОСТИ, ПО ОБРАЗЦАМ ПЛ. ШУРУГА (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Проведено сравнение фотолюминесценции и термолюминесценции кварца из жильных образований в пределах перспективной площади Шуруга (Забайкальский край). Выделены кварцы, связанный с рудными процессами, и безрудные кварцевые жилы. Выявлены типоморфные особенности кварца.

Ключевые слова: фотолюминесценция кварца, термолюминесценция кварца, золото, Забайкальский край, Могочинский золоторудный район.

Изучаемая площадь расположена в Забайкальском крае в пределах Могочинского рудного района. Район известен многочисленными богатыми россыпями золота, значительная часть которых открыта и стала отрабатываться еще в XIX в. Позднее открыты Ключевское, Итакинское, Уконикское, Амазарканское, Кулинское золоторудные месторождения и многочисленные проявления золота, нуждающиеся в дальнейшем изучении. Район экономически освоен. Через него проходит Транссибирская железнодорожная магистраль и автодорога Чита–Владивосток.

Стратифицированные образования представлены архейскими метаморфическими породами, раннеюрскими вулканокластическими образованиями (кайтунская серия) и четвертичными отложениями. Интрузивные образования слагают более 80 % площади работ. Они представлены раннепротерозойским, раннепалеозойским (олекминским), триасовым (амананским) и позднеюрским (амуджиканским) комплексами. Комплексы сложены породами кислого и среднего состава низкощелочного и умереннощелочного ряда [1].

Во время полевых работ были отобраны образцы сколовых проб жильного кварца с обнажений, наблюдаемых в геологических маршрутах. Для определения отличительных свойств золоторудного кварца были проведены следующие исследования: спектрозолотометрия (АО «РАЦ»), фотолюминесцентный анализ (ИФВД РАН) и термолюминесцентный анализ (ЦНИГРИ).

Ниже в табличном виде представлены полученные результаты термолюминесценции и спектрозолотометрии (СЗМ).

По полученным данным видно, что образцы, связанные с золоторудной минерализацией, имеют значение первого пика выше 500. Для изучения типоморфных особенностей кварца мы измерили фотолюминесценцию кварца двух образцов, рудного 10021/2 ($Au > 2$) и безрудного 50017/5 ($Au < 0,002$). Чтобы исключить возможность получения спектра примесей, был сделан замер двух микрокристалликов кварца образца 10021/2.

Получены следующие результаты:

На рисунке изображены спектры рудного и безрудного кварца: на двух спектрах образца 10021/2 мы видим большой пик на 650 нм и широкий пик в диапазоне от 590–630 нм, в спектре образца 50017/5 выраженные пики не наблюдаются.

Таблица. Исходный состав силикатно-солевой смеси для всех серий опытов

№ п.п.	№ пробы	T_1 , °C	I_1 , у.е.	T_2 , °C	I_2 , у.е.	Au СЗМ
1	35-017	248	187	339	152	< 0,002
2	38-025	244	369	311	292	< 0,002
3	42-043/2	220	590	259	639	0,004
4	10014/1	238	619	335	220	0,005
5	10021/2	245	804	327	403	> 2
6	30028/6	235	508	351	1698	0,015
7	50017/5	250	51	-	-	< 0,002

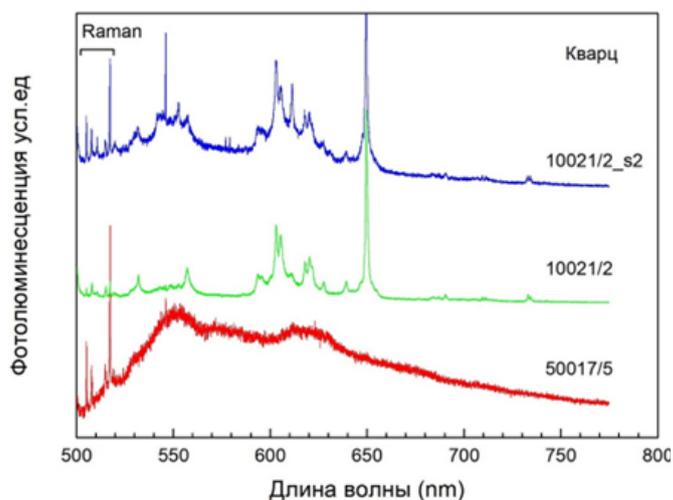


Рисунок. Фотолюминесценция образцов 10021/2, 50017/5

Согласно литературным данным [2], для гидротермального кварца характерно наличие «color center». «Color center» или «центр окраски» может возникать в результате:

1. включения ионов в процессе роста кристаллов;
2. электронных дефектов, образующихся в результате ионизирующего излучения после роста кристаллов;
3. термического перехода примесей после роста кристалла в другое валентное состояние или конфигурацию.

Таким образом, можно сделать вывод, что условия образования влияют на образование «центров окраски» и в зависимости от условий можно получить разные центры. Разница между спектрами образцов, где в спектре 10021/2 видно большое количество пиков, что соответствует «центрам окраски», а в 50017/5 пиков нет, соответственно, центры отсутствуют, что говорит нам о разных условиях их образования, которые могли выражаться в температуре и скорости минералообразования, а также концентрации гидротермальных растворов. В нашем случае можно предположить, что «центры окраски» могут быть связаны с золоторудной минерализацией.

В настоящее время мы продолжаем работу по изучению кварца с целью подтверждения выдвинутой теории, основанной на фотолюминесценции, термолюминесценции кварца, с учетом других лабораторно-аналитических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульдинер В. И. Геологическая карта СССР. Лист N-51-XIX. Масштаб 1 : 200 000. Пояснительная записка.
2. Lehmann G. Yellow color centers in natural and synthetic quartz // Physik der Kondensierten Materie. – 1971. – 13. – 297–306. – DOI : <https://doi.org/10.1007/BF02422610>

**Панасенко Ю. М.¹ (panasenko@tsnigri.ru), Карась С. А.¹ (karas@tsnigri.ru),
Трач Г. Н.¹ (trach@tsnigri.ru), Набелкин О. А.² (mulderfw@yandex.com)**

¹ ЦНИГРИ, г. Москва; ² ИМГРЭ, г. Москва

ПОД ЧУЖИМ ИМЕНЕМ: ОШИБКИ СОВРЕМЕННОЙ АНАЛИТИКИ И ЕЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Современные аналитические методы предоставляют геологам беспрецедентные возможности для детальных исследований. Однако нарастающая сложность инструментария и тонкость измерений требуют столь же высокого уровня критического осмысления получа-

емых данных. Доклад фокусируется не на успехах, а на методических проблемах и ошибках, выявленных при интерпретации геохимических данных в ходе реальных поисковых проектов. На конкретных примерах (изучение ореолов рассеяния золоторудного месторождения в Якутии, поиски полиметаллов в Иркутской области и редкоземельных элементов в Приморье) демонстрируется, как спектральные интерференции при ICP-AES и ICP-MS-анализе (наложение линий Cd/As, влияние Sr на определение Rh), совпадение линий Nd/Ba в РФ-анализе могут приводить к формированию ложных геохимических ассоциаций и ошибочным геологическим выводам. Основной тезис заключается в том, что техническая мощь аналитики сама по себе не гарантирует достоверности результата. Надежная интерпретация возможна только на стыке компетенций: глубокого понимания геологии объекта, осведомленности о принципиальных ограничениях и артефактах применяемых методов, а также критического подхода к статистическим зависимостям. Представленный практический опыт анализа ошибок имеет важное значение для повышения качества геологических работ, в первую очередь для молодых специалистов.

Ключевые слова: ошибки аналитики, наложение спектральных линий, геохимические поиски, РФ-анализ, ICP-MS, ICP-AES.

Уровень современных аналитических возможностей неуклонно растет – прецизионность измерений, круг анализируемых элементов, пределы обнаружения отодвигают границу неопределенности. Для решения геологических задач имеется широкий набор инструментов, позволяющих интерпретировать результаты высокоточных наблюдений на микро- и макроуровне. Однако некритичная интерпретация «цифр» без учета геологической логики и возможных инструментальных помех может приводить к ошибочным выводам.

В настоящем докладе основное внимание уделяется не достижениям, а анализу методических сложностей и неудач, с которыми авторы столкнулись в ходе работ на примере трех видов анализов: атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и экспресс-рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Полученный опыт и извлеченные уроки представляются важными для обсуждения в профессиональном сообществе, особенно среди молодых исследователей.

Одним из примечательных объектов изучения выступило геохимическое поле крупного золоторудного месторождения в Якутии. В 2020 году было выполнено литохимическое опробование по сетям 200×40 м и 100×20 м по вторичным ореолам рассеяния, проанализирована 4781 проба. Работы проводились на фланговых участках, в связи с чем центральная часть рудного поля осталась неохваченной опробованием. Все пробы анализировались атомно-эмиссионным методом с ионизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме (ICP-AES) (ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98) на 33 элемента и атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией на золото (ААС-ЭТА) (НСАМ № 429-Х).

В результате статистической обработки данных подтверждена характерная для месторождения сильная парагенетическая связь золота и мышьяка (Au-As), типичная для золото-арсенопиритовой минерализации. Ключевым открытием стало выявление еще более тесной корреляции золота с кадмием (Au-Cd). Наблюдаемые высокие коэффициенты корреляции Cd-As (0,88) и Cd-Zn (0,6) должны отражать тесную пространственную сопряженность. Для объяснения аномальной ассоциации Au-Cd было предложено несколько гипотез: от окисления первичной арсенопирит-сфалеритовой минерализации с выносом Zn и остаточной концентрацией Cd на месте, или гипотермально-магматогенной, согласно которой кадмий вместе с золотом и свинцом был привнесен в рудообразующую систему глубинными флюидами, до наличия на площади собственных минералов Cd, являющихся носителями золота.

Но все оказалось проще. Высокая корреляция между Cd и As оказалась артефактом, вызванным спектральной интерференцией при ICP-AES-анализе [2, 3]. Сверка со справочными данными выявила совпадение аналитических линий Cd I 228,802 нм и As I 228,812 нм (таблица). Для корректного определения кадмия должна была быть использована свободная от наложения линия. Полученные данные подтверждают, что сигнал, первоначально приписанный кадмию и коррелирующий с мышьяком, фактически соответствует содержанию мышьяка в пробах.

Таблица. Аналитические линии As и Cd

As		Cd	
State	Wavelength	State	Wavelength
I	188,979	I	228,802
I	193,696	II	214,440
I	197,197	II	226,502
I	228,812	I	361,051

Другой интересный результат был получен при ионно-сорбционном опробовании перспективной на полиметаллы площади в Иркутской области в 2021 г., где были выявлены аномальные содержания родия (Rh) в слабых азотнокислотных вытяжках. Достоверность этих данных вызвала сомнения, поскольку определение Rh методом масс-спектрометрии (ICP-MS) может сопровождаться интерференцией при высоких содержаниях стронция (Sr), что подтвердили специали-

сты ФГБУ «ВИМС». Этим, вероятно, объясняется значимая корреляция Rh и Sr ($r = 0,55$), особенно на участках развития известняков, обогащенных Sr.

Однако часть аномалий Rh, пространственно совпадающих с аномалиями свинца (Pb) и демонстрирующих с ним высокую корреляцию ($r = 0,82$), была выявлена в пределах полиметаллического рудопроявления, где не фиксировались высокие содержания Sr. Это указывает на возможную реальную геохимическую ассоциацию Rh и Pb на данной площади и представляет интерес для дальнейшего изучения.

В 2012 г. в Приморском крае проводились поисковые работы на редкоземельные элементы. Для оперативного контроля использовался полевой **РФ-анализатор**, чьи результаты в целом были сопоставимы с данными последующей лабораторной аналитики методом ICP-MS.

На одном из участков была выявлена аномалия РЗЭ. Для ее заверки была пройдена горная выработка (канавы), вскрывшая зону аргиллизации. Отбор бороздовых проб с последующим экспресс-анализом подтвердил повышенные содержания Nd, после чего пробы были направлены на ICP-MS исследование. Подтверждение аномалии позволило бы выполнить техническое задание по ресурсам РЗЭ.

Однако лабораторный анализ методом ICP-MS не подтвердил рудных содержаний Nd. Вместо этого были установлены высокие содержания бария (Ba). Причиной расхождения результатов, как выяснилось, стала спектральная интерференция – совпадение аналитических линий Nd и Ba в используемом методе РФ-анализа [1]. Данный случай наглядно демонстрирует необходимость обязательной проверки данных полевого экспресс-анализа более точными лабораторными методами, особенно при работе с элементами, имеющими риск спектральных наложений.

Современный уровень аналитических возможностей, безусловно, открывает новые горизонты для геологических исследований, позволяя работать с тонкими геохимическими сигналами. Однако техническая мощь сама по себе не гарантирует достоверности интерпретации.

Полевые и экспресс-методы незаменимы для оперативного принятия решений, но их результаты, особенно в случае новых или критически важных элементов, в обязательном порядке должны подтверждаться более точными лабораторными исследованиями с контролем качества.

Надежная интерпретация тонких наблюдений возможна только на стыке компетенций: глубокого понимания геологической логики объекта, осведомленности о возможных артефактах применяемых аналитических инструментов и критического, а не констатирующего, подхода к статистическим зависимостям. Обмен подобным практическим опытом, включающим анализ ошибок, крайне важен для повышения качества научных и прикладных геологических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. – М. : Наука, 1982. – С. 42.
2. Optima simultaneous spectrometers wavelength tables. – PercinElmer, Inc., 2004. – P. 268
3. Sansonetti J. E., Martin W. C. Handbook of basic atomic spectroscopic data // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 2005. – V. 34, No 4. – P. 1559–2259.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО КЕРНОВЫМ ПРОБАМ СКВАЖИН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Проведено сравнение методов кластеризации (K-средних, иерархический, GMM) при анализе геохимии керновых проб на месторождениях разного типа. На реальных данных показано, что K-средних эффективен для простых структур, а GMM – для выявления неочевидных, но статистически значимых закономерностей в сложных полигенетических системах. Низкое качество кластеризации всех методов является диагностическим признаком нарушения первичных геохимических связей (техногенные объекты). Результаты помогают выбрать метод для прикладных или научных задач, а также позволяют получить независимую оценку геологических моделей.

Ключевые слова: кластеризация, геохимические данные, K-средних, GMM, иерархический метод, месторождения, большие данные.

Цель исследования. Проведение сравнительной оценки эффективности основных методов кластеризации (K-средних, иерархической кластеризации и алгоритма на основе гауссовых смесей – GMM) для обработки геохимических данных керновых проб в целях интерпретации геологического строения и оценки запасов месторождений различного генезиса.

Методы и материалы. Для автоматизации полного цикла анализа разработана специализированная программа на Python (рисунок). Апробация выполнена на массивах данных четырех объектов: медно-порфирового (44 тыс. проб, 4 признака), золото-сульфидно-кварцевого (4,1 тыс., 4 признака), медно-колчеданного (11 тыс., 3 признака) и техногенной алмазоносной россыпи (1 тыс., 6 признаков). Качество кластеризации оценивалось по статистическим индексам, включая индекс силуэта [5].

Обоснование необходимости кластеризации и методологические аспекты:

1. Контроль и объективность. Кластеризация не только служит инструментом нахождения статистически значимых группировок, но и позволяет оценить объективность существующих геологических моделей. Яркий пример – медно-порфировое месторождение, где геологи выделили типы пород (кластеры) по макроскопическим признакам. Последующая оценка результа-

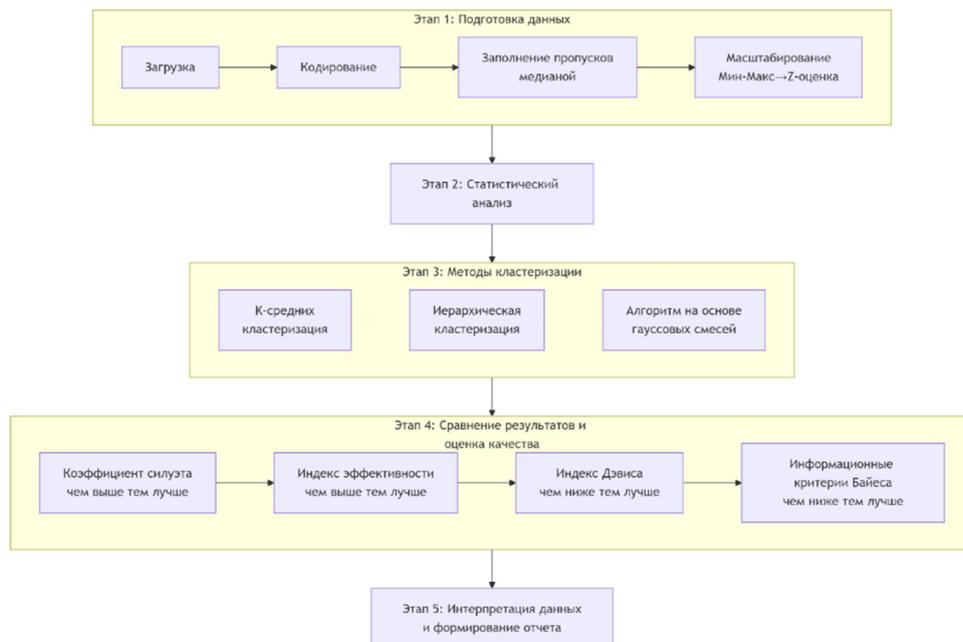


Рисунок. Алгоритм программы обработки геологических данных

тов выявила расхождения в ~ 25 % проб между интерпретациями специалистов (российских и зарубежных), что подтвердило необходимость количественного, воспроизводимого подхода для минимизации субъективности.

2. Работа с большими данными (Big Data). В условиях увеличения объема и размерности геохимической информации (десятки тысяч проб, десятки элементов) ручная интерпретация становится невозможной. Кластеризация выступает ключевым этапом предобработки, объединяя данные в интерпретируемые группы (закономерности), что является основой для построения прогнозных моделей, 3D-геологического и ресурсного моделирования [3].

3. Глубина методологического анализа. В рамках каждого из исследуемых базовых методов (K-средних [2, 3], иерархическая кластеризация [2], GMM [1, 4]) существует множество модификаций и алгоритмических подходов (например, K-medoids, различные агломеративные методы и меры связи для иерархической кластеризации, разные алгоритмы максимизации ожидания для GMM). Их детальный разбор не был целью данного исследования, так как сравнивалась философия подходов (детерминированная и вероятностная, центроидная и распределенная), а не тонкая настройка конкретных реализаций.

4. Выбор сравниваемых методов. Существует ряд других известных методов (например, DBSCAN, спектральная кластеризация), они были предварительно отброшены как менее эффективные для специфики поставленных задач: DBSCAN – из-за высокой чувствительности к параметрам и неоднородной плотности реальных геохимических данных, спектральная кластеризация – из-за вычислительной сложности на больших выборках и слабой интерпретируемости результатов в терминах геохимии [3].

Основные результаты (таблица). Медно-порфировое месторождение (сложная структура). K-средних выделяет доминирующий кластер фона (69 %). GMM выявляет наличие четких статистических слоев, разделяя данные на две равновесные группы (45 и 44 %) с высокой уверенностью модели (0,967), что соответствует разным фациям минерализации, различающимся структурой связей элементов-спутников. Это иллюстрирует способность GMM выявлять перекрывающиеся геохимические ассоциации.

Золото-сульфидно-кварцевое месторождение (простая структура). Все методы фиксируют доминирование одного крупного кластера (75–85 %). K-средних показывает наилучшее качество (индекс силуэта 0,703) благодаря компактности данных, тогда GMM оказывается избыточно сложным. Это согласуется с рекомендациями использовать простые разделяющие методы для четко структурированных данных.

Медноколчеданное месторождение (полигенетическая система). Наблюдается методозависимость результатов: K-средних выделяет два кластера (33 и 57 %), иерархический метод – один

Таблица. Сводная таблица результатов кластеризации

Тип месторождения	Метод кластеризации	Индекс силуэта	Индекс эффективности	Индекс Дэвиса	Критерии Байеса	Средняя уверенность	Распределение объектов, %
Медно-порфировое	K-средних	0,443	3706	0,730	–	–	69; 30,9; 0,1
	Иерархическая кластеризация	0,527	24 876	0,588	–	0,943	67,5; 30; 2,5
	Гауссовы смеси	0,519	16 249	1,252	244 324	0,967	45; 44; 5; 6
Золото-сульфидно-кварцевое	K-средних	0,703	3389	0,699	–	–	85; 14,5; 0,5
	Иерархическая кластеризация	0,672	3524	0,801	–	0,976	84; 15,9; 0,1
	Гауссовы смеси	0,524	1916	1,107	15 457	0,979	75; 15; 10
Медно-колчеданное	K-средних	0,544	9755	0,632	–	–	6; 33; 4; 57
	Иерархическая кластеризация	0,497	7483	0,639	–	0,878	63; 27; 8; 2
	Гауссовы смеси	0,517	8091	0,732	62 102	0,969	62; 26; 7; 5
Техногенная алмазно-носная россыпь	K-средних	0,227	55,237	1,428	–	–	14; 34; 52
	Иерархическая кластеризация	0,185	45,885	1,637	–	0,761	14; 40; 46
	Гауссовы смеси	0,202	46,851	1,573	2368	0,916	20; 28; 52

(63%), а GMM – сбалансированную группировку (62, 26, 7 и 5 %) с максимальной уверенностью (0,969). Это указывает на наличие геохимических типов, неразличимых при визуальном анализе, соответствующих разным стадиям минерализации, которые улавливает GMM за счет анализа ковариаций.

Техногенная алмазоносная россыпь (размытая структура). Для всех методов характерны низкие метрики качества (индекс силуэта $\sim 0,2$), что является диагностическим признаком нарушения первичных геохимических связей. Относительно лучший результат К-средних (0,227) объясняется его эффективностью для выявления слабых сгущений в зашумленных данных.

Заключение. Выбор оптимального метода кластеризации определяется целью работы и геологической сложностью объекта.

Для прикладных задач выделения групп геохимических аномалий (проб с непропорционально высокими или низкими содержаниями) и выявления основных типов оруденения на месторождениях с четкими границами (золото-сульфидно-кварцевый тип) наиболее эффективен и интерпретируем метод К-средних.

Для решения научных задач, связанных с поиском независимых геохимических ассоциаций и разделением на фации (медно-порфировые, полигенетические медноколчеданные системы), необходим подход алгоритма гауссовых смесей (GMM), оценивающий вероятность принадлежности пробы к группе.

Расхождение в результатах разных методов (как для медноколчеданного объекта) служит индикатором полигенетической природы минерализации.

Низкое качество кластеризации по всем методам является самостоятельным диагностическим признаком, указывающим на сильную нарушение исходных геохимических ассоциаций (техногенные россыпи).

Таким образом, для комплексного геологического анализа целесообразно последовательное применение методов: К-средних для общего геохимического зонирования, а GMM – для углубленного исследования данных со сложной, полигенной природой. Важно подчеркнуть, что кластеризация решает две взаимосвязанные задачи: обеспечивает объективный количественный анализ больших массивов данных и служит инструментом для проверки и уточнения традиционных геологических гипотез. Конечная интерпретация требует обязательного геологического контроля выделенных кластеров специалистом.

Авторы выражают признательность научному руководителю Г. О. Абрамяну за ценные рекомендации и всестороннюю поддержку в ходе выполнения данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
2. Everitt B. S., Landau S., Leese M., Stahl D. Cluster Analysis. 5th Edition. – London : Arnold, 2011. – 330 p.
3. Han J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. 2nd Edition. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, 2006. – 743 p.
4. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. 2nd Edition. – New York : Springer, 2009. – 745 p.
5. Rousseeuw P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 1987. – No. 20. – P. 53–65.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОСАЖДЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ВОД НА СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРАХ

Представлена природоподобная технология извлечения золота из техногенных вод россыпей с помощью сорбционных модулей. Проведены полевые исследования на полигоне «Крестовоздвиженский» (Пермский край), которые подтвердили работоспособность метода.

Ключевые слова: техногенная россыпь, золото, сорбционный модуль, геохимический барьер, извлечение.

Пермский государственный национальный исследовательский университет совместно с производственным партнером – группой компаний «Пермгеолнеруд» – в 2020 году создали учебно-исследовательский полигон «Крестовоздвиженский» в пределах Крестовоздвиженской техногенной россыпи. Задачи полигона следующие: научные исследования, разработка новых образовательных методик, научный туризм, а также разработка и внедрение инновационных технологий в сфере недропользования. Авторами статьи на полигоне были проведены работы по разработке природоподобной технологии осаждения золота из техногенных вод на искусственно сформированных сорбционных барьерах.

Крестовоздвиженский учебно-исследовательский полигон располагается в Горнозаводском районе Пермского края на окраине поселка Промысла (рис. 1). Россыпные объекты полигона характеризуются уникальной комплексной золото-платино-алмазной специализацией и представлены несколькими генетическими типами: русловые и пойменные (современный аллювий), террасовые (современный и древний аллювий), ложковые, карстовые (в основном аллювиально-пролювиально-делювиальные), техногенные [2].

В течение XIX–XX веков на данной площади велась интенсивная разработка золотых россыпей. При этом осталось большое количество участков золотоносных россыпей, не затронутых разработкой, а также накопились отвалы с промышленным содержанием золота. В 1950-х годах на изучаемой территории активно велась добыча россыпных алмазов. Золото при этом не извлекалось. Таким образом, в окрестностях поселка сформировался комплекс природно-техногенных золотоносных россыпей. В 2018 г. на данной территории ООО «Каммир» были начаты поисково-оценочные работы на участке недр «Полуночный», в результате которых в 2021 г. была оконтурена Крестовоздвиженская техногенная россыпь, которая и является объектом нашего исследования [3].

Среднее содержание золота на Крестовоздвиженской россыпи 164 мг/м³. В то же время имеются участки отвала с заметно повышенными содержаниями металла (около 1 г/м³), которые в основном приурочены к верхней части разреза (глубина до 4 м) [3]. Средний размер золотин россыпи – 0,5–0,25 мм. По морфологии золотин на Крестовоздвиженской россыпи преобладают знаки уплощенного облика (рис. 2). Наличие пленок, корочек, примазок и налетов оксидов железа зафиксировано на многих золотилах. Отмечено наличие комковидных золотин, очевидно являющихся новообразованными. В подземных водах, циркулирующих по телу техногенных отвалов, установлено наличие золота, серебра и прочих полезных компонентов.

Ранее проведены многочисленные исследования золотоносности техногенных объектов, в том числе Крестовоздвиженской россыпи, изучены механизмы миграции и концентрации техногенного золота. В техногенных объектах золоторудных, сульфидных и др. месторождений содержится золото в виде наночастиц, а также связанное золото. Часть золота растворяется техногенными водами, перемещается и осаждается на геохимических барьерах

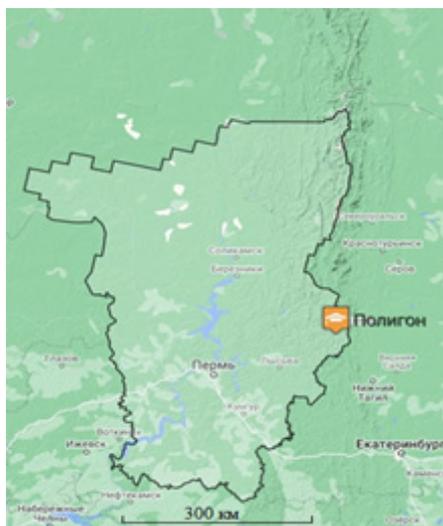


Рис. 1. Крестовоздвиженский учебно-исследовательский полигон



Рис. 2. Золото с железистыми пленками на поверхности [1]

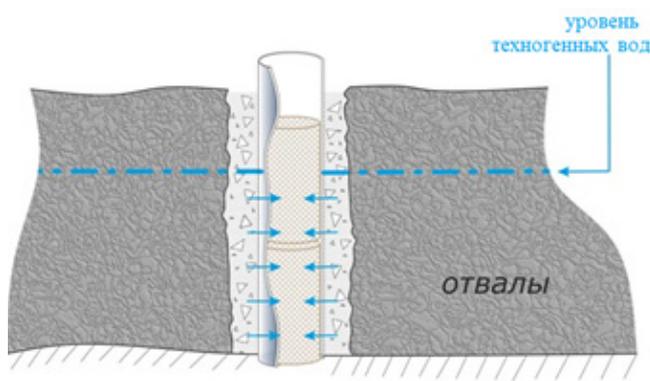


Рис. 3. Схема размещения сорбционного модуля в теле отвала

[1, 3]. Опираясь на эти данные, поставлены полевые эксперименты по разработке природоподобной технологии извлечения растворенного золотом водами путем размещения сорбционных барьеров в виде модулей на участках циркуляции техногенных золотосодержащих вод.

Корпус сорбционного модуля выполнен в форме стакана из поливинилхлорида с перфорированной боковой поверхностью, а сорбционный наполнитель (активированный уголь) размещен в капроновой сетке в качестве сменного сорбционного элемента.

Перфорированный корпус устанавливается вертикально в заранее пройденной скважине в теле техногенного массива (рис. 3).

Перфорированная часть корпуса с размещенными сменными сорбционными элементами должна находиться ниже уровня техногенных вод. В корпус помещаются сменные элементы с активированным углем и оставляются на определенный период времени для концентрации сорбентом золота. Техногенные воды за счет естественной циркуляции взаимодействуют с сорбционными элементами, в результате чего происходит осаждение золота.

Для эксперимента был собран опытный образец сорбционного модуля. Сорбционные элементы состояли из активированного угля на основе кокосовой скорлупы, упакованного в капроновую сетку. Вес активированного угля составил 25 кг, размерность зерен – 2,0 мм.

Для закладки модуля в техногенных отвалах Крестовоздвиженского полигона была пробурена скважина диаметром 168 мм и глубиной 5 метров.

Корпус сорбционного модуля (труба НПВХ 140 мм) был установлен в пробуренную скважину по аналогии с установкой обсадных труб для гидрогеологических скважин.

Полевой эксперимент продолжался в течение одного месяца. Содержание золота в сорбенте определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP). Среднее содержание золота в активированном угле по итогам эксперимента составило около 900 мг/т.

На основе полученных данных сделан вывод о работоспособности предлагаемого способа. За счет естественной фильтрации вод в техногенных отвалах происходит осаждение золота на размещенном в модулях сорбенте. При этом техногенные отвалы не вовлекаются в активную переработку.

На данный момент эксперименты продолжаются. Дальнейшее развитие технологии видится в повышении эффективности осаждения золота на сорбенте, а также осаждении на сорбционных барьерах кроме золота и прочих полезных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голдырев В. В., Илалтдинов И. Я., Осовецкий Б. М., Плюснина К. И. Перспективы переработки отвалов Крестовоздвиженской россыпи // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 139–148. DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.139
2. Минеральные ресурсы Пермского края. Энциклопедия / Под ред. А. И. Кудряшова. – Пермь : Книжная площадь, 2006. – 464 с.
3. Плюснина К. И., Голдырев В. В., Брюхов В. Н. Особенности строения Крестовоздвиженской техногенной россыпи // Вестник Пермского университета. Геология. – 2025. – Т. 24, № 2. – С. 169–176. DOI: 10.17072/psu.geol. 24.2.169

Попов Е. М., Даниленко И. С., Михалко Н. П.
ВИМС, г. Москва

**ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ, КОНТРОЛЯ ВОЛЬФРАМОВОГО
И СОПУТСТВУЮЩЕГО ОРУДЕНЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ХУНХАДИНСКОГО
ПОТЕНЦИАЛЬНОГО Au-Pb-Zn-W-Sn РУДНОГО УЗЛА
(РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))**

Подтверждены факторы контроля вольфрамового и сопутствующего оруденения в пределах площади Хунхадинского потенциального Au-Pb-Zn-W-Sn рудного узла, расположенного в пределах Томпонского улуса южного Верхоянья. Установлены литолого-стратиграфический, контактово-метасоматический, магматический и структурно-тектонический факторы.

Ключевые слова: вольфрам, шеелит, факторы контроля, скарны, южное Верхоянье.

Площадь Хунхадинского Au-Pb-Zn-W-Sn потенциального узла (по Протопопову, 2016) административно расположена в Томпонском улусе республики Саха (Якутии), ближайший населенный пункт – пос. Тополиное в 60 км юго-восточнее от рудного узла. Узел находится в Нельгесе-Хунхадинском междуречье.

Исследуемый объект входит в состав Томпо-Брюнгадинской минерагенической зоны Верхояньо-Колымской минерагенической провинции с благородно-цветнометалльной специализацией. Он сложен терригенным комплексом пермь-триас-юрского возраста, смятым в брахиформные складки субмеридионального направления. Осадочную толщу прорывают раннемеловые гранитоиды Уэмляхского гранит-гранодиоритового комплекса и дайки среднего и кислого составов Кобюминского комплекса. Брюнгадинская зона корово-мантийных разломов разделяет два крупных блока земной коры и контролирует размещение магматических, контактово-метаморфических и метасоматических образований и связанных с ними полезных ископаемых. Она представляет собой линейную область повышенной трещиноватости пород, прорванных дайковым роєм. Протяженность области составляет около 100 км, а ширина до 20 км.

В 100 км от Хунхадинского узла к юго-востоку находится Агылкинский сурьмяно-олово-медно-вольфрамовый рудный узел, в котором расположено месторождение Агылки и рудопроявление Сосукчан. Агылки – стратиформное медно-вольфрамовое месторождение, приуроченное к пласту скарнированных мраморизованных известняков [1].

В пределах Хунхадинского потенциального рудного узла вольфрамовое оруденение приурочено к ореолу метасоматически измененных пород и сопряжено с гранитоидами уэмляхского комплекса. На изучаемой территории находится три вольфрамовых проявления, в пределах которых есть рудопроизводящие гранитоиды уэмляхского комплекса: Хунхадинский (Дугинский) массив и связанное с ним Дугинское жильно-штокверковое шеелит-кварцевое проявление, Борикчакский массив со связанным Северо-Борикчакским проявлением аналогичного типа и Джоантанджинский массив с одноименным скарновым шеелит-сульфидным проявлением (рисунок). Жильно-штокверковые проявления приурочены как к комплексу терригенных пород, так и к грейзенизированным гранитоидам.

В пределах Хунхадинского потенциального рудного узла выделяются литолого-стратиграфический, контактово-метасоматический, магматический и структурно-тектонический факторы образования, локализации и контроля оруденения.

По материалам предшественников основной фактор, контролирующей стратиформное шеелит-сульфидное оруденение, – литолого-стратиграфический, представляющий собой горизонт скарнированных известняков и известковистых песчаников нижнего оленека нижнего триаса. Скарны полосчатые гранат-диопсидовые локализованы в экзоконтактовой зоне Джоантанджинского массива.

Контактово-метасоматический фактор контроля вольфрамового оруденения применим для жильно-штокверкового типа. Прожилковое кварц-шеелит-сульфидное оруденение было обнаружено в метасоматически преобразованных песчаниках и алевропесчаниках. На проявлениях Борикчак и Дуга вскрытые апикальные части гранитных массивов были подвержены автотасоматозу. Подтверждены грейзенизированные породы и калишпатиты, в которых получили

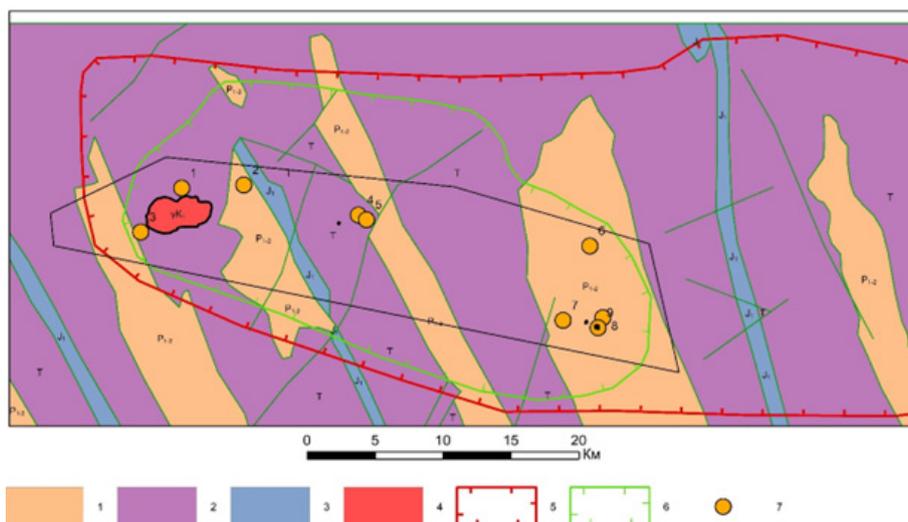


Рисунок. Схема расположения проявлений полезных ископаемых в Хунхадинском потенциальном рудном узле [4]:

1 – пермские отложения; 2 – триасовые отложения; 3 – юрские отложения; 4 – гранитоиды уэмляхского комплекса; 5 – Томпо-Брюнгадинская минерагеническая зона; 6 – Хунхадинский рудный узел; 7 – проявления полезных ископаемых: 1 – Джоантанджинское (W), 2 – проявление верховья пр. притока р. Хунхада (Sn, Pb, Zn), 3 – Июньское (Au, Ag), 4 – Северо-Борикчакское (W), 5 – Борикчакское (Sn, Pb, Zn), 6 – Долоканджинское (Au), 7 – Средне-Хунхадинское (Sn, Pb, Zn (Ag)), 8 – Хунхадинское (W, (As, Cu)), 9 – Дугинское (W, (Au))

широкое распространение жильные, прожилково-вкрапленные и вкрапленные шеелит-кварцевые образования.

Магматический фактор – раннемеловой гранитоидный магматизм является источником рудогенерирующих флюидов. С дайками и массивами уэмляхского комплекса раннего мела пространственно и генетически связаны все известные на площади рудные объекты вольфрама, олова, золота, висмута. Оруденение концентрируется в экзоконтактах интрузий (поля роговиков) и непосредственно в апикальных частях тел.

Структурно-тектонический фактор контроля оруденения в Томпо-Брюнгадинской минерагенической зоне представлен Брюнгадинской зоной корово-мантийных разломов, создающей проницаемую среду для внедрения рудопроизводящих гранитоидов. Стоит упомянуть, что в пределах Брюнгадинской зоны находятся и другие объекты, такие как вышеупомянутое месторождение Агылки; таким образом, этот фактор имеет региональное значение. На локальном уровне проявления полезных ископаемых приурочены к ядрам крупных антиклинальных и синклиналильных структур.

Подтвержденные и вновь выявленные факторы локализации вольфрамового и сопутствующего оруденения позволяют прогнозировать стратиформные и жильно-штокверковые рудные образования в пределах Хунхадинского рудного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев В. И. Рудно-магматические системы скарново-шеелит-сульфидных месторождений востока России. – Владивосток : Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Дальневосточный геологический институт, 2007. – С. 55–67.
2. Голоперов Н. В. Отчет по опытно-методическим работам по геологической интерпретации результатов дешифрирования космических фотоматериалов и геолого-геофизических данных в Южном Верхоянье (Южно-Верхоянская партия). – Министерство геологии СССР, Якутское ордена Ленина производственное геологическое объединения «Якутскгеология», 1988.
3. Лисник Г. А., Тютюнников Л. Г., Федоров Е. М. Отчет о результатах аэромагнитной съемки масштаба 1 : 50 000, проведенной на Делиньской площади в 1983–1986 гг. (партия № 5/83-86). –

Министерство геологии РСФСР, Якутское ордена Ленина производственное геологическое объединение «Якутскгеология», 1986. – Т. 1.

4. Протопопов Р. И., Трущелев А. М., Протопопов Г. Х., Федорова С. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-53 – Верхоянск. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.

Прасолов А. М.^{1,2} (prasolov00@yandex.ru), Владимирцева О. В.² (olga_9_4@mail.ru)

¹ МГРИ, г. Москва; ² ИГЕМ РАН, г. Москва

МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОНОСНОСТИ РУЧЬЕВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На основе статистического анализа характеристик ручьев севера Верхояно-Колымской складчатой области построена дифференцированная модель логистической регрессии для прогноза россыпной золотоносности. Выделены два генетических типа ручьев с различными прогнозными признаками. Метод эффективен для приоритизации поисковых работ.

Ключевые слова: золото, Арктическая зона России, Верхояно-Колымская складчатая область, логистическая регрессия, прогнозная модель, россыпи.

Россыпные месторождения золота представляют значительный экономический интерес, однако традиционные методы их поиска требуют существенных временных и финансовых затрат. В связи с этим актуальным направлением является разработка количественных, статистически обоснованных моделей, позволяющих дистанционно выявлять скрытые закономерности и эффективно оценивать перспективность территорий.

Объектом исследований избрана территория, охватывающая листы Q-53, Q-54, R-53, R-54 масштаба 1 : 1 000 000 в северной части Верхояно-Колымской складчатой области (ВКСО) и относящаяся к Колымо-Омолонской минерагенической провинции [1–4]. В ее геологическом строении принимают участие складчатые палеозойские комплексы, на которых с несогласием залегают мезозойские терригенные породы, прорванные кислыми интрузиями позднеюрско-мелового возраста. Завершают разрез кайнозойские впадины, выполненные палеогеновыми и неогеновыми отложениями.

В рамках исследования для изучаемой территории был проведен статистический анализ геолого-геоморфологических характеристик ручьев для выявления значимых факторов золотоносности и разработки прогнозной модели.

Для каждого водотока фиксировались следующие параметры: азимут направления течения, порядок водотока, возраст дренируемых пород, удаленность ручьев от гранитных интрузий, полей палеоген-неогеновых и четвертичных отложений. Целевой переменной выступало наличие ($Au = 1$) или отсутствие ($Au = 0$) россыпного золота.

На первом этапе исследования в программе ArcMap были картированы золотоносные ручьи. Выделение ручьев без россыпей проводилось исключительно вблизи развития известных россыпей, что повысило достоверность их идентификации как «пустых».

После кодировки всех ручьев по указанным параметрам была сформирована база данных, включающая 168 ручьев, 84 из которых являются золотоносными. Генеральное направление течения фиксировалось в поле «Азимут». Порядок водотока определялся по количеству притоков. В поле «Возраст» указывался возраст преобладающих дренируемых пород. Удаленность ручья от гранитных массивов, полей палеоген-неогеновых и мощных четвертичных отложений определялась в километрах от устья и тоже делилась на классы.

Для последующего статистического анализа все категориальные параметры были преобразованы в числовые. Азимуты были ранжированы от севера (1) до северо-запада (8) по часовой

стрелке. Порядок водотока, будучи численным параметром, остался без изменений. Параметры возраста и удаленности от пород различных типов были дискретизированы. Группировка в классы проводилась с обеспечением приблизительно равной наполненности и учетом геологической специфики. Возраст пород, к примеру, был разделен на шесть классов: 1 – четвертичные отложения, 2 – палеоген и неоген, 3 – мел, 4 – юра и триас, 5 – карбон, девон и силур, 6 – ордовик и кембрий.

Весь массив данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80 % к 20 % с сохранением баланса целевого признака (наличие золота). В итоге обучающая выборка включила 135 ручьев, 67 из которых содержали золото.

Для оценки устойчивости и обобщающей способности модели была проведена пятикратная кросс-валидация (cross-validation) на обучающей выборке [5]. Данный метод позволяет оценить, насколько эффективно модель будет работать на новых данных, не использовавшихся при обучении. Все 135 ручьев были равномерно разделены на пять частей (фолдов), при этом также сохранялся баланс целевого признака. В рамках данной процедуры модель последовательно обучалась на комбинации четырех фолдов (108 ручьев) и тестировалась на оставшемся пятом фолде (27 ручьев). Для каждой итерации были зафиксированы показатели точности, чувствительности и специфичности.

Первоначальный этап обучения включал детальный анализ распределения вероятностей наличия золота для каждого фактора в отдельности на основе четырех фолдов и дальнейшую проверку на пятом фолде, не участвующем в обучении.

Рассмотрим алгоритм обучения на первой итерации. Для анализа распределения вероятностей были построены таблицы сопряженности и рассчитаны условные вероятности для каждого фактора по классам. В результате выявлены статистически значимые закономерности. Для фактора «Азимут» наблюдается повышенная вероятность золотоносности для направлений СЗ, С и СВ. Около 50 % золотоносных ручьев приурочены к этим направлениям, тогда как 64 % не содержащих россыпного золота водотоков ориентированы на юг и юго-запад. В частности, доля золотоносных ручьев среди тех, что текут на северо-запад, составляет 67 %, в то время как среди текущих на юг золото отсутствует в 78 % случаев.

На изучаемой территории наиболее развиты ручьи первого и второго порядков. Для ручьев второго порядка золотоносность вероятна в 60 % случаев. В свою очередь, водотоки первого порядка более чем в 55 % случаев не содержат россыпного золота.

Для фактора «Удаленность от гранитов» наблюдался выраженный градиент вероятностей: от 26 % для низких значений до 72 % для расстояния 5–15 км (уровень 2).

Аналогичная картина наблюдалась и для других факторов. Фактор «Возраст пород» демонстрировал высокую вероятность (75 %) для категории, характеризующей ручьи, дренирующие осадочные породы палеоген-неогенового возраста. Анализ фактора «Удаленность от палеоген-неогеновых отложений» показал, что ручьи, дренирующие эти образования, с наибольшей вероятностью содержат золото, а с увеличением расстояния эта связь ослабевает.

По результатам анализа был сформирован набор статистически значимых факторов. Параметр «Четвертичные отложения» был исключен ввиду недостаточного количества наблюдений (8 из 135). В итоге для построения модели отобраны пять ключевых факторов: азимут (классы 1, 2, 8), порядок водотока (класс 2), возраст дренируемых пород (класс 2), удаленность от гранитов (класс 2) и близость к палеоген-неогеновым отложениям (класс 0).

На следующем этапе для каждого отобранного фактора был создан бинарный индикатор. Индикатор принимал значение 1, если характеристика ручья указывала на потенциальную золотоносность, и 0 – в противном случае. Например, индикатор «Азимут» принимал значение 1 для направлений 1, 2, 8.

Поскольку каждый значимый фактор изменяет шансы обнаружения золота (отношение вероятности наличия золота к вероятности его отсутствия), для них были вычислены коэффициенты (β), характеризующие степень влияния каждого индикатора. Расчет коэффициентов производился по формуле:

$$\beta = \ln ((p1/(1 - p1)) / (p0 / (1 - p0))) ,$$

где p_1 – вероятность в группе с фактором, p_0 – вероятность в группе без фактора.

Пример для фактора «Удаленность от гранитов»: $p_1 = 0,722$, $p_0 = 0,493$.

$\beta = \ln ((0,722 / (1 - 0,722)) / (0,493 / (1 - 0,493))) = \ln (2,60 / 0,97) \approx 0,98$. Примем равным 1.

Аналогично были рассчитаны коэффициенты для остальных индикаторов: для азимута течения – 0,7, для порядка водотока – 0,4, для возраста дренируемых пород – 1,2 и для близости к палеоген-неогеновым отложениям – 0,6. Свободный член (β_0) составил -1,7, что соответствует базовой вероятности 15 % при отсутствии всех благоприятных признаков.

На основе полученных данных была построена прогнозная модель логистической регрессии – статистического метода, предназначенного для моделирования вероятности бинарного события (в нашем случае – наличие или отсутствие золота). Уравнение логистической регрессии имеет следующий вид:

$$P(\text{золото}) = 1 / (1 + e^{-(z)}) ,$$

где $z = \beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \beta_2 \times X_2 + \beta_3 \times X_3 + \beta_4 \times X_4 + \beta_5 \times X_5$.

Здесь X_1, X_2, \dots – бинарные индикаторы (1 или 0), а β_1, β_2, \dots – их коэффициенты.

В нашем случае $z = -1,7 + 0,7 \times X_1 + 0,4 \times X_2 + 1,2 \times X_3 + 1,0 \times X_4 + 0,6 \times X_5$.

Данное уравнение позволяет для любого ручья вычислить вероятность $P(Au = 1)$ на основе его характеристик. После построения модели на четырех фолдах она была проверена на пятом фолде, не участвующем в обучении модели и состоящем из 27 ручьев, 13 из которых золотоносные. Точность модели составила 70 % (19 из 27 всех ручьев определены верно), специфичность – 100% (14 из 14 «пустых» ручьев определены верно), а чувствительность – 39 % (5 из 13 золотоносных ручьев определены верно). После пятикратной кросс-валидации сравнивались выбранные наиболее значимые факторы и параметры модели.

Значения чувствительности модели заметно варьировали от 39 до 69 %, а наборы значимых факторов изменялись между фолдами. Например, в одних фолдах максимальная золотоносность была приурочена к породам палеоген-неогена, а в других характеризовалась породами палеозоя. Основываясь на этом, можно выдвинуть гипотезу, что на изучаемой территории существует два генетических типа россыпей золота, различающихся источниками питания.

Для проверки гипотезы был проведен дополнительный анализ. Вся выборка была разбита на два типа, в качестве ключевого признака была выбрана удаленность ручья от палеоген-неогеновых отложений, поскольку ее связь с золотоносностью проявлялась наиболее неоднозначно в разных частях выборки. На этом основании в обучающей и тестовой выборках были выделены две группы (типа) ручьев: тип А – ручьи, непосредственно дренирующие палеоген-неогеновые отложения или находящиеся в непосредственной близости от них (удаленность < 5 км);

Таблица. Параметры модели по результатам пятикратной кросс-валидации

Итерация	Выбранные факторы					Точность	Чувствительность	Специфичность
	Азимут	Водоток	Возраст пород	Граниты	P/N			
1	1, 2, 8	2	2	2	0	0,704	0,385	0,846
2	1, 2, 8	2	2	2	0	0,666	0,692	0,857
3	8	2	5, 6	2	4	0,704	0,417	0,769
4	1, 2, 8	2	6	2	4	0,630	0,357	0,846
5	1, 2	2	2	2	0	0,667	0,417	0,930
Ср. знач.						0,674	0,454	0,850

тип Б – ручьи, дренирующие более древние породы и удаленные от палеоген-неогеновых отложений. Для каждого типа независимо проведен анализ значимых факторов и построены свои модели логистической регрессии методом.

Анализ таблиц сопряженности и расчет условных вероятностей для обучающих выборок каждого типа выявил различные наборы значимых прогнозных признаков. Для типа А ключевое значение имеют направления С и ЮЗ, породы палеоген-неогенового возраста и удаленность от гранитов более 25 км, для типа Б – азимуты СЗ, С и СВ, древние породы, расположение в пределах 5–20 км от гранитов и удаленность от палеоген-неогеновых отложений.

Применение уравнений к тестовой выборке, также разделенной по типам, показало следующие результаты. Модель для типа А продемонстрировала точность 81 %, чувствительность 63 % и специфичность 100 %. Модель для типа Б показала точность 75 %, чувствительность 56 % и специфичность 100 %. Таким образом, дифференцированный подход позволил повысить общую точность прогноза.

Внедрение разработанного дифференцированного прогнозного алгоритма в практику геологоразведочных работ способствует переходу к обоснованному выделению приоритетных объектов для дальнейшего изучения. С учетом полученных результатов модель рекомендуется использовать для ранжирования территорий и определения первоочередных объектов исследования, а не для полного исключения каких-либо объектов из рассмотрения.

Разделение модели на два типа позволило существенно повысить характеристики моделей. Основное ограничение модели связано с объемом выборки: хотя 168 наблюдений достаточно для построения работоспособной модели, дальнейшее накопление данных позволит уточнить коэффициенты, особенно для факторов с малым количеством наблюдений.

Проанализированная территория по сути своей включает несколько россыпных районов, дальнейшие исследования будут посвящены выделению внутри этой территории россыпных узлов, ограниченных схожими геолого-геоморфологическими условиями. Важно отметить, что модель создана для конкретного региона, однако можно предположить, что предложенный подход будет уместен и воспроизводим и для других площадей при условии адаптации модели.

Исследование выполнено в молодежной лаборатории ИГЕМ РАН «Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований» в рамках темы государственного задания «Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная геологическая карта, Лист Q-53 – Верхоянск. Объяснительная записка. – 2016. – 427 с.
2. Государственная геологическая карта, Лист Q-54 – Усть-Нера. Объяснительная записка. – 2019. – 843 с.
3. Государственная геологическая карта, Лист R-53 – Нижнеянск. Объяснительная записка. – 2020. – 320 с.
4. Государственная геологическая карта, Лист R-54 – Депутатский. Объяснительная записка. – 2022. – 611 с.
5. Дэвис Дж. Статистика и анализ геологических данных. – М. : Мир, 1977. – С. 322.
6. Прасолов А. М., Владимирцева О. В. Вещественная характеристика россыпного золота ручья Ветвистый и перспективы выявления россыпей с нетипичными источниками питания в районе среднего течения р. Селеннях (Момский, Абыйский район (Якутия)) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2024. – Т. 66, № 2. – С. 80–90.
7. Шило Н. А. Основы учения о россыпях. – М. : Наука, 1981. – 400 с.

Сватков А. С. (svatkov@tsnigri.ru), Гирфанов М. М. (girfanov@tsnigri.ru),
Истомин В. А. (istomin@tsnigri.ru)
ЦНИГРИ, г. Москва

ДИНАМИКА МИРОВОГО РУДНИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЗАПАСОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ АБЦМ В ПЕРИОД 2020–2024 гг. (ПО ДАННЫМ ЗАРУБЕЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ)

В обзоре представлен комплексный анализ динамики мировой минерально-сырьевой базы и рудничного производства алмазов, благородных и цветных металлов за период 2020–2024 гг. На основе данных ведущих международных агентств проведена статистическая оценка мировых запасов и объемов добычи по девяти ключевым видам сырья.

Ключевые слова: минерально-сырьевая база, рудничное производство, цветные металлы, рынок золота, стратегические запасы РФ.

В докладе представлен анализ динамики мировой минерально-сырьевой базы и рудничного производства по видам минерального сырья, относящимся к компетенции института ФГБУ «ЦНИГРИ», – алмазам, благородным и базовым цветным металлам (АБЦМ). Мировая статистика по девяти видам сырья рассмотрена за пятилетний период с 2020 по 2024 гг., по которому в открытом доступе имеется достаточно полная информация. В качестве фактического материала использованы данные из зарубежных источников по рудничному производству и эксплуатационным запасам АБЦМ по ведущим странам-производителям и по миру в целом.

Первичные статистические данные заимствованы из бюллетеней Геологической службы США (USGS), Британской геологической службы (BGS), обзоров агентства S&P Global Market Intelligence, сайтов агентств Trade Map, Thomsonreuters, World Bureau of Metal Statistics, Kimberley Process и другим.

Как известно, в 2020–2021 гг. произошло значительное снижение мирового рудничного производства АБЦМ, вызванное экономическими последствиями пандемии COVID-19 и затронувшее в разной степени все виды АБЦМ, включая металлы, востребованные в процессе «энергетического перехода» (Ni, Co, Cu), и алмазы.

С 2021 г. возобновился активный рост производства никеля, кобальта и меди, которое к концу 2024 года существенно превысило допандемийные уровни.

В 2022–2024 гг. незначительно выросла добыча серебра и МПП, которые так и не вышли на «допандемийный» уровень. Добыча по золоту в целом стабилизировалась на уровнях 3000–3300 тонн в год. Добыча цинка также стабилизировалась, свинца – существенно снизилась за рассматриваемое пятилетие. Добыча алмазов существенно выросла с 2021 года и продолжала удерживаться на уровне 115–120 млн карат в год.

Можно отметить, что в 2024 году по сравнению с предыдущим годом существенно увеличилось мировое производство золота (+10 %) и алмазов (+4,9 %); продолжился возобновившийся в 2021 г. активный рост производства кобальта (+26 %), меди (+4,5 %) и никеля (+2,8 %); стабилизировалось или несколько снизилось производство цинка, свинца (-4,4 %), серебра (-3,8 %); произошло существенное снижение производства МПП (-7,7 %).

Самым заметным событием на мировом рынке сырья уже в последнее время явился резкий рост цен на золото, которые в текущем 2026 году превышают 5000 долл. за тройскую унцию. Ключевыми факторами, способствовавшими росту цен на золото, считаются изменение тарифной политики США, волатильность фондового рынка и ослабление доллара США в отношении ведущих мировых валют.

Вслед за золотом резко выросли также цены и на другие благородные металлы – серебро и платиноиды.

Кроме абсолютных значений мирового производства АБЦМ, в докладе рассмотрена динамика доли России в его объеме за пятилетний период. В частности, отмечено, что в 2024 году по сравнению с предыдущим 2023 годом эта доля снизилась по целому ряду видов АБЦМ. Так, доля России уменьшилась по МПП (с 29 до 26 %), золоту (с 10 до 9 %), кобальту (с 4 до 3 %) и алмазам (с 33 до 31 %), не изменилась по серебру (5 %), цинку (3 %), меди (4 %) и никелю (6 %), а увеличилась только по свинцу (с 4 до 5 %).

Ранее было показано, что объемы рудничного производства пропорциональны состоянию минерально-сырьевой базы стран-производителей – количеству и качеству запасов ресурсов минерального сырья. В докладе продемонстрировано, что Российская Федерация уверенно удерживает позиции среди ведущих минерально-сырьевых держав по этому показателю, сохраняя место в первой пятерке стран по запасам и ресурсам большинства благородных и цветных металлов и алмазов. Лидирующие позиции Россия занимает, в частности, по разведанным запасам алмазов, золота, платиноидов.

В целом можно заключить, что Российская Федерация, несмотря на некоторое снижение относительных долей в мировом производстве ряда видов горнорудного сырья (МПП, алмазы, золото), сохраняет статус одного из ведущих производителей АБЦМ в мире. Стабильность ресурсной базы и высокие объемы добычи позволяют нашей стране сохранять за собой место в первой пятерке мировых производителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов А. И., Наумов Е. А. и др. Отчет о выполнении государственного задания № 049-00017-25-00 за 2025 г. (ФГБУ «ЦНИГРИ», декабрь 2025 г., Роснедра). – Книга 4.
2. The United States Geological Survey (USGS). – URL: <https://www.usgs.gov>.
3. The British Geological Survey. – URL: <https://www.bgs.ac.uk/about-bgs>.

Сейров Ф. Е. (fes2@tpu.ru), Ананьев Ю. С. (ananeyvys@tpu.ru)

НИ ТПУ, г. Томск

СТРУКТУРНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННЫХ СЪЕМОК

Дана характеристика эпитеpмальных систем Камчатского полуострова в данных дистанционного зондирования (ДЗ) по материалам ASTER, Landsat-8, ArcticDEM, Google Earth. Приведена оценка рудоконтролирующих структур. По спектральным характеристикам выявлены и закартированы метасоматиты.

Ключевые слова: Камчатский полуостров, эпитеpмальная система, структурный контроль, метасоматическая зональность, Aster, Landsat-8, ArcticDEM.

В строении Камчатского полуострова выделяются до семи вулканоплутонических поясов (ВПП), в большей части из которых выявлены и в настоящее время разрабатываются эпитеpмальные месторождения золота, серебра и меди [3]. На основании анализа материалов дистанционных съемок Aster, Landsat-8, цифровых моделей рельефа AsterGDEM, ArcticDEM и открытых материалов Google Earth по месторождениям рудного поля Малетойваям, а также месторождениям Мутновское, Кумроч и Бараньевское была сформулирована дистанционная структурно-метасоматическая модель эпитеpмальных систем.

В состав рудного поля Малетойваям входят эпитеpмальные месторождения высокосульфатного «high sulfidation» (HS) типа: Юбилейное, Юго-Западное, рудопроявление Гатчинг и некоторые другие [1, 2]. Прочие объекты относятся к средне-низкосульфатным «intermediate-low sulfidation» (IS-LS). Месторождения Мутновское и Кумроч входят в состав одноименных рудных полей. Бараньевское входит в состав Балхачского рудного поля, на западе и юго-западе которого располагаются эпитеpмальные месторождения Золотое, Угловое, Кунгурцевское [1, 5].

Месторождения Малетойваямского, Мутновского, Кумрочского и Бараньевского рудных полей имеют схожее геологическое строение. Они принадлежат к вулканоплутоническим поясам палеоген-неогенового возраста. Малетойваямское и Бараньевское месторождения расположены в пределах Корьякско-Центрально-Камчатского ВПП, Мутновское и Кумроч – в пределах Олюторско-Восточно-Камчатско-Курильского. Подстилающими породами для покровных комплексов ВПП являются мел-палеогеновые осадочные и вулканогенно-осадочные толщи [3]. По-

Таблица. Минеральные индексы, по материалам ASTER, характерных минеральных ассоциаций метасоматитов (по материалам [9, 10])

Индекс	Формула вычисления	Интерпретация
MI ³	$(\text{band12} \times \text{band14} \times \text{band14} \times \text{band14}) / (\text{band13} \times \text{band13} \times \text{band13} \times \text{band13})$	Участки окварцевания
Fillit	$(\text{band5} + \text{band7}) / \text{band6}$	Слюдистые минералы
Ferric iron	$\text{band2} / \text{band1}$	Окислы железа
KLI	$(\text{band4} / \text{band5}) \times (\text{band8} / \text{band6})$	Каолинит
ONI	$(\text{band7} / \text{band6}) \times (\text{band4} / \text{band6})$	ОН-содержащие минералы (гидрослюды)
ALI	$(\text{band7} / \text{band5}) \times (\text{band7} / \text{band8})$	Алузит

положение месторождений контролируется структурами оседания. Малетойваямское рудное поле лежит в пределах Малетойваямской вулканической постройки [2]. Мутновское месторождение расположено в пределах Жировской палеовулканической постройки [6]. Месторождение Кумроч приурочено к центру Быстринской вулкано-тектонической структуры [4]. Бараньевское месторождение приурочено к Балхачской вулкано-тектонической структуре. Вулканоструктуры оседания, с которыми сопряжено оруденение, преимущественно сложены средними вулканиками и их туфами. Нередко покровные вулканики прорываются субвулканическими телами среднего и основного состава [1].

Выявление рудоконтролирующих структур и окolorудных метасоматитов осуществлялось в два этапа. На первом этапе по материалам Landsat-8 выявлялись региональные структуры, контролирующие положение рудных полей, и зоны возможного обнаружения метасоматически измененных пород. На втором этапе использовались материалы Aster, AsterGDEM, ArcticDEM, Google Earth с целью выявления рудоконтролирующих структур, метасоматитов и сопряженного оруденения.

Методика обработки и дешифрирования включала в себя следующие шаги:

1. Подбор материалов Aster, Landsat-8, AsterGDEM, ArcticDEM и их улучшение; радиометрическую и атмосферную коррекцию, приведение к отражательной способности для Aster и Landsat-8;

2. Структурное дешифрирование материалов Landsat-8. Анализ VNIR (visible and near-infrared) и SWIR (short-wave infrared) диапазонов Landsat-8 с использованием метода минимизации ограниченной энергии [7];

3. Структурное дешифрирование материалов Google Earth и ArcticDEM;

4. Анализ спектральных диапазонов Aster методами искусственных цветов, главных компонент [8] и минеральных индексов (таблица) для выделения площадей развития гидротермалитов. Картирование метасоматитов методом спектрального угла.

Разрывные нарушения в материалах Landsat-8 выявляются по смене тона по разные стороны от нарушения, по крутым склонам, смещениям видимых геологических границ и элементов рельефа. Часто разломы первого и второго порядка трассируются водотоками. По данным Landsat-8 в районе месторождений выявлялись линейные и дуговые структуры. Оба типа нарушений по размерам разделены на структуры первого и второго порядка. Линейные структуры первого порядка отвечают главным протяженным разрывным нарушениям протяженностью более 40 км. Линейные структуры второго порядка распространены между главными разрывными нарушениями и часто ограничиваются ими. Кольцевые и дуговые структуры первого порядка интерпретируются как структуры оседания над глубинными коровыми магматическими камерами. Дуговые и кольцевые структуры второго порядка отвечают вулканическим постройкам центрального типа.

Для ВПП Камчатского полуострова характерно наличие двух систем главных разрывных нарушений. Одна система включает в себя продольные и поперечные по отношению к ВПП разломы, вторая – диагональные. Угол между разрывными нарушениями систем лежит в пределах 30–45°. Разломы второго порядка ориентированы по тем же направлениям, что и главные линейные структуры. Участки наиболее интенсивного вулканизма контролируются сбл-

женными, реже одиночными разломами первого порядка. Эти участки выявляются по высокой плотности вулканоструктур (дуговых разломов второго порядка), которые лежат во внутренних частях дуговых разломов первого порядка.

Рудное поле Малетойваям локализовано в зоне интенсивной вулканической активности, вытянутой вдоль сближенных разломов первого порядка, параллельных ВПП в зоне их сопряжения с диагональным разломом. Внутри поля вулканитов оно приурочено к серии изометричных вулканоструктур второго порядка диаметрами 5–10 км.

Рудные поля Мутновское, Кумроч и Балхачское локализованы в зонах интенсивной вулканической активности, расположенных вдоль диагональных главных линейных структур. В поле вулканоструктур рудные поля приурочены к сложным (состоящим из нескольких сближенных кальдер) структурам оседания размерами до 10–20 км. Кальдеры контролируются структурами второго порядка.

Для выделения и картирования метасоматически измененных пород использованы несколько методов. Метод минимизации ограниченной энергии по материалам Landsat использовался для выделения метасоматитов по эталонным спектрам каолинита, гетита и эпидота. В пределах рудного поля Малетойваям выявлена площадная область распространения метасоматитов протяженностью до 15 км. В Мутновском, Кумрочском и Балхачском рудных полях отмечены изометричные проявления гидротермалитов размерами до первых сотен метров.

В материалах Aster метасоматически измененные породы выявлялись по соответствию спектров пиксела изображения эталонному значению известного минерала. Разрывные структуры фиксировались в материалах ArcticDEM и Google Earth по тем же критериям, что и в материалах Landsat-8, но с большей детальностью. Структурный анализ сводился к выявлению связанных с вулканизмом дуговых и радиальных структур (структуры третьего порядка).

В пределах рудного поля Малетойваям выявлен метасоматический ореол, приуроченный к краевой части вулканоструктуры. Он проявлен в зонах сопряжения дуговых разломов с радиальными. Ореол имеет протяженность около 10–15 км при ширине в сотни метров–первые километры. В метасоматическом ореоле выявляются 4 зоны (от тыловой к фронтальной) – зона монокварцевых, кварц-алунитовых, кварц-каолинитовых, кварц-каолинит-серицитовых метасоматитов. Монокварцевые метасоматиты выявляются по низкой отражательной способности в SWIR диапазоне Aster и по значимым величинам индекса MI^3 . Кварц-алунитовые метасоматиты определяются по низкому отражению в 5 канале, проявлены в индексах ALI, ONI и розовой окраске в составе RGB-композиата 4, 6, 8 каналов Aster. Кварц-каолинитовые метасоматиты выявляются по низкому отражению в 6 канале, проявлены индексами KLI, ONI и розовой окраской в составе композиата 4, 6, 8 каналов Aster. Кварц-каолинит-серицитовые метасоматиты слабо отличаются от кварц-каолинитовых. Их особенностью является более сглаженный переход отражательной способности с 4 канала на 5. Так же они выявляются методом главных компонент и значимыми величинами индекса MI^3 .

Известные месторождения Малетойваямского рудного поля располагаются внутри метасоматического ореола и пространственно совпадают с зонами монокварцевых, кварц-алунитовых и кварц-каолинитовых метасоматитов и контролируются зонами сопряжения кальдер проседания и радиальных разломов третьего порядка.

В районах рудных полей Кумроч и Мутновское метасоматиты представлены небольшими, до первых сотен метров, изометричными проявлениями серицитизированных пород. Данные области выявляются в виде розоватых областей в составе RGB-композиата 4, 6, 8, значимыми величинами индекса Fillit и трехвалентного железа. Также эти изменения выявляются методом главных компонент. Отдельно выявляется ряд небольших областей, в которых фиксируются повышенные значения индекса трехвалентного железа, которые интерпретируются как зоны распространения окисленных сульфидов.

Пространственно рудные зоны LS систем могут накладываться на метасоматиты. При этом метасоматиты, как правило, лежат в наиболее проницаемых структурах – зонах сопряжения дуговых и линейных разломов. Структурный контроль оруденения осуществляется разломами третьего порядка параллельными разломам, контролирующим положение кальдер. Жильные тела занимают центральную часть кальдер проседания, но контролируются теми же разломами, что и метасоматиты.

Таким образом, области распространения продуктивных вулканитов, к которым приурочены рудные поля эпитермальных месторождений, контролируются главными линейными разрывными нарушениями: у месторождений HS типа – продольными, у LS – диагональными. Рудные поля высокосульфатных месторождений лежат в зонах сопряжения продольных и диагональных по отношению к ВПП главных структур на периферии кальдер проседания, в зонах их сопряжения с радиальными разломами. Рудные поля низкосульфатных месторождений лежат на разломах второго порядка в центральных частях кальдер. Рудные тела месторождений LS-типа ориентированы вдоль разломов, контролирующих положение кальдер. Месторождения HS-типа лежат в центральных частях полей метасоматических ореолов в зоне монокварцевых, кварц-алунитовых и кварц-каолинитовых метасоматитов. Месторождения LS-типа имеют слабопроявленный ореол, состоящий из отдельных небольших проявлений кварц-серицитовых метасоматитов, которые пространственно могут не совпадать с оруденением, но контролируются теми же линейными структурами.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-27-00462).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников Н. С., Толстых Н. Д. Эпитермальные месторождения Камчатки (Россия) // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65, № 1. – С. 124–152. – DOI : 10.1134/S1075701523070176
2. Гурин Г. В. Опыт применения геофизических методов при поисках эпитермальных месторождений золота (на примере Малетойваямского золоторудного поля, Камчатка) // Литосфера. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 116–132. – DOI : 10.24930/1681-9004-2021-21-1-116-132
3. Мигачев И. Ф. [и др.] Корякско-Камчатский регион – потенциальная медно-порфировая провинция // Отечественная геология. – 2020. – № 4–5. – С. 3–23. – DOI : 10.47765/0869-7175-2020-10020
4. Округин В. М. [и др.] Минералого-геохимические особенности руд месторождения Кумроч, Восточная Камчатка // Руды и металлы. – 2019. – № 2. – С. 84–96. – DOI : 10.24411/0869-5997-2019-10017
5. Якич Т. Ю. [и др.] Особенности вещественного состава и условия формирования медной минеральной ассоциации Бараньевского эпитермального месторождения (Центральная Камчатка) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 12. – С. 74–87.
6. Шишканова К. О. [и др.] Особенности минералогии руд южного фланга золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка) // Руды и металлы. – 2022. – № 3. – С. 78–100. – DOI : 10.47765/0869-5997-2022-10018
7. Chang C.-I., Constrained Energy Minimization (CEM) for Hyperspectral Target Detection: Theory and Generalizations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2024. – V. 62. – P. 1–21. – Art no. 5522921. – DOI : 10.1109/TGRS.2024.3424281
8. Crosta A. P., McMoore J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain // Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology. – 1989. – P. 1173–1187.
9. Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual Compiled by Remote Sensing Applications Geoscience // Australia, Center of Geographic Sciences. – 2004.
10. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials // Ore Geology Reviews. – 2019. – 108. – 54–72.

Соколов Л. В. (lev.sokolov@urfu.ru), Польшгалов С. Э.,
Лобанов В. Г., Седельникова Д. С., Супранкова А. С.
УрФУ, г. Екатеринбург

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЩАВЕЛЕВОЙ КИСЛОТЫ

В работе рассмотрена возможность применения нетрадиционной реагентки для извлечения цинка из технологических сульфаминовых цинксодержащих растворов с применением щавелевой кислоты. Определен необходимый избыток щавелевой кислоты от стехиометрического соотношения.

Ключевые слова: гидрометаллургия, цинк, сульфаминовая кислота, щавелевая кислота, оксалат цинка.

Все увеличивающийся спрос на цветные металлы наравне с истощением сырьевой базы, в совокупности с возрастающим вниманием на экологические аспекты производства металлов, диктуют необходимость в разработке и применении инновационных технологий переработки [1]. В частности, рассматривается возможность применения нетрадиционной реагентки на гидрометаллургических переделах.

Одним из таких реагентов является сульфаминовая или аминосульфоновая кислота (СК) [2]. В исходном состоянии – порошок белого цвета, хорошо растворимый в воде. Категория опасности – 3, что в экологическом отношении предпочтительнее серной и соляной кислот. Отработанные растворы имеют нейтральный характер и, в соответствии с нормативными требованиями, не нуждаются в дополнительной утилизации. Кислота может быть подвергнута регенерации. При комнатной температуре водный раствор СК стабилен в течение длительного времени [3].

Однако варианты переработки получаемых при использовании СК продуктивных растворов пока изучены слабо. Одним из вариантов может быть обработка продуктивного раствора известковым молоком. Так происходит образование сульфамата кальция с выпадением в осадок гидроксидов металлов. После отделения гидроксидов от маточного раствора, раствор подвергают регенерации серной кислотой с образованием гипса. Далее фильтрованием разделяют гипс (побочный продукт) и регенерированный раствор СК, который подкрепляют свежей СК и направляют в голову процесса – выщелачивание.

Такая технология обладает рядом недостатков, такими как:

- неполное срабатывание извести, которое приводит к загрязнению ею получаемого продукта;
- увеличение объемов оборотных растворов;
- использование для регенерации агрессивной серной кислоты.

Цель данного исследования – оценка возможности использования альтернативной реагентки для извлечения ценных компонентов из растворов СК и ее регенерации.

С учетом литературных данных, в качестве такого реагента была выбрана щавелевая кислота.

В работе использовали технологический цинксодержащий раствор СК следующего состава, г/дм³: 13,1 Zn, 0,58 Fe. Раствор подвергали обработке щавелевой кислотой. Получаемые осадки отделяли фильтрованием, фильтрат анализировали на остаточное содержание цинка, а также свободной щавелевой кислоты методами атомной адсорбции и потенциометрическим титрованием соответственно.

Для оценки полноты извлечения добавляли щавелевую кислоту в раствор в стехиометрическом соотношении и избытке в 1, 2,5, 5, 10 и 20 %. Процесс вели при комнатной температуре с интенсивным перемешиванием, продолжительность выдержки растворов составляла 1 час. Результаты приведены на диаграмме (см. рисунок).

Наиболее полное извлечение цинка достигается при избытке щавелевой кислоты 20 % и составляет 99,9. При этом железо извлекается лишь на 46 %. Таким образом, щавелевая кислота обеспечивает достаточную селективность по отношению к цинку в данной системе.

Стоит отметить, что при избытке щавелевой кислоты более 5 %, наблюдается присутствие свободного оксалат-иона в растворе, что нежелательно.

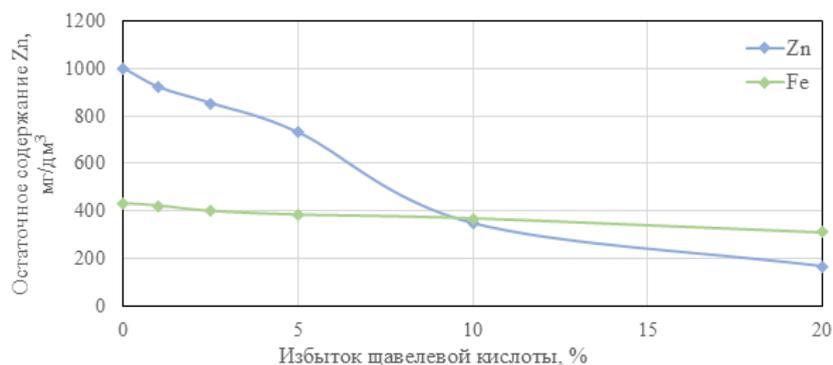


Рисунок. Результаты извлечения Zn, Fe из раствора в зависимости от избытка щавелевой кислоты

Таким образом, по результатам тестовых экспериментов можно сделать вывод, что предпочтительно использовать щавелевую кислоту с избытком 5 % от стехиометрии. Это позволяет достичь извлечения, %: 94,4 Zn и 34 Fe.

Применение щавелевой кислоты для извлечения ценных компонентов из растворов СК перспективно и требует в дальнейшем более глубокого и детального изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов Р. М. Техногенные минеральные ресурсы Южного Урала // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России. Москва, 04–05 апреля 2017 года. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М. : Российский университет дружбы народов (РУДН), 2017. – Вып. 19. – С. 214–218. – EDN WCMNFO.
2. Патент № 2833957 С1, Российская Федерация, МПК С22В 15/00, С22В 3/06. Способ извлечения меди из окисленных руд : заявл. 13.06.2024 : опубл. 03.02.2025 / В. Г. Лобанов, С. Э. Польшгалов, Л. В. Соколов [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – EDN ТНПКD.
3. Топоркова Ю. И. Комплексная переработка цинксодержащей пыли сталеплавильного производства в аммиачно-хлоридных средах : специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» : автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. технических наук / Топоркова Юлия Игоревна. – Екатеринбург, 2021. – 137 с. – EDN DFQIMB.

Соколова Л. А.^{1,2} (sokolovalidia@inbox.ru), Белогуб Е. В.³, Гуревич Д. В.⁴

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург; ² ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург;

³ ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс; ⁴ ООО «Амур Золото», г. Хабаровск

РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ Au-МЕСТОРОЖДЕНИЯ КРАСИВОЕ (АЛДАНСКИЙ ЦИТ)

В работе впервые описан минеральный состав руд золотого месторождения Красивое, Хабаровский край. Золотое оруденение связано с пирит-кварцевыми прожилками двух морфологических типов: крутопадающий штокверк и зоны параллельных прожилков. Помимо самородного золота, в рудах установлены теллуриды Au, Ag, Bi, Ni, Pb.

Ключевые слова: золоторудное месторождение Красивое, самородное золото, теллуриды, Алданский цит, хребет Кет-Кап.

Алданский щит характеризуется большим количеством россыпных и коренных месторождений золота, образование которых связано с гидротермальной активностью, связанной с юрско-меловым магматизмом [4]. Наиболее изучены месторождения Центрального Алдана, в рудах которых (помимо самородного золота) установлены теллуриды золота, серебра и других элементов [5].

Ряд месторождений золота приурочен к раннемеловым интрузивно-вулканогенным комплексам пояса Кет-Кап [3]. Месторождение Красивое расположено в восточной части пояса [2] и приурочено к эродированному жерлу раннемелового вулкана, сложенного взрывными брекчиями, частично замещенными метасоматитами, и прорванному раннемеловыми магматическими породами: гранодиорит-порфирами облачного комплекса и сиенитами кеткапского комплекса [1]. Вмещающие породы представлены гранитогнейсами и амфиболитами одолинской свиты раннего архея и терригенными породами кондерской и омнинской свит позднего рифея. Метасоматические изменения представлены карбонат-альбитовыми и серицит-карбонат-хлоритовыми метасоматитами. Рудная зона в проекции на поверхность имеет форму дуги, отрезанной от кольцевой структуры жерла разломами СВ простирания. В разрезе зона имеет крутое падение и прослеживается в виде линейного штокверка на глубину около 550 м от поверхности, где переходит в пологозалегающую донную залежь, сложенную преимущественно оруденением зон параллельного прожилкования (ЗПП) [1]. Золотоносные пирит-кварцевые прожилки – и в виде штокверков, и в виде ЗПП, накладываются на все без исключения породы, участвующие в строении месторождения, в том числе и на ранние брекчии: в этом случае руды визуальнo имеют брекчиевую текстуру.

В работе изучены образцы различных пород (метасоматиты, гранитогнейсы, гранодиориты), отобранные из керна скважин из рудных интервалов, выделенных по керновому опробованию. Минеральный состав был изучен методами рудной микроскопии (РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН) и электронной микроскопии с приставками (РЦ «Геомодель» СПбГУ, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ЦПК «Геонаука» (г. Сыктывкар), ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс)).

В ходе минералого-петрографических исследований изучен состав рудной минерализации в штокверках, ЗПП и рудах брекчиевой текстуры. Во всех разновидностях руд основную роль играют пирит-кварцевые прожилки, мощности которых варьируют от долей миллиметра до нескольких сантиметров. ЗПП выделяются ярко выраженной полосчатой текстурой за счет чередования вмещающей породы и светло-серых или розоватых кварцевых прожилков с линзами и вкраплениями пирита. Основными минералами во всех морфологических разновидностях являются пирит и кварц, реже встречаются халькопирит, кальцит, серицит и хлорит. Золоторудная минерализация представлена высокопробным самородным золотом и теллуридами золота и серебра (калаверит, петцит). Также встречаются теллуриды висмута, свинца, никеля (теллуровисмутит, алтаит, мелонит).

Пирит в параллельных прожилках представлен в основном изометричными кубическими зернами размером до сантиметра, редко более. По химическому составу пирит однородный, крайне редко встречаются незначительные примеси кобальта (табл. 1). Пирит может содержать включения теллуридов и самородного золота и их сростков, включения локализованы преимущественно в трещинах и порах. Реже встречаются включения нерудных минералов (кальцит, кварц).

Самородное золото чаще встречается в виде включений в пирите и кварце, размером не более первых десятков микрон, в редких случаях золотины достигают размеров в первые сотни микрон, очень редко размеры превышают 1 мм. Также встречаются выделения золота в срост-

Табл. 1. Химический состав пирита, мас. %

Fe	Co	S	Сумма	Формула
46,36		53,57	99,93	FeS _{2,01}
46,37		53,82	100,19	FeS _{2,02}
46,35	0,34	53,23	99,92	Fe _{0,99} Co _{0,007} S _{1,98}

Табл. 2. Химический состав самородного золота, мас. %

Au	Ag	Сумма	Формула
87,76	12,24	100	$Au_{0,8}Ag_{0,2}$
97,12	2,88	100	$Au_{0,95}Ag_{0,05}$
92,96	7,04	100	$Au_{0,88}Ag_{0,12}$
100	0	100	$Au_{1,00}$

Табл. 3. Химический состав теллуридов, мас. %

Минералы	Au	Ag	Bi	Ni	Te	Сумма	Формула
Калаверит	41,76				58,3	100,07	$Au_{0,93}Te_2$
Петцит	24,61	42,1			33,38	100,09	$Ag_{2,99}Au_{0,96}Te_2$
Теллуровисмутит			51,56		48,44	100,00	$Bi_{1,95}Te_3$
Мелонит				19,12	80,82	99,94	$Ni_{1,03}Te_2$

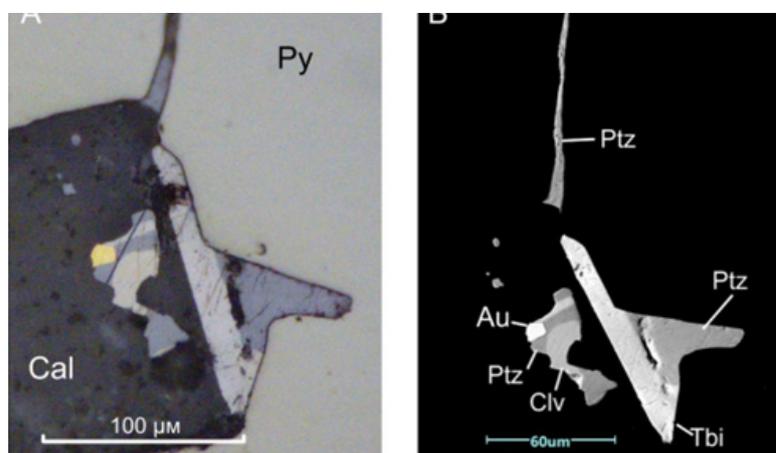


Рисунок. Типичный сросток теллуридов и самородного золота в пирите из ЗПП:

А – отраженный свет; Б – BSE-изображение; Cal – кальцит, Py – пирит, Clv – калаверит, Ptz – петцит, Tbi – теллурид висмута, Au – самородное золото

ках с теллуридами. Основной примесью является серебро, других примесей на уровне чувствительности анализа не обнаружено. Золото высокопробное и весьма высокопробное, пробность колеблется в пределах от 877 до 1000 ‰ (табл. 2).

Теллуриды в большинстве случаев представлены субмикронными округлыми включениями в пирите, нередко формируя в нем густую вкрапленность. Размеры зерен калаверита, петцита, теллуровисмутита и мелонита могут достигать 30–40 мкм, и тогда они чаще представляют собой сростки с другими теллуридами и самородным золотом (табл. 3, рисунок). Крупные зерна, откладывающиеся в крупных порах, могут иметь изометричные, пластинчатые и игольчатые формы, однако чаще формы зерен определяются формами заполняемых ими полостей. Алтаит встречается только в виде субмикронных включений, из-за малых размеров его химический состав диагностируется с трудом.

В результате работ получены новые данные о минералогии руд месторождения Красивое: помимо самородной формы, золото также присутствует в форме теллуридов. Установлены теллуриды висмута, свинца, никеля. Теллуридная ассоциация характерна для гидротермальных месторождений золота Алданского щита [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Д. В., Полонянкин А. А. Кондер – Кет-Кап: Два главных этапа формирования месторождений золота и МПГ : сборник тезисов докладов XII Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2023. – С. 106–108.

2. Морин А. О., Матвеев А. В., Стефаненко А. А. и др. Отчет по поисковым и поисково-оценочным работам на рудное золото в междуречье Бол. Аим–Омня–Маймакан–Учур в 1997–2002 гг.; в 5 томах (8 книгах) и 6 папках / Под ред. А. О. Морина. – Хабаровск : Геологоразведочная экспедиция ЗАО «Артель старателей «Амур», 2002. – Т. 1. – 299 с.
3. Полин В. Ф., Зверева Н. М., Травин А. В., Пономарчук А. В. Возраст золотого оруденения Кеткапско-Юнской магматической провинции, формационная принадлежность золотоносных комплексов и одновременность позднемезозойского магматизма в разных частях Алданского щита // Тихоокеанская геология. – 2022. – Т. 41, № 5. – С. 3–19.
4. Ханчук А. И. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В двух книгах. Книга 1. – Владивосток, 2006. – 572 с.
5. Kondratieva L. A., Anisimova G. S., Kardashevskaja V. N. Types of Tellurium Mineralization of Gold Deposits of the Aldan Shield (Southern Yakutia, Russia) // Minerals. – 2021. – V. 11. – P. 698.

Сомов Н. А. (somov@tsnigri.ru)
ЦНИГРИ, г. Санкт-Петербург

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛИХО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВ АЛМАЗОНОСНОСТИ ВАЖСКОЙ ПЛОЩАДИ

Важская площадь расположена в Онежском районе Архангельской области. Для этой площади ранее были оценены и апробированы прогнозные ресурсы алмазов категории P_3 в количестве 85 млн карат. Перспективы площади на обнаружение месторождений алмазов базируются на следующих факторах: благоприятное структурно-тектоническое положение площади, наличие убогоалмазоносных объектов щелочно-ультраосновного магматизма, ареал развития пиропов в четвертичных отложениях, наличие находок МИК, по данным АК «АЛРОСА» (ПАО), в составе терригенных горизонтов карбона из керна скважин.

Ключевые слова: шлихо-минералогический метод, поисковые обстановки, терригенные отложения, минералы-индикаторы кимберлитов (МИК), ледниковые осадки, направление и дальность переноса обломочного материала.

Шлихо-минералогический метод является одним из основных при прогнозировании и поисках месторождений алмазов. Он показал свою эффективность в ходе открытия известных алмазных месторождений Якутии в пределах так называемых «открытых» территорий, где кимберлитовые тела перекрыты маломощным комплексом четвертичных отложений. С другой стороны, в пределах «закрытых» территорий, где кимберлитовые тела перекрыты разновозрастными толщами осадочных образований, шлихо-минералогический метод не дает однозначных результатов. В пределах подобных территорий его основной задачей является выявление прямых признаков алмазоносности, а в лучшем варианте – оконтуривание локального участка возможного положения кимберлитовых тел [1].

На основании данных АК «АЛРОСА» (ПАО) ранее была обоснована постановка поисковых работ на алмазы в пределах Рочевской площади, которая входит в состав Важской. Основанием являлись данные о находках слабоизношенных МИК в составе терригенных отложений карбона в кернах скважин, что, по аналогии с Зимнебережным районом (схожее строение территорий), позволяло ожидать в их составе ореолы рассеяния ближнего сноса, а предположительный алмазоносный магматизм площади оценен как среднепалеозойский [4]. К сожалению, в отчетах работ предшественников не были приведены данные о вещественном составе терригенных осадков карбона, что затрудняет классификацию ореолов рассеяния МИК для возможного определения их удаленности от потенциальных источников.

Одной из задач проведения работ в пределах Важской площади являлось подтверждение достоверности данных находок МИК без бурения дополнительных скважин, основываясь на

особенностях условий осадконакопления при формировании терригенных осадков, перекрывающих кимберлитовмещающие породы.

Помимо установленных предшественниками МИК в терригенных отложениях карбона, в пределах Важской площади известны многочисленные находки индикаторных минералов в составе аллювиальных отложений [4]. При этом современные водотоки размывают различные типы четвертичных (ледниковых) осадков, для которых характерны различные по дальности транспортировки ореолы рассеяния МИК [1]. Их распределение в пределах площади показывает потенциальную связь с грубообломочными флювиогляциальными отложениями или с конечными моренами (свойственны ореолы рассеяния дальнего сноса или потерявшие связь с источником); высокая степень износа, класс размерности $-0,5$ мм показывают, что известные МИК относятся скорее к ареалу рассеяния, потерявшему связь с источником. Изученные факторы не позволяют однозначно связать МИК с потенциальными источниками в пределах Важской площади.

Еще одной задачей работ являлось установление влияния состава терригенных отложений карбона на состав ледниковых осадков.

Следует отметить, что при интерпретации данных шлихо-минералогического опробования терригенных отложений карбона основное внимание необходимо обращать на гранулометрический состав осадков, который однозначно показывает гидродинамическую активность водной среды, а следовательно, и ее транспортирующую способность, т.е. дальность транспортировки МИК [1].

Территория Важской площади относится к категории «закрытых». Кимберлитовмещающими отложениями являются терригенные образования верхнего венда (усть-пинежская и мезенская свиты), сложенные конгломератами, песчаниками, аргиллитами, алевролитами и глинами. Перекрывающие образования представлены терригенными осадками телзинской свиты нижнего карбона (кварцевые песчаники, алевролиты, глины, значительно менее развиты гравелиты и грубозернистые песчаники, конгломераты, приуроченные в основном к базальным частям разреза) и урзугской свиты среднего карбона (песчаники, реже глины, алевролиты, невыдержанные прослои, линзы конгломератов, гравелитов и грубозернистых гравелитистых песчаников); карбонатными отложениями среднего карбона и сложнопостроенным комплексом четвертичных (ледниковых) отложений различной мощности [4]. Осадки карбона распространены в восточной части площади, четвертичные отложения – повсеместно. Такое сочетание поисковых обстановок создает сложности для проведения шлихо-минералогического опробования и интерпретации полученных данных. Таким образом, изучаемая территория и Зимнебережный район с известными месторождениями алмазов имеют схожее геологическое строение.

В связи с редкой сетью скважин в пределах Важской площади и плохой обнаженностью территории трудно оценить фациальные обстановки осадконакопления в карбоновое время. Именно поэтому были использованы данные по опробованию терригенных отложений карбона, перекрывающих кимберлитовые трубки месторождения им. Ломоносова, специалистами ЦНИГРИ во второй половине 1980-х гг.

В пределах Зимнебережного района для терригенных отложений карбона выделены 4 фациальных обстановки осадконакопления (группы фаций): лагунных алевролит-алевропесчаных осадков, песчаных осадков шельфового мелководья, карбонатно-алевролит-песчаных осадков шельфа, аллювиальных и дельтовых песчаных осадков [3].

Фация лагунных алевролит-алевропесчаных осадков представлена переслаиванием кварцевых алевропесчаников и алевролитов горизонтально слоистых. МИК встречаются редко и не образуют ореолов.

Фация песчаных осадков шельфового мелководья представлена песчаниками слабо сцементированными, мелко-среднезернистыми, кварцевыми, в основном хорошо сортированными, иногда крупнозернистыми с гравием, с хорошей окатанностью песчаных зерен. Характерны ореолы рассеяния ближнего сноса, чаще всего не выходящие за пределы контура трубки.

Фация карбонатно-алевролит-песчаных осадков шельфа сформирована интенсивным переносом терригенного материала и накоплением его в неровностях древнего рельефа. Характери-

зуются переслаиванием песчаников и алевролитов. Песчаники тонко-мелкозернистые кварцевые на глинисто-карбонатном цементе. Ореолы рассеяния МИК не характерны.

Фация аллювиальных и дельтовых песчаных осадков представлена разнозернистыми, плохо сортированными, косослоистыми песчаниками с линзами и прослоями гравелитов, алевролитов и глин. В составе тяжелой фракции преобладают дистен и ставролит. Характерны ореолы рассеяния преимущественно дальнего сноса [2, 3].

В свою очередь, в составе четвертичных отложений морены ореолы рассеяния МИК имеют крайне незначительные размеры и могут прослеживаться на расстоянии не более 4 км от источника [1]. Незначительные концентрации МИК в ореолах рассеяния в моренах (1–4 знака, не более на 40 л пробу) в значительной степени обусловлены ее сильным разубоживанием.

Полевые работы включали в себя специализированные геолого-геоморфологические маршруты на детальных участках, приуроченных к известным коренным выходам пород телзинской свиты нижнего карбона с их опробованием, шлиховым опробованием аллювия и отложений морены с целью выявления потенциальной связи находок МИК в составе четвертичных отложений с подстилающими их промежуточными терригенными осадками карбона, в которых возможно обнаружение ореолов рассеяния МИК.

В ходе работ были опробованы конгломераты и песчаники телзинской свиты нижнего карбона в коренных выходах и расчистках долины р. Чешьюга.

Конгломераты характеризуются неоднородным составом и неравномерным распределением обломочного материала, песчаного заполнителя и цементирующего карбонатного материала. Обломки представлены переработанными породами карбонатного состава с примесью глинистого материала. Пробы отличаются крайне низким весом тяжелой фракции и отсутствием дальнеприносных минералов: дистена и ставролита.

Песчаники крупно-среднезернистые, со слоистой текстурой, зерна чаще всего хорошо окатаны, материал хорошо сортирован. Пробы отличаются крайне низким весом тяжелой фракции (альмандин, ильменит, турмалин, магнетит) и отсутствием дистена и ставролита.

Таким образом, отложения телзинской свиты нижнего карбона Важской площади возможно отнести к группе фаций песчаных осадков шельфового мелководья (открытого шельфа), для которой характерны ореолы рассеяния ближнего сноса. Однако нельзя не отметить минимальное влияние процессов дальнего сноса (потоки селевого типа) при формировании этих отложений.

Отложения морены изучаемой территории чаще всего представлены гравийно-галечными суглинками бурого цвета, реже супесями. Обломочный материал в большинстве своем представлен дальнеприносными породами: гранитоидами, кварцем, долеритом хорошей степени окатанности; в областях развития терригенных карбонатных отложений в обломочном материале встречался песчаник – степень окатанности 0–2 (ближний снос), т.е. терригенные отложения карбона оказывают влияние на состав осадков морены. Петрографический состав обломочного материала ледниковых образований может говорить о его переносе с западных направлений в четвертичное время. Данное направление было подтверждено замерами удлиненных осей галек в отложениях морены (с СЗ на ЮВ). Таким образом, перемещение материала ледниковой толщей определяется в большинстве своем как дальнее, однако, не исключен захват материала и вывод его на современную поверхность непосредственно в пределах Важской площади (ближний снос).

По результатам собственного шлихового опробования и материалам работ предшественников выделен ореол рассеяния МИК ближнего сноса в составе аллювиальных отложений на уч. Чешьюга в среднем течении одноименной реки протяженностью около 10 км, в котором присутствуют зерна пироба с фрагментами «первичной» коррозионно-гидротермальной поверхности и хромшпинелида мириэдрического облика 1–2 степени окатанности, которые могли попасть в состав аллювия прямым размывом терригенных отложений карбона.

Перед шлиховым опробованием аллювиальных отложений проведено районирование территории по условиям проведения поисковых работ Важской площади для выделения детальных участков, на которых возможно связать потенциальные находки МИК с кимберлитовыми телами или терригенными отложениями карбона. Районирование территории основано на

классификации ореолов рассеяния МИК [1]. Основные критерии выделения: развитие терригенных отложений карбонового возраста или осадков морены, перекрывающие образования карбона, в бортах современных долин рек. Именно на этих участках ожидалось ореолы рассеяния ближнего сноса. Петрографический состав обломочного материала современного аллювия Важской площади в большинстве своем представлен гранитоидами, кварцем, долеритом хорошей степени окатанности; в местах размыва терригенных отложений карбона резко преобладают практически неокатанные обломки песчаников, алевропесчаников, конгломератов. Исходя из наблюдений, можно сделать вывод, что большая часть обломочного материала современного аллювия имеет дальний снос, однако, не исключен захват материала, в т.ч. МИК, из размываемых отложений телзинской свиты нижнего карбона (ближний снос) или отложений морены (ближний или дальний снос), что обязательно необходимо учитывать при опробовании аллювиальных отложений территории.

На данном этапе работ можно сделать следующие выводы:

1. гранулометрический состав, а также отсутствие дальнепринесных минералов (дистен, ставролит) в терригенных отложениях телзинской свиты нижнего карбона предположительно позволяют отнести данные осадки к группе фаций открытого шельфа, которой свойственны ореолы рассеяния ближнего сноса;

2. основной снос материала территории работ происходил в четвертичное время с западных направлений ледниковой толщей, отложениям которой (морена) свойственны в т.ч. ореолы рассеяния МИК ближнего сноса;

3. находки в современном аллювии зерен пиропов I-II класса сохранности с фрагментами «первичной» коррозионно-гидротермальной поверхности класса крупности $-1+0,5$ мм и одного зерна хромшпинелида мириоэдрического габитуса класса крупности $-0,5+0,25$ мм, 2 класса окатанности (характерны для кимберлитов месторождения им. Ломоносова Зимнего Берега) уч. Чешьюга предположительно связаны с ореолом рассеяния ближнего сноса;

4. терригенные отложения карбона оказывают влияние на состав образований морены и современного аллювия. Дальность переноса материала местами не превышает первых километров (ближний снос);

5. слабоизношенные МИК в состав отложений современного аллювия могли попасть или прямым размывом терригенных коллекторов карбонового возраста, или путем размыва отложений морены, которые в свою очередь могли захватить материал непосредственно в пределах Важской площади (ближний перенос из источника или терригенных отложений карбона);

6. предварительно, по полученным к настоящему времени данным, возможно предполагать присутствие в пределах площади работ кимберлитовых тел, наличие алмазоносных объектов прогнозировать не представляется возможным из-за недостаточности статистических данных;

7. для получения более достоверных данных необходимо проведение буровых работ с изучением и опробованием терригенных коллекторов карбона на более обширной территории Важской площади;

8. окончательные более обоснованные выводы будут сделаны после окончания лабораторно-аналитических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Голубев Ю. К. [и др.] Методические рекомендации по поискам коренных месторождений алмазов на «закрытых» территориях. – М. : ЦНИГРИ, 2024. – С. 31–49.
2. Голубев Ю. К., Щербакова Т. Е., Колесникова Т. И. Особенности проведения шлихо-минералогических поисков алмазных месторождений в условиях «закрытых» территорий северо-запада Российской Федерации // Отечественная геология. – 2009. – № 2. – С. 11–22.
3. Голубев Ю. К. [и др.] Отчет по Государственному заданию: «Выполнение работ, связанных с оценкой перспективности выявления новых месторождений алмазов в пределах Зимнебережного района Архангельской области». – 2024. – С. 50.
4. Степанов В. П. [и др.] Отчет по региональному изучению Нижнеонежской и Лайской площадей с целью оценки перспектив алмазоносности нижнего течения реки Онега, в 2004–2008 годах» (Объект Региональный). – 2009. – С. 76–159, 312–333.

Столяров И. О.^{1,2} (stolyarov@tsnigri.ru)

¹ ЦНИГРИ, г. Москва; ² РУДН, г. Москва

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА СЕВЕРО-МОСТОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (СРЕДНИЙ УРАЛ): ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ФОРМАЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ

Дана оценка перспективности Северо-Мостовской площади (Средний Урал) на медно-порфировое оруденение. Установлена петролого-геохимическая аналогия алтынайского комплекса площади с рудоносным биргильдинско-томинским комплексом. Выделен комплекс поисковых признаков.

Ключевые слова: медно-порфировое оруденение, Средний Урал, алтынайский комплекс, редкоземельные элементы, аномалия европия, геолого-поисковые признаки.

Повышенный интерес недропользователей к Восточному Уралу, в частности к пенеуплененным и перекрытым осадочным чехлом участкам Уральского мегаантиклинория, связан с высоким потенциалом обнаружения скрытого медно-порфирового (молибден-медно-порфирового) оруденения. Большинство известных рудных объектов региона приурочено к Челябинско-Алапаевскому глубинному разлому. В его пределах, в Алапаевско-Теченской металлогенической зоне (МЗ), локализована Северо-Мостовская перспективная площадь с рядом слабо изученных рудопроявлений порфирового типа (Северо-Артемовское, Восточно-Артемовское и др.). Цель работы – дать палеотектоническую и формационную характеристику Северо-Мостовской площади, обосновать ее перспективность и выделить комплекс геолого-поисковых признаков.

Северо-Мостовская площадь расположена в северо-западном фланге Увельско-Еленовского вулканоплутонического пояса, в пределах Махневско-Артемовской медно-порфировой металлогенической зоны [1]. Основной рудоносный потенциал региона связывают с позднедевонско-раннекаменноугольной березняковской вулканоплутонической ассоциацией (ВПА) андезит-диоритового состава и, в особенности, с ее плутогенными членами – интрузивами биргильдинско-томинского диоритового комплекса (D_3-C_1). С этим комплексом генетически связаны промышленные месторождения (Томинское, Биргильдинское и др.) и многочисленные проявления медно-порфирового типа (Крайчиковское, Тахталымское и др.), что делает его ключевым маркером перспективности.

Предшествующими исследованиями выделен алтынайский гипабиссальный комплекс (D_{1-2}), представленный штоками диорит-порфиритов, кварцевых диорит-порфиритов и тоналит-порфиритов, с которыми пространственно и, предположительно, генетически связана прожилково-вкрапленная минерализация меди.

Проведенное исследование позволяет предварительно отождествить алтынайский комплекс как аналог продуктивного биргильдинско-томинского на основании петрохимии, тектономагматических обстановок и микроэлементного состава. Таким образом:

- породы обоих комплексов относятся к натриевой серии нормального ряда, образуют единые поля на вариационных диаграммах [2, 5, 6] (FeO / SiO_2 ; K_2O / Na_2O и др.);
- анализ распределения Nb, Ti, Zr в гранитоидах комплекса указывает на формирование в надсубдукционной обстановке активной континентальной окраины, характерной для аккреционно-коллизионных поясов [2];
- гранитоиды Артемовского массива (алтынайский комплекс) могут иметь схожую с южноуральскими порфировыми массивами металлогеническую специализацию. Ключевой особенностью является отчетливая отрицательная аномалия европия, свидетельствующая о высокой степени дифференциации магматического расплава, зрелости магматической системы и окислительных условиях на поздних рудообразующих этапах – признаках, благоприятных для формирования крупных порфировых месторождений;
- данные свидетельствуют о мантийном источнике (верхняя мантия или слэб-мантийный клин) с глубокой кристаллизационной дифференциацией [2].

На основе проведенного анализа для Северо-Мостовской площади выделен комплекс признаков медно-порфирового оруденения [3, 4]:

1. Формационный признак – приуроченность к вулканитам и субвулканитам средне-позднедевонской березняковской ВПА и сопряженным гипабиссальным интрузивам диорит-тоналитового состава (алтынайский / биргильдинско-томинский комплексы);

2. Структурный признак – контроль со стороны зон глубинных разломов (фланг Челябинско-Алапаевского разлома), наличие штокообразных интрузивных тел сложной формы;

3. Рудно-минералогический признак – присутствие прожилково-вкрапленной медной и молибден-медной минерализации;

4. Геохимический (интегральный) признак – отрицательная аномалия европия в спектрах РЗЭ, характерное распределение Nb-Ti-Zr, петрохимическое сходство с эталонными рудоносными комплексами [2, 6, 7];

5. Морфологический признак – предполагаемый неглубокий (верхнерудный) уровень эрозионного среза рудно-магматической системы, благоприятный для сохранения промышленного оруденения [6, 7].

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Северо-Мостовская площадь, расположенная в Алапаевско-Теченской МЗ, обладает высоким потенциалом для выявления медно-порфирового оруденения.

2. Продуктивной средой являются гипабиссальные интрузивы алтынайского комплекса (D_{1-2}), которые по совокупности петролого-геохимических характеристик являются формационными аналогами рудоносного биргильдинско-томинского комплекса (D_3-C_1).

3. Ключевым диагностическим критерием служит отрицательная аномалия европия в породах комплекса, указывающая на эволюционирование магматической системы [3].

4. Выделенный комплекс геолого-поисковых признаков (формационных, структурных, геохимических) обосновывает необходимость постановки дальнейших детальных поисково-оценочных работ на площади с применением комплекса геофизических и геохимических методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А. В., Мигачев И. Ф., Минина О. В. и др. Геология и минерагения Южного Урала. – Екатеринбург : УрО РАН, 2018. – 312 с.
2. Грабежев А. Г. Глубинное строение Уральской складчатой системы. – Екатеринбург : УрО РАН, 2012. – 198 с.
3. Кривцов А. И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. – М. : Недра, 1983. – 256 с.
4. Кривцов А. И., Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Меднопорфировые месторождения. – М. : ЦНИГРИ, 2001. – 232 с.
5. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. – Amsterdam : Elsevier, 1984. – 510 p.
6. Казаков И. И. и др. Отчет о результатах работ по объекту «ГДП-200 листа О-41-XX (Алапаевская площадь)» за 2014–2016 гг. – Екатеринбург, 2016.
7. Коровко А. В. и др. Отчет по поисковым работам по оценке промышленной значимости Каменско-Сафьяновской меднорудной зоны Восточно-Уральского прогиба. Отчет Исетской ГСП за 2001–2004 гг. – Верхняя Пышма, 2004.

Тихомиров З. Д. (zahar500092@yandex.ru), Маковская О. Ю. (o.i.makovskaia@urfu.ru)
УрФУ, г. Екатеринбург

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЩАВЕЛЕВОЙ КИСЛОТОЙ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД БУРУКТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Изучена возможность применения водных растворов щавелевой кислоты для выщелачивания окисленных никелевых руд Буруктальского месторождения. Данный растворитель позволяет селективно переводить в раствор никель и кобальт по сравнению с железом.

Ключевые слова: никель, выщелачивание, щавелевая кислота, комплексобразование, гидрометаллургия.

Сырьевая база никеля в Российской Федерации практически полностью освоена: свыше 90 % разведанных запасов закреплены за предприятиями-недропользователями, причем около двух третей из них уже разрабатываются. Ведущую роль в добыче играют сульфидные месторождения, где преобладают комплексные медно-никелевые руды; именно они покрывают всю внутреннюю потребность страны в никеле [1].

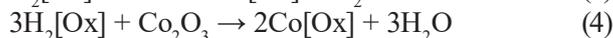
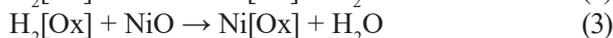
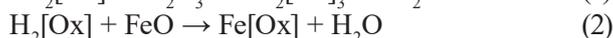
Важным резервом никелевого сырья выступают окисленные никелевые руды Уральского региона. Однако применявшаяся до недавних пор технология их переработки – плавка с получением штейна или ферроникеля – отличалась низкой экономической эффективностью [4, 5]. Это стимулирует поиск альтернативных подходов, в частности, гидрометаллургических методов переработки [2, 3].

Химический анализ руд Буруктальского месторождения выявил две их технологические разновидности: железистый тип (содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$) и магнезиальный тип (содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 20\%$).

Фазовый состав руд характеризуется разнообразием минеральных форм никеля: он присутствует как в силикатной, так и в оксидной форме. Никель изоморфно входит в основные железосодержащие фазы – гетит или гидратированный оксид железа. Кроме никеля, в рудах содержится кобальт, который в основном концентрируется в марганцевых минералах – прежде всего в охрах и обохренных серпентинитах. Распределение металла отличается тонкодисперсным и аморфно-кристаллическим состоянием, что определяет его вхождение в различные минеральные фазы.

В связи с этим, окисленные никелевые руды, чаще всего, небогатимы, поэтому приходится вовлекать в переработку всю массу руды. С этой точки зрения перспективными являются гидрометаллургические процессы, имеющие более низкие капитальные затраты. Выщелачивание при атмосферном давлении показывает высокую эффективность. В промышленной практике чаще всего применяют минеральные кислоты, причем лидирующее положение занимает серная кислота благодаря доступности и невысокой стоимости [8]. В то же время органические кислоты обладают рядом преимуществ: они экологичнее и демонстрируют повышенную селективность к цветным металлам за счет комплексообразования. Для переработки окисленных никелевых руд успешно используют щавелевую, лимонную и уксусную кислоты [6, 7, 9, 10].

Щавелевая кислота ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) – двухосновная карбоновая кислота, диссоциирующая в водном растворе ступенчато в два этапа. Константы диссоциации $K_1=5,6 \times 10^{-2}$, $K_2=5,4 \times 10^{-5}$. Для расчета термодинамических показателей предположим, что химизм взаимодействия щавелевой кислоты с основными компонентами руды описывают реакции (1–4):



С помощью программы HSC Chemistry для вышеперечисленных реакций были построены зависимости изменения энергии Гиббса от температуры. ΔG реакции (1) и (4) практически во всем исследованном диапазоне температур (0–100 °С) имеют положительное значение, в то время как остальные реакции имеют $\Delta G < 0$. Из чего следует вывод, что при проведении процесса выщелачивания переход в раствор ионов Fe(III) и Co(III) маловероятен.

Диаграммы распределения ионных форм металлов в растворе щавелевой кислоты, построенные с помощью программ HYDRA и MEDUSA (рис. 1), подтверждают, что комплексообразование с никелем начинается при $\text{pH} > 2$. Механизм взаимодействия щавелевой кислоты с ионами металлов можно описать следующим образом: диссоциация щавелевой кислоты \rightarrow взаимодействие протона с оксидом металла \rightarrow комплексообразование. Преобладающей ионной формой в диапазоне $\text{pH} 2\text{--}7$ является $\text{Ni}(\text{Ox})$. Комплексообразование с ионами Co(II), Co(III), Fe(II) и Fe(III) наблюдается при $\text{pH} > 7$.

Для экспериментальной проверки было проведено выщелачивание железистой руды Буруктальского месторождения следующего химического состава (%): 1,22 Ni; 0,05 Co; 22 Fe_2O_3 ; 0,1 Cu; 12,67 MgO. Руду измельчали до крупности -0,074 мм.

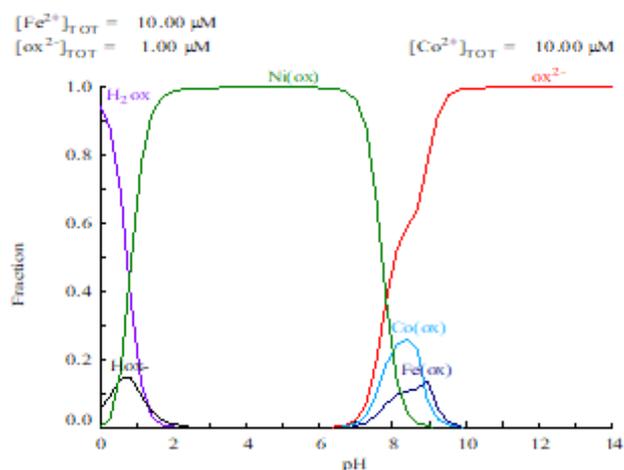


Рис. 1. Распределение ионных форм никеля, кобальта и железа в растворе щавелевой кислоты в зависимости от pH



Рис. 2. Внешний вид оксалатов металлов

Навеску руды массой 10 г выщелачивали в растворе щавелевой кислоты концентрацией 0,8М, Ж : Т = 5 : 1 при температуре 80 °С с периодическим перемешиванием. Концентрацию никеля, железа и кобальта в растворах выщелачивания определяли методом ААС.

В результате экспериментов был получен раствор следующего состава, г/дм³: 0,5 Ni, 12,88 Fe. Извлечение никеля составило 21 %, соответственно, а извлечение железа 14 %.

Однако оксалаты металлов имеют низкую растворимость в водных растворах, поэтому после выщелачивания наблюдается их осаждение (рис. 2).

По данным рентгено-флуоресцентного анализа осадок содержит 51,2 % Fe и 41,41 % Ni.

Таким образом, использование щавелевой кислоты позволяет извлекать цветные металлы из низкосортных окисленных никелевых руд, попутно концентрируя их в богатые и компактные осадки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. – 2023. – 640 с.
2. Калашникова М. И., Шнеерсон Я. М., Салтыков П. М. и др. Гидрометаллургическая переработка окисленных никелевых руд // Цветные металлы. – 2003. – № 12. – С. 22–27.
3. Резник И. Д., Ермаков Г. П., Тарасов А. В. Основные направления развития технологии переработки окисленных никелевых руд // Цветные металлы. – 2003. – № 3. – С. 22–27.
4. Резник И. Д., Ермаков Г. П., Шнеерсон Я. М. Никель : в 3 т. Т. 2. – М. : Наука и технологии. – 2001. – 468 с.
5. Федоров А. Н., Комков А. А., Бруэк В. Н. и др. Освоение процесса Ванюкова для переработки окисленных никелевых руд на Южно-Уральском никелевом комбинате // Цветные металлы. – 2007. – № 12. – С. 33–37.
6. Aryanhi F., R. Tri Jayanti. Enhancing the Nickel Recovery of Morowali Nickel Laterite in Atmospheric Citric Acid Leaching // Proc. of the 2nd Faculty of Industrial Technology International Congress International Conference, Bandung, Indonesia, January 28–30, 2020. – P. 38–42.
7. Hosseini Nasab et al. Dissolution of Nickel and Cobalt from Iron-Rich Laterite Ores Using Different Organic Acids // Journal of Mining & Environment. – 2020. – V. 11, № 3. – P. 779–797.
8. McDonald R., Whittington B. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review: Part I. Sulphuric acid technologies // Hydrometallurgy. – 2008. – V. 91. – P. 35–55.
9. Tang J. A., Valix M. Leaching of Low Grade Limonite and Nontronite Ores by Fungi Metabolic Acids // Minerals Engineering. – 2006. – V. 19. – P. 1274–1279.
10. Tzeferis P. G., Agatzini-Leonardou S. Leaching of Nickel and Iron from Greek Non-Sulphide Nickeliferous Ores by Organic Acids // Hydrometallurgy. – 1994. – V. 36. – P. 345–360.

ОПИСАНИЕ ВТОРИЧНЫХ КВАРЦИТОВ И ИХ ФАЦИЙ НА УНГУРЛИКАНСКОЙ ПЛОЩАДИ

В данной работе рассмотрены вторичные кварциты, сформированные в результате интенсивного гидротермального выноса породообразующих компонентов из магматических и вулканогенно-осадочных пород. Метасоматические процессы обусловили глубокую переработку минерального состава и структурно-текстурных особенностей исходных пород. Минеральный состав вторичных кварцитов ограничен несколькими основными минералами, среди которых ведущими являются серицит, каолинит, диаспор и кварц. В зависимости от преобладающего минерала выделены серицитовая, каолинитовая, диаспоровая и монокварцевая фации, отражающие различные физико-химические условия метасоматизма. Серицитовая фация является наиболее распространенной и служит фоном для развития других разновидностей вторичных кварцитов. Каолинитовая и диаспоровая фации имеют ограниченное распространение, тогда как монокварцевая фация приурочена к близповерхностным условиям и характеризуется высоким содержанием кварца. Минеральные фации вторичных кварцитов могут использоваться в качестве индикаторов условий гидротермального метасоматизма.

Ключевые слова: Унгурликанская площадь, гидротермальные процессы, фации, минеральный состав, метасоматизм.

Унгурликанская площадь расположена на северо-восточных склонах Кураминских гор в пределах Алмалыкского района Ташкентской области в восточной части Узбекистана. В геологическом отношении площадь приурочена к Алмалыкскому рудному узлу Алмалыкского рудного поля, характеризующегося развитием медно-порфирового и медно-молибденового оруденения, связанного с интрузивными образованиями палеозойского возраста. Унгурликанская площадь специализирована преимущественно на медно-молибденовое оруденение и рассматривается как перспективный участок в пределах Алмалыкского рудного поля.

Вторичные кварциты Унгурликанской площади представляют собой светлоокрашенные (белые, светло-серые) пористые метасоматические породы со слабо выраженной первичной структурой. Их формирование связано с интенсивным выносом практически всех породообразующих компонентов из исходных магматических и вулканогенно-осадочных пород под воздействием гидротермальных растворов. В результате метасоматических процессов происходит глубокая переработка первичного минерального состава, а также текстурно-структурных особенностей протолита [3].

Минеральный состав вторичных кварцитов, как правило, ограничен двумя–четырьмя основными минералами, неравномерное распределение и изменчивость содержания которых обуславливают значительное разнообразие их разновидностей. Основными минералами, определяющими фаціальную принадлежность вторичных кварцитов, являются серицит, каолинит, диаспор и кварц. Согласно данным специализированной литературы, каждая из минеральных фаций формируется в строго определенных интервалах температуры, кислотности и состава гидротермальных растворов, что позволяет использовать фации в качестве индикаторов условий метасоматизма [2].

На основании ведущего минерала во вторичных кварцитах выделены следующие основные минеральные фации: серицитовая, каолинитовая, диаспоровая и монокварцевая.

Метасоматиты серицитовой фации являются наиболее широко распространенными среди вторичных кварцитов и по площади распространения уступают лишь пропилитам. Они формируют своеобразный «фон», на котором развиваются другие фации, включая высокоглиноземистые разновидности. Серицитовая фация развивается по породам различного состава, генезиса и стратиграфического положения – эффузивным, субвулканическим и интрузивным.

В процессе серицитизации реликтовые структуры исходных пород, хорошо сохраняющиеся в пропилитах, как правило, разрушаются [1]. Породы приобретают лепидобластовую или гранолепидобластовую структуру. Основными минералами серицитовой фации являются серицит

и кварц; в подчиненном количестве присутствуют гидроокислы железа. Реже встречаются ярозит, альбит, барит и другие минералы. Из акцессорных минералов исходных пород апатит замещается полностью, циркон – частично, а сфен преобразуется в лейкоксен.

Соотношение серицита и кварца существенно варьирует в зависимости от состава протолита. Так, в андезитовых порфиритах часто наблюдается преобладание серицита над кварцем, что придает породам плотный, массивный облик и свидетельствует о полной метасоматической переработке. Микроскопически для таких пород характерна бластопорфировая структура с гранолепидобластовой основной массой. Серицит обычно встречается в виде рассеянных чешуек, микроскопических скоплений в основной массе, а также в виде агрегатных псевдоморфоз по вкрапленникам полевых шпатов, которые почти всегда содержат примесь вторичного кварца.

В андезито-дацитовых порфирах кварц и серицит часто образуют обособленные скопления и находятся в различных пропорциях. Редкие реликтовые кристаллы альбита, как правило, пелитизированы. В отдельных случаях отмечается замещение серицита свежими кристаллами альбита, что интерпретируется как результат более позднего гидротермального этапа.

Наличие карбонатов в серицитовых метасоматитах характерно для участков с повышенной долей ксенолитов известняков. В таких условиях минеральные ассоциации приближаются к классическим березитам, однако по геологической позиции отнесение их к данной формации является дискуссионным. Вероятнее всего, кальцит, как и эпидот, образующий редкие эпидот-кварцевые прожилки, относится к наложенным процессам более позднего возраста.

Каолинитовые метасоматиты тесно связаны с серицитовой фацией и, как правило, приурочены к зонам ее развития. Основными минералами каолинитовой фации являются каолинит, серицит, кварц и гидроокислы железа; реже отмечается присутствие ярозита.

Под микроскопом каолинит чаще всего представлен мелкочешуйчатым землистым агрегатом, иногда формирующим радиально-лучистые сростки. Крупные кристаллы каолинита с четко выраженной спайностью встречаются редко. В ряде шлифов наблюдается развитие каолинита по серициту, однако более характерны совместные каолинит-серицит-кварцевые агрегаты с гранолепидобластовой структурой. В отдельных случаях кварц выделяется в виде самостоятельных обособлений размером до нескольких миллиметров.

Диаспоровые вторичные кварциты имеют ограниченное распространение и обычно формируют небольшие линзообразные тела или участки внутри каолинитовых метасоматитов. Микроскопически они практически неотличимы от каолинитовой фации и уверенно диагностируются главным образом по данным микроскопических исследований.

Породы характеризуются белым или сероватым цветом и сахаровидной текстурой. Диаспор образует равномерную вкрапленность, а также нитевидные неправильные жилки, мелкие гнезда и линзы. Постоянными минералами диаспоровой фации являются кварц, диаспор и серицит. Диаспор чаще всего встречается в виде рассеянных микроскопических скоплений, реже образует порфиробласты по вкрапленникам исходных пород.

Монокварциты относятся к близповерхностной фации вторичных кварцитов и благодаря высокой устойчивости кварца в рельефе часто выделяются в виде крутых уступов на фоне вмещающих пород. Они образуют небольшие пологозалегающие, пластообразные и разрозненные тела.

Ведущим минералом монокварцевой фации является кварц, составляющий от 60 до 90 % объема породы. Остальная часть представлена серицит-альбитовыми агрегатами. Породы характеризуются гранобластовой структурой и практически полной метасоматической переработкой исходного гранит-порфирированного или вулканического протолита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зотов М. В. Метасоматизм в районах гранитных и метаморфических комплексов // Геологические исследования. – 2007. – № 12. – С. 56–72.
2. Ковальчук В. Н., Лещенко О. А. Пропилитовые метасоматиты: минеральный состав и особенности формирования // Журнал минералогии. – 2009. – Т. 53. – С. 120–134.
3. Кузнецов Н. С. Природа и особенности пропилитовых фаций в метасоматитах // Вестник Московского университета. Геология. – 2015. – № 8. – С. 85–93.

Хабибулина Р. Э. (raisa.khabibulina@urfu.ru), Лобанов В. Г. (lobanov-vl@yandex.ru),
Колмачихина Э. Б. (e.b.khazieva@urfu.ru), Колмачихина О. Б. (o.b.kolmachikhina@urfu.ru)
УрФУ, г. Екатеринбург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИХЛОРИЗОЦИАНУРАТА НАТРИЯ И ТРИХЛОРИЗОЦИАНУРОВОЙ КИСЛОТЫ В ПРОЦЕССАХ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

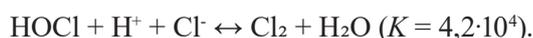
Представлены результаты исследования растворения золота в солянокислых хлоридных растворах при использовании твердых источников активного хлора – дихлоризоцианурата натрия и трихлоризоциануровой кислоты. Установлены основные формы активного хлора и режимные ограничения процесса.

Ключевые слова: золото, выщелачивание, активный хлор, дихлоризоцианурат натрия, трихлоризоциануровая кислота, соляная кислота.

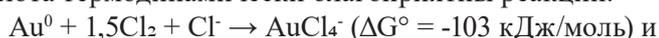
В современных условиях возрастает потребность в разработке безцианидных технологий переработки золотосодержащего сырья, отвечающих требованиям промышленной и экологической безопасности. Одним из перспективных направлений является использование в качестве твердых источников активного хлора хлорпроизводных изоциануровой кислоты – дихлоризоцианурата натрия ($\text{NaC}_3\text{N}_3\text{O}_3\text{Cl}_2$, ДЦН) и трихлоризоциануровой кислоты ($\text{C}_3\text{N}_3\text{O}_3\text{Cl}_3$, ТЦК) [1]. Оба реагента при гидролизе в кислой среде образуют хлорноватистую кислоту (HOCl), которая в присутствии хлорид-ионов превращается в молекулярный хлор (Cl_2) – основной окислитель золота.

Растворение золота изучали методом вращающегося диска: образец золота (99,9 %) диаметром 10 мм помещали в 50 см³ заранее приготовленного раствора; варьировали скорость вращения (n) 100–500 об/мин, концентрации ДЦН и ТЦК 1–10 г/дм³, концентрацию HCl 0–30 г/дм³ и температуру 25–80 °С. ОВП измеряли платиновым редокс-электродом ЭРП-105 с использованием рН-метра/иономера «ИТАН» (ООО «НПП Томьяналит», Россия); активный хлор определяли йодометрическим титрованием по ГОСТ 18190-72.

Термодинамический анализ показал, что гидролиз ДЦН и ТЦК приводит к образованию HOCl , а в сильноокислой хлоридной среде ($\text{pH} < 2$) HOCl быстро перераспределяется по равновесию:



Поэтому при $C_{\text{HCl}} > 0,2$ М основным окислителем выступает растворенный молекулярный хлор. Для окисления золота термодинамически благоприятны реакции:



Показано, что скорость растворения золота линейно зависит от концентрации активного хлора, причем отношение скоростей растворения золота $v_{\text{Au(ТЦК)}} / v_{\text{Au(ДЦН)}} \approx 1,6$ соответствует соотношению содержания активного хлора в молекулах реагентов (3 : 2) (рисунок). Это подтверждает, что именно концентрация активного хлора, а не тип носителя определяет кинетику процесса.

Установлено, что процесс протекает в смешанном режиме: частные порядки реакций растворения золота по концентрации окислителя составили 0,72 (ТЦК) и 0,77 (ДЦН), по HCl – 0,65 и 0,67 соответственно. Частные порядки по скорости вращения диска – 0,15 (ТЦК) и 0,33 (ДЦН), что указывает на значительный вклад диффузионного контроля, особенно для ТЦК. Кажущиеся энергии активации низкие (0,93–5,8 кДж/моль), что связано с термической нестабильностью молекулярного хлора при повышении температуры выше 30–40 °С.

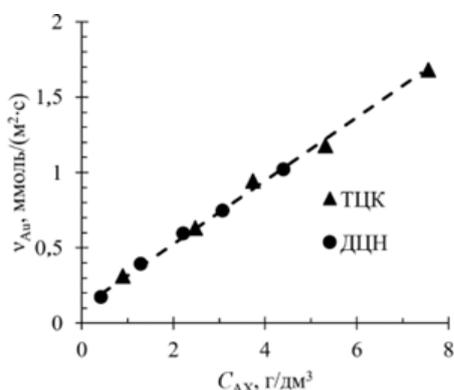


Рисунок. Влияние концентрации общего активного хлора (АХ) на скорость растворения золота в присутствии ДЦН (●) и ТЦК (▲) ($T = 25$ °С, $C_{\text{HCl}} = 15$ г/дм³, $n = 300$ об/мин)

Отмечены принципиальные различия в поведении реагентов: ДЦН, будучи ионной солью, быстро растворяется в воде (30 г/100 см³), но в кислой среде пассивируется пленкой малорастворимой дихлоризоциануровой кислоты. ТЦК, напротив, имеет низкую растворимость (1,2 г/100 см³), но гидролизуется без промежуточных стадий, обеспечивая более стабильное выделение HOCl/Cl_2 . В солянокислой среде ($\text{pH} < 2$) оба реагента формируют сопоставимые окислительные потенциалы (≈ 1370 мВ), достаточные для эффективного растворения золота до $[\text{AuCl}_4]$.

Результаты подтверждают высокий потенциал ДЦН и ТЦК как безопасных и эффективных альтернатив традиционным хлорирующим агентам. Предложенные реагенты позволяют минимизировать аварийные риски, связанные с использованием газообразного хлора, и обеспечивают гибкий подбор параметров выщелачивания под конкретный тип сырья.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00787, <https://rscf.ru/project/25-29-00787/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niu H., Yang H., Tong L. Research on gold leaching of carbonaceous pressure-oxidized gold ore via a highly effective, green and low toxic agent trichloroisocyanuric acid // Journal of Cleaner Production. – 2023. – V. 419. – 138062.

Чернов Б. Ю. (chernov@tsnigri.ru)

ЦНИГРИ, г. Москва

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛОДЕТЕКТОРНОГО ОПРОБОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ СУЛЬФИДОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД С МЕЛКИМ И ТОНКИМ ЗОЛОТОМ НА ПРИМЕРЕ УРЮМСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Представлены предварительные результаты апробации метода металлодетекторного опробования для целевого отбора сульфидсодержащих проб при маршрутных поисковых работах. Метод основан на регистрации электромагнитного отклика от сульфидной (пирротин-халькопиритовой) минерализации, пространственно сопряженной с вкрапленным золотом. Полевые испытания на объектах Урюмского рудного узла подтвердили возможность выявления сульфидных обломков под слоем дерна мощностью до 20 см. Метод рекомендован для повышения репрезентативности опробования на задернованных участках, а также в техногенных отвалах.

Ключевые слова: металлодетекторное опробование, поиски золота, сульфидная минерализация.

На ранних стадиях поисков в условиях Забайкалья с развитым почвенно-растительным покровом существует высокий риск пропуска выходов рудной минерализации при визуальном наблюдении. Традиционное маршрутное опробование часто дает «слепые» пробы, пропуская сульфидосодержащий материал – прямой поисковый признак золото-сульфидно-кварцевой формации. Цель работы – оценить принципиальную возможность применения металлодетектора для целенаправленного обнаружения и отбора сульфидных проб в различных ландшафтных условиях.

Работы проводились на объектах Урюмского рудного узла, для которого характерно золото-сульфидно-кварцевое оруденение в метаморфических толщах. Целевая сульфидная ассоциация включает пирротин, халькопирит, пирит и арсенопирит (рис. 1, 2). Золото тонковкрапленное (< 50 мкм). Для обследования использовался высокочастотный металлодетектор XP DEUS. В ходе настройки было установлено, что стандартные высокие частоты (около 17,6 кГц) эффективны для регистрации массивных сульфидных пород. Оптимальный отклик был достигнут в диапазоне средних частот 17,6 кГц, чувствительных к ферромагнитным свойствам пирротина. На частотах 4–6 кГц металлодетектор не видит сульфидные породы. Профильное обследование выполнено на задернованных участках с разной мощностью ПРС, а также в техногенных отвалах.



Рис. 1. Пирротин с халькопиритом в образце (слева) и в аншлифе (справа)

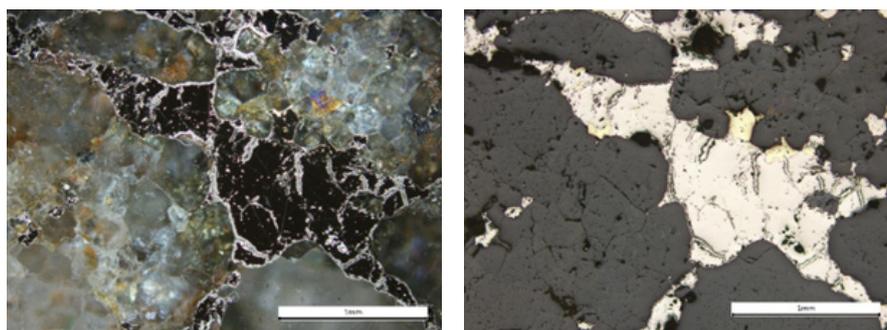


Рис. 2. Пирротин с халькопиритом в шлифе: в режиме темного поля (DF) (слева) и при скрещенных николях (справа)



Рис. 3. Слабо окатанный дендрит серебра (вид с двух сторон), найденный в ходе работ. Забайкальский край

лах и на речных террасах. Все зарегистрированные аномальные сигналы документировались, в их эпицентрах отбирались пробы породы ($n = 5$). Параллельно на тех же участках проводился классический визуальный отбор проб «на глаз». Все пробы подвергнуты минералогическому анализу в аншлифах и шлихах.

Выявление сульфидного материала. На всех участках с ПРС менее 20–30 см детектор в настроенном режиме уверенно регистрировал сигнал от сульфидных обломков, что позволило выполнить их целенаправленный отбор (5 проб). При визуальном осмотре эти обломки в условиях задрюченности были неочевидны.

Влияние ландшафтных условий. Эффективность метода резко снижается с увеличением мощности перекрывающих отложений. На заболоченных участках с мощностью торфа > 50 см сигнал от обломков не регистрировался. В техногенных отвалах и на террасах, где обломочный материал сосредоточен у поверхности, метод показал максимальную перспективность.

Качественная оценка связи с золотом. Данные шлихового опробования смежных участков показывают, что в зонах развития пирротин-сульфидной минерализации количество знаков золота в шлихах (8–12) на порядок выше, чем за их пределами (1–3 знака).

В ходе работ был обнаружен слабоокатанный дендрит серебра (рис. 3), что подтверждает чувствительность метода к металлическим объектам и открывает перспективы для его при-

менения в отвалах для поиска пропущенного крупного золота, с учетом того, что техногенные отвалы региона могут содержать до 1,79 г/т золота [1].

Правильно настроенный высокочастотный металлодетектор может использоваться как вспомогательный инструмент для целевого обнаружения сульфидосодержащих обломков, скрытых под тонким слоем ПРС ($\leq 20\text{--}30$ см), что повышает репрезентативность геохимического опробования. Эффективность метода критически зависит от геоморфологических условий. Он перспективен на участках с маломощным элювием, террасах и особенно в техногенных отвалах, являющихся потенциальным источником вторичного сырья [1], но неприменим на заболоченных территориях с мощным торфяным слоем. Для количественного подтверждения корреляции между сигналом детектора и содержаниями золота необходимы дальнейшие исследования с увеличенным объемом отбора проб и их химическим анализом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Б. Н., Эпова Е. С., Манзырев Д. В. Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в Восточном Забайкалье // География и природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С. 103–111. – DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(103-111)

Чудинов П. Л. (Paulenotov@gmail.com)

ООО «МФЦ Полюс», г. Красноярск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЭВОТИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО РАЙОНА (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ШИТ, ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)

Приводятся результаты прогнозирования минерализации Эвотинского золоторудного района с применением искусственных нейронных сетей, основанных на корреляционных взаимосвязях между геохимической «рудной» ассоциацией и геофизическими данными (аномальным магнитным полем и его производными).

Ключевые слова: машинное обучение, золото, геохимия, геофизика.

Формирование эффективной комплексной геолого-геофизической модели участка имеет ключевое значение для успешного проведения поисковых работ в условиях неоднородной геологической среды. Сложное геологическое строение поисковой площади часто приводит к формированию серий трудно интерпретируемых геохимических кластеров в генеральной совокупности геохимических данных. Такое гетерогенное распределение проблематично аппроксимировать с помощью традиционных методов интерпретации геохимических данных. Как следствие, эффективное обнаружение геохимических аномалий становится трудоемкой и не всегда выполнимой задачей. Для ее решения предложено использование алгоритма прогноза аномалий, на основе геолого-геофизической модели площади, способного эффективно и точно кластеризовать геохимические данные и выявлять участки, перспективные на наличие золоторудной минерализации [9–11]. В работе приводятся результаты использования искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогноза золоторудной минерализации Эвотинского золоторудного района Алдано-Станового шита.

Эвотинский золоторудный район характеризуется многоярусным геологическим строением. Нижний ярус (кристаллический фундамент) сложен архейскими и раннепротерозойскими гнейсами и кристаллосланцами, смятыми в складки и рассеченными многочисленными разнонаправленными зонами разломов: Нимнырская, Кеннейская, Кенней-Хаирская и др. Породы интенсивно гранитизированы и прорваны интрузиями субщелочных гранитоидов и базитов (габбро-нориты и габбро-диориты) протерозойского возраста. Верхний ярус (платформенный чехол) образован венд-нижнекембрийскими карбонатными породами. Мезозойский щелочной и умеренно щелочной интрузивный магматизм в пределах Эвотинского рудного района представлен небольшими массивами (Медведевский, Таежный, Михайловский и др.), крупным

Эвотинским плутоном и дайками сиенит-порфиров, бостонитов и вогезитов [2, 3, 5]. Геохимическая спецификация района довольно разнообразна. Широкое развитие в рудных геохимических ассоциациях имеют металлоидные элементы (As, Se, Te, Sb, Bi), обладающие близкими к благородным металлам физико-химическими свойствами, часто формирующие с ними разнообразные твердые растворы и интерметаллические соединения. Для ключевого золоторудного объекта района – месторождения им. П. Пинигина – выделяется ярко выраженная Au-Bi-Te специализация [4, 6]. Необходимо отметить приуроченность проявлений золота к области переменного магнитного поля слабой интенсивности, к участкам перехода от положительных к отрицательным аномалиям, пониженные значения гравитационного и магнитного полей для золоторудных полей [1, 3].

Материалом исследования являются результаты анализа 1889 геохимических проб, отобранных по вторичным ореолам рассеяния по сети 200×200 в пределах участка Амутканский, а также данные аэрогеофизической съемки, включающие карту аномального магнитного поля и ее производные (карта локальной составляющей аномального магнитного поля, карта вертикальной производной аномального магнитного поля, карта полного горизонтального градиента аномального магнитного поля). На основе данных материалов была сформирована геолого-геофизическая модель площади, явившаяся основой для использования алгоритмов ИНС.

Предварительно для геохимических данных значения результатов всех измерений приведены к единой единице измерения – ppm (г/т). Из выборок удалены химические элементы, для которых количество проб со значениями НПО (нижний порог обнаружения) не является представительным. В сформированных выборках были заменены значения НПО на 0,5 НПО, а ВПО (верхний порог обнаружения) на 1,05 ВПО, исключены ураганные значения. Для дальнейших исследований определялся характер распределения элементов (log-нормальный или нормальный). По результатам для химических элементов с log-нормальным законом распределения значения логарифмировались. Значения в выборке нормализовались методом Z-нормализации для приведения переменных к единому масштабу с нулевым средним и единичной дисперсией в целях повторного выявления ураганных значений и уменьшения дисперсии элементов в выборке. Для дальнейшей предобработки использованы методы статистической обработки геохимических и геофизических данных, а также методы многомерной статистики (корреляционный, кластерный, факторный (метод главных компонент) анализы).

В результате использования различных методов многомерной статистики были выявлены корреляционные связи геохимических полей и данных геофизической съемки, связи минеральных ассоциаций, связанных с золотом, установлены корреляции между золоторудной минерализацией и значениями аномального магнитного поля и его производных. Сформирован «рудный» фактор, отражающий золоторудную минерализацию площади. Основные нагрузки «рудного» фактора: Sb 0,75 – As 0,52 – Au 0,49 – W 0,45 – Te 0,37 – Ag 0,26, при корреляции фактора со значениями: аномального магнитного поля – 0,17, локальной составляющей аномального магнитного поля – 0,30, вертикальной производной аномального магнитного поля – 0,14, полного горизонтального градиента аномального магнитного поля – 0,24.

Значения «рудного» фактора являются целевыми, а данные аэромагнитной съемки (карта аномального магнитного поля, карта локальной составляющей аномального магнитного поля, карта вертикальной производной аномального магнитного поля, карта полного горизонтального градиента аномального магнитного поля) – предикторами (переменными).

Алгоритм нейронных сетей выбран как один из наиболее подходящих (наравне с методом опорных векторов) для интерпретации геохимических данных [8]. Модель построена на основе архитектуры многослойного перцептрона с одним скрытым слоем. На скрытом слое применялась линейная функция активации. Поскольку прогнозируемая (зависимая) переменная является непрерывной, задача была определена как регрессионная. Для обучения алгоритма искусственных нейронных сетей использованы результаты геохимического опробования 454 проб и значения аэрогеофизической съемки в каждой из точек наблюдения.

Распределение данных при формировании модели машинного обучения выполнено следующим образом: первоначальная выборка из 454 проб случайным образом делилась на три подвыборки: тренировочная (64 %), валидационная (16 %), тестовая (20 %). На тренировочной

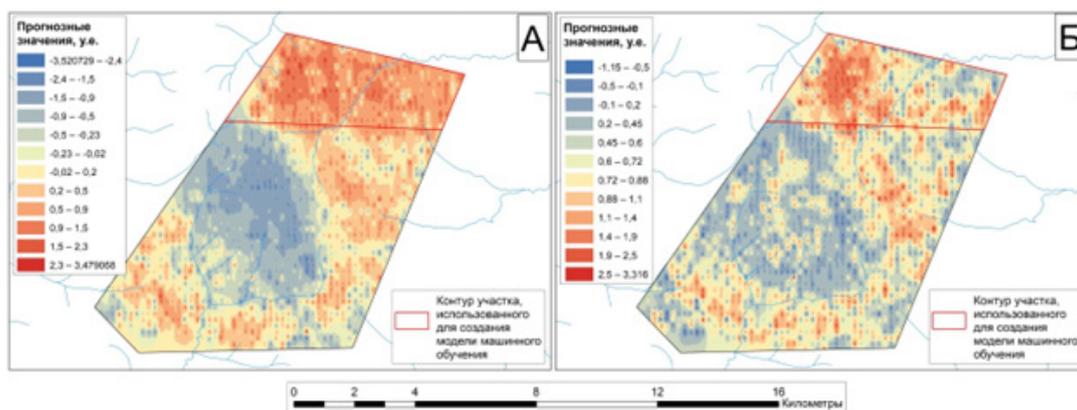


Рисунок. Схема аномальных значений рудного фактора (А) и прогнозная схема (Б) на участке Амутканский

выборке модель обучалась. На валидационной выборке происходила настройка параметров и проверка качества работы модели, предотвращение переобучения и выбор наилучшей модели. На тестовой выборке осуществляется финальная оценка работы модели, ее качества и производительности.

Для верификации и проверки качества работы созданной модели были спрогнозированы значения рудного фактора для всей Амутканской площади, по 454 пробам, участвовавшим в обучении модели, и по 1435 результатам, ранее не использованным ни в одной из выборок, задействованных при обучении алгоритма. Результаты исследования, представленные в виде схемы аномальных значений рудного фактора и прогнозная схема, основанная на результатах работы ИНС, демонстрируют значимую степень сходимости. Полученные значения являются интегральным показателем перспективности и позволяют ранжировать площадь по степени вероятности выявления «рудной» геохимической ассоциации во вторичных ореолах рассеяния. Прогнозная схема корректно отражает основные участки распространения золоторудной минерализации и может быть использована при детализации поисковых работ (см. рисунок).

Результаты исследования отражают наличие устойчивой связи между аномальным магнитным полем, его производными (вертикальная производная, горизонтальный градиент и др.) и золоторудной минерализацией, выраженной геохимической «рудной» ассоциацией Sb-As-Au-W-Te-Ag. Значимая сходимость прогнозная схема ИНС с фактическими геохимическими аномалиями свидетельствует о применимости метода при условии наличия высококачественных геохимических и геофизических данных и установленных корреляционных взаимосвязях между ними.

Выполненное исследование является примером интеграции и комплексного использования традиционных и современных методологий, повышающих эффективность поисковых работ в сложных геологических условиях. Использование прогностических возможностей алгоритмов машинного обучения, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяет выделять участки золоторудной минерализации во вторичных ореолах рассеяния при минимальных объемах поисковых геохимических работ.

Перспективы развития могут включать расширение ансамбля моделей (XGBoost + CNN + ИНС) с пространственной кросс-валидацией, интеграцию спектральных данных космических снимков Landsat ETM+, Landsat 8-9 OLI/TIRS, ASTER [7] и внедрение 3D-интерполяции (Ordinary Kriging 3D) для вертикальной экстраполяции минерализации на глубину.

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Полюс Алдан».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булин И. К., Ициксон М. И. Некоторые особенности металлогении областей активизации Алданского щита и Монголо-Охотской складчатой системы и их отражение в глубинном геологическом строении / Проблемы металлогении областей тектономагматической активизации. – М. : Наука, 1975. – С. 276–286.

2. Ветлужских В. Г., Казанский В. И., Кочетков А. Я. Месторождения золота Центрального Алдана // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44, № 6. – С. 467–499.
3. Кочетков А. Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 7. – С. 850–864.
4. Кравченко А. А., Смелов А. П., Березкин В. И., Попов Н. В., Добрецов В. Н. Минералогия и геохимия золоторудных двупироксеновых кристаллических сланцев Алданского щита (на примере месторождения им. П. Пинигина) // Отечественная геология. – 2008. – № 5. – С. 14–24.
5. Максимов Е. П., Уютов В. И., Никитин В. М. Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдан-Становой щит, Россия) // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29, № 2. – С. 3–26.
6. Округин А. В., Журавлев А. И., Кравченко А. А. Физико-химические условия образования Au-Bi-Te минерализации месторождения им. П. Пинигина в палеопротерозойских метабазитах Алданского щита : материалы XV Международной конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». – Якутск, 2025. – С. 142–147.
7. Чудинов П. Л., Маракулин Д. А., Фридовский В. Ю. Применение спектрального анализа космоснимков с целью локализации участков развития метасоматических пород в пределах Эвотинского рудного района, Алдано-Становой щит : материалы XV Международной конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». – 2025. – С. 274–278.
8. Чудинов П. Л., Фридовский В. Ю. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования золоторудной минерализации Верхнеамгинского щелочного массива, Алдано-Становой щит // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – 30(2). – С. 205–219.
9. Changjie C., Xiuliang W., Fan Y., Miao X., Bingli L., Yunhui K., Cheng L., Zhongli Z. Attention-driven graph convolutional neural networks for mineral prospectivity mapping // Ore Geology Reviews. – 2025. – 180:106554. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106554
10. Hujun H., Haolei Z., Xingke Y., Weiwei Z., Jinghao W. Mineral prospectivity prediction based on convolutional neural network and ensemble learning // Scientific Reports. – 2024. – 14:22654. DOI: 10.1038/s41598-024-73357-0
11. Zhang E., Nwaila G., Bourdeu J., Ghorbani Y., Carranza E. Deriving big geochemical data from high-resolution remote sensing data via machine learning: Application to a tailing storage facility in the Witwatersrand goldfields // Artificial Intelligence in Geosciences. – 2023. – V. 4. – P. 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.aiig.2023.01.005>

Шамсутдинов М. Д.¹ (shamsutdinov.michail@yandex.ru),

Петров С. В.² (petrov64@gmail.com)

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва; ² СПбГУ, г. Санкт-Петербург

ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОНОСНОСТИ КВАРКУШСКОЙ ПЛОЩАДИ (ЗАПАДНЫЙ СКЛОН УРАЛА, ПЕРМСКИЙ КРАЙ)

В работе изучены морфология и состав россыпного золота трех россыпей Кваркушского района (149 зерен). Большая часть зерен слабоокатана, высокопробна, содержит минеральные включения. Предположительно, коренными источниками являются березит-лиственитовые метасоматиты и кварцевые жилы малосульфидного типа.

Ключевые слова: Северный Урал, западный склон Урала, Кваркушский район, россыпное золото, типоморфизм золота, минеральные включения в золоте, прогноз коренных источников.

Кваркушская площадь располагается на Западном склоне Урала, в юго-восточной части листа Р-40-XXV. Географически она расположена в Красновишерском районе Пермского края, основными водными потоками являются река Улс (левый приток реки Вишеры) и ее притоки – реки Кутим, Саменка, Сурья, Жегалан, Молмыс и др.

Особенности геологического строения участка обусловлены его положением в зоне сочленения двух крупных тектонических структур Урала – Западно-Уральской мегазоны и Центрально-Уральского поднятия, локализованных в западной и восточной частях площади соответственно [7]. Стратиграфический разрез этой площади, охватывающий интервал от среднего рифея до нижней перми, можно разделить на два структурных этажа. Нижний структурный этаж (ишеримская, мойвинская, першинская, вильвинская свиты; басегская серия) сложен сланцами и кварцитами верхнего рифея–венда, которые прорваны интрузиями вендских габбродолеритов и кембрийских гранитов. Верхний структурный этаж (таборная, хапхарская, чувальская, тошовская свиты; доломитовая толща) представлен осадочными толщами кембрия–силура, прорванными комплексом ордовикских ультраосновных и основных интрузий, а также девонскими дайками габбродолеритов [4].

Золотоносные россыпи Кваркушской площади известны и отрабатываются еще с конца XX века, однако самородное золото остается слабоизученным и его коренные источники до сих пор неизвестны. Золотоносные россыпи Красновишерского района сосредоточены в его разветвленной речной сети, сформировавшейся в плиоцен-четвертичное время, большая их часть связана с мезозойскими структурно-эрозионными депрессиями [8]. В пределах района известно семь россыпных месторождений, из которых наиболее перспективными считаются Сурья-Казанская (долина р. Сурья на всем ее протяжении), Саменская (нижнее и среднее течение р. Саменка) и Благодатная (верхнее течение р. Саменка). Наибольшими запасами золота (> 1500 кг) обладают Сурья-Казанская и Саменская россыпи, в то время как для Благодатной россыпи характерно исключительно высокое среднее содержание Au, превышающее 1100 мг/м³ [16].

Основы классификации самородного золота и условий его возникновения наиболее подробно рассмотрены в монографии Н. В. Петровской [14]. В 1970-е годы появляется новое научное направление – использование типоморфизма золота для решения ряда генетических и прогнозно-поисковых задач. Основными признаками, которые могут указывать на происхождение золота, являются: размер частиц золота, форма выделений, состав самородного золота (пробность и элементы примеси), золотоносные минеральные ассоциации [13]. В настоящее время данный метод широко используется для характеристики коренных источников в различных регионах [2, 5, 6, 9, 10].

Полевые материалы были отобраны в 2023–2024 гг. сотрудниками Кваркушской партии ФГБУ «Институт Карпинского» и автором в ходе выполнения работ по проекту ГДП-200 для листа Р-40-XXV. Для изучения было отобрано 32 шлиховых пробы песчано-гравийного материала из десяти точек наблюдений в пределах россыпей Сурья-Казанская, Саменская и Благодатная; также было отобрано три протолочных пробы из наиболее обогащенных фукситом горизонтов пород таборной свиты из водоотводной канавы россыпи Саменская.

В ходе лабораторных работ было выделено 149 зерен золота: 134 – из Сурья-Казанской россыпи, 10 – из Саменской и 5 – из Благодатной. Для изучения морфологии и состава самородного золота применялись методы оптической микроскопии и электронно-зондового микроанализа (EPMA).

Самородное золото из всех трех россыпей обладает сходной морфологией; наиболее распространены вытянутые, уплощенные и изометрические формы, размеры варьируют в пределах 0,15–1,25 мм. Пробность самородного золота россыпи Сурья-Казанская меняется от 802 до 999 ‰, Саменская – от 865 до 999 ‰, Благодатная – от 923 до 985 ‰. Наиболее часто встречающимися примесями являются Ag и Cu, в самородном золоте россыпи Сурья-Казанская спорадически встречаются Fe и Te; для золота из всех изученных россыпей характерно наличие высокопробной каймы.

Микровключения минералов были обнаружены в большинстве (120 из 149) изученных зерен золота. Эти включения встречаются как в центральных, так и в периферийных частях зерен. Всего идентифицировано 23 минеральных вида, среди которых доминируют кварц, глинистые минералы (каолинит, иллит, монтмориллонит), рутил, слюды группы мусковита и гидроксиды железа; реже встречаются циркон, монацит, ксенотим, пирит, халькопирит, галенит, борнит, тетраэдрит, халькозин, полевые шпаты, хлорит, титанит, анкерит, мелонит и алтаит. Примечательно, что в 39 % случаев (47 из 120 зерен) встречаются ассоциации минералов, состоящие из трех и более различных минералов.

Наиболее необычным обнаруженным минеральным включением является хромсодержащий мусковит (фуксит). На Приполярном Урале находится месторождение золота Чудное и связанное с ним рудопроявление Нестеровское, в которых встречается фуксит. Нестеровское относится к типу палеороссыпей: считается, что источником золота для него служат породы алькесвожской свиты верхнего кембрия–ордовика [1].

На Кваркушской площади известна таборная свита того же возраста и имеющая сходный состав. Таборная свита приурочена к межформационному контакту между рифей-вендским комплексом доуралид и каледоно-герцинским комплексом уралид. Изученные отложения таборной свиты по петрографической и минеральной характеристике, содержаниям Cr в мусковите и примесей в хромшпинелидах [15] в целом аналогичны алькесвожской свите и, соответственно, могут рассматриваться в качестве возможного источника золота.

В результате изучения проб пород таборной свиты самородное золото обнаружено не было, дополнительно для сравнения минералогии слюд и хромшпинелидов этой свиты и россыпей Саменская и Сурья-Казанская были построены треугольные диаграммы в осях ${}^{\text{VI}}\text{Fe}^{2+}$ – ${}^{\text{VI}}\text{Cr}^{3+}$ – ${}^{\text{VI}}\text{Mg}^{2+}$ и Cr^{3+} – Fe^{3+} – Al^{3+} соответственно. Слюды группы мусковита из таборной свиты разделяются на две встречающиеся примерно в равных количествах разновидности, различающиеся соотношением Fe и Mg в октаэдрической позиции: разновидность I с отношением Fe : Mg от 2,30 до 0,80 и менее железистая разновидность II с соотношением 0,66–0,33. Включения слюд в золоте из изученных россыпей соответствуют этим же типам, однако среди них резко преобладают слюды разновидности I. При этом слюды из таборной свиты и включений в золоте существенно различаются по общему содержанию хрома. В отличие от слюд, хромшпинелиды таборной свиты и россыпи Саменская имеют сходный состав.

Для моделирования РТ-условий возникновения самородного золота использовался графический термометр по хлориту [18] и эмпирический барометр по титаниту [19]. Всего было исследовано 12 образцов хлоритов и 2 образца титанита из самородного золота, а также 7 образцов хлорита из фукситизированных горизонтов таборной свиты. Расчет формул производился на основе данных ЕРМА по кислородному методу [3].

Для хлоритов из россыпей Саменская и Сурья-Казанская характерен довольно широкий разброс расчетных температур образования – от 75 °С до более 300 °С, однако большая часть образцов все же показывает температуру образования более 300 °С; присутствие хлоритов с меньшей температурой образования связано с долгим нахождением золота в зоне гипергенеза и сопутствующим окислением железа. Изученные титаниты указывают на образование при давлениях в 146–172 МПа, что соответствует глубине 4,8–5,8 км. Таким образом, можно утверждать, что по крайней мере образование части золота происходило в плутоногенных условиях. Реконструкция температур образования хлоритов таборной свиты показала, что все изученные образцы образовались при температуре ниже 75 °С.

Ещё одним важным фактором, который указывает на тип золоторудной минерализации коренного источника, являются доминирующие ассоциации минеральных включений [11]. На основе анализа этих ассоциаций, а также химического состава, размера и пробности самородного золота можно предположить, что золото изученных россыпей связано с золото-кварцевым малосульфидным и золото-полисульфидно-кварцевым типами месторождений.

На связь с золото-кварцевым малосульфидным типом указывают преобладание высокопробных зерен золота с включениями кварца, редко ассоциирующего с сульфидами, а также характерные для этого типа включения рутила, мусковита, полевых шпатов и хлоритов. Месторождения этого типа формируются на орогенных стадиях развития складчатых областей в условиях больших и средних глубин. Углеродсодержащие терригенные и карбонатно-терригенные толщи, вмещающие золото-кварцевую малосульфидную минерализацию, часто метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации [12].

Месторождения золото-полисульфидно-кварцевого типа в изучаемом районе, вероятно, связаны с листовит-березитовыми метасоматитами, на что указывают включения сульфидов (пирит, халькопирит, тетраэдрит, галенит), теллуридов, слюд ряда мусковит–фенгит, анкерита и фуксита, высокая и очень высокая пробность золота с этими включениями [17].

По результатам изучения пород таборной свиты в ней не было обнаружено даже следов золота, минералогия слюд и условия образования хлоритов отличаются от таковых для самород-

ного золота из россыпей. Можно полагать, что данные породы не являются коренным источником для исследованных россыпей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антошкина А. И., Салдин В. А., Сандула А. Н., Никулова Н. Ю., Пономаренко Е. С., Шадрин А. Н., Шеболкин Д. Н., Канева Н. А. Палеозойское осадконакопление на внешней зоне шельфа пассивной окраины северо-востока Европейской платформы. – Сыктывкар : Геопринт, 2011. – 200 с. DOI: 10.19110/98491-029
2. Баширов В. Э., Казаков П. В., Сначев А. В., Гатауллин Р. А., Рассомахин М. А. Особенности золота Таналыкской россыпи и его коренные источники (Баймакский рудно-россыпной узел, Южный Урал) // Геологический вестник. – 2024. – № 1. – С. 50–63. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-1-4
3. Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарев А. А. Формулы минералов. Термодинамический анализ в минералогии и геохимии. – СПб : СПбГУ, 1995. – 260 с.
4. Захаров И. Н. Проектная документация на осуществление работ по объекту: «Проведение в 2023–2025 годах региональных геолого-съёмочных работ масштаба 1 : 200 000 на группу листов в пределах Приволжского и Уральского ФО». – СПб., 2023. – 342 с.
5. Козин А. К., Степанов С. Ю., Паламарчук Р. С., Шиловских В. В., Жданова В. С. Шлиховые ассоциации минералов золотоносных россыпей Миасской россыпной зоны (Южный Урал) и возможные коренные источники золота // Геология и геофизика. – 2023. – № 64 (9). – С. 1219–1237. DOI: 10.15372/GIG2023114
6. Лаломов А. В., Наумов В. А., Григорьева А. В., Магазина Л. О. Эволюция Вагранского золотоносного россыпного узла (Северный Урал) и перспективы выявления коренной минерализации // Геология рудных месторождений. – 2020. – № 62 (5). – С. 450–461. DOI: 10.31857/S0016777020050044
7. Милановский Е. Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). – М. : МГУ, 1996. – 448 с.
8. Наумов В. А., Коврижных С. В. Основные черты формирования золотоносных россыпей на западном склоне Среднего Урала // Вестник Пермского университета. Геология. – 2018. – № 17 (2). – С. 164–170. DOI: 10.17072/psu.geol.17.2.164
9. Неволько П. А., Колпаков В. В., Нестеренко Г. В., Фоминых П. А. Самородное золото аллювиальных россыпей северо-западного Салаира: состав, типы и минеральные включения // Геология и геофизика. – 2019. – № 60 (1). – С. 79–100. DOI: 10.15372/GiG2019005
10. Никифорова З. С., Герасимов Б. Б., Глушкова Е. Г., Каженкина А. Г. Индикаторные признаки россыпного золота как показатель прогнозирования формационных типов золоторудных месторождений (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика. – 2018. – № 59 (10). – С. 1643–1657. DOI: 10.15372/GiG20181009
11. Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н. Изучение золота при геологоразведочных работах: методические рекомендации. – М. : ЦНИГРИ, 2023. – 73 с.
12. Николаева Л. А., Михайлов Б. К. Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. – М. : Акварель, 2015. – 200 с.
13. Николаева Л. А., Яблокова С. В. Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах // Руды и металлы. – 2007. – № 6. – С. 41–57.
14. Петровская Н. В. Самородное золото. Общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса. – М. : Наука, 1973. – 347 с.
15. Повонская Н. В., Ефанова Л. И. Типоморфные особенности минералов алькесвожской толщи на участке Нестеровский // Золотоносные конгломераты Урала. – 1999. – № 3. – С. 9–18.
16. Попов А. Г. Золото бассейна р. Вишеры Северного Урала // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2017. – № 17. – С. 49–57.
17. Сазонов В. Н., Коротеев В. А. Основные золотопродуктивные и сопутствующие метасоматические формации Урала. – Екатеринбург : Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2009. – 161 с.
18. Bourdelle F., Cathelineau M. Low-temperature chlorite geothermometry: a graphical representation based on a T–R²⁺–Si diagram // European Journal of Mineralogy. – 2015. – No 27 (5). – P. 617–626.

19. Erdmann S., Wang R., Huang F., Scaillet B., Zhao K., Liu H., Chen Y., Faure M. Titanite: a potential solidus barometer for granitic magma systems // Comptes Rendus Geoscience. – 2019. – No 351 (8). – P. 551–561. DOI: 10.1016/j.crte.2019.09.002

**Шухов В. В. (vladimirsh3993@gmail.com), Устинов С. А. (stevesa@mail.ru),
Петров В. А. (vlad243@igem.ru), Минаев В. А. (minaev2403@mail.ru),
Свечеревский А. Д. (alexey@svecherevskiy.ru)**
ИГЕМ РАН, г. Москва

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ПРОНИЦАЕМЫХ ЗОН
В КОНТЕКСТЕ ПРОГНОЗА МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА
(НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧУКОТКИ)**

На основе структурно-геоморфологического анализа и тектонофизической интерпретации выделенных линеаментов для территории Центральной Чукотки создана цифровая модель структурно-проницаемых тектонических зон, потенциально перспективных для поисков рудных полезных ископаемых.

Ключевые слова: структурно-геоморфологический анализ, линеаменты, структуры центрального типа, тектонофизическая интерпретация, данные дистанционного зондирования Земли, рудные полезные ископаемые.

Высокий потенциал дистанционных методов прогноза рудных месторождений обусловлен существенным сокращением доли дорогостоящих полевых поисково-оценочных работ. Важнейшим фактором, влияющим на формирование промышленных концентраций полезных ископаемых, является наличие структурно-проницаемых разрывных зон, способствующих миграции флюидов и локализации основной массы рудного вещества.

Планомерное расширение минерально-сырьевой базы РФ в целом и удаленных регионов в частности обеспечивает устойчивое экономическое развитие страны. С точки зрения добычи рудных полезных ископаемых, преимущественно золота, одним из наиболее значимых регионов РФ является Чукотский автономный округ (ЧАО), полностью входящий в состав важнейшей геостратегической территории – Арктической зоны РФ.

Чукотка, обладающая высоким потенциалом в контексте обнаружения новых золоторудных месторождений, характеризуется существенной неоднородностью географических условий, что во многом связано с развитием крайне разнообразных форм рельефа, представленных как складчато-глыбовыми горами и глубокорасчлененными нагорьями, так и обширными низменностями. Данная особенность в наибольшей степени обусловлена продолжительной структурно-тектонической эволюцией на фоне различных эпох орогенеза [2] и географическим положением близ границ литосферных плит.

С точки зрения геологии и структурно-тектонического строения данный регион характеризуется неравномерной изученностью – составленные картографические материалы тектонического районирования требуют дальнейшего доизучения и уточнения.

Среди крупнейших структурных элементов ЧАО выделяются: древний Эскимосский массив, расположенный на восточной оконечности Чукотки и характеризующийся повсеместными выходами на поверхность докембрийских отложений; Верхояно-Чукотская область мезозойской складчатости – крупное покровно-складчатое горное сооружение, ограниченное Сибирской платформой на западе и Корьякско-Камчатской складчатой областью, еще одним крупным структурным элементом в строении региона, на востоке. Обозначенные складчатые области разделены протяженной наложенной структурой, сформировавшейся в период позднемелового вулканизма, – Охотско-Чукотским вулканоплутоническим поясом. Особой перспективностью на выявление новых крупных золоторудных месторождений характеризуется Центральная

Чукотка, а именно ее северная прибрежная часть, условно образованная хребтами складчатой системы северо-западного простираения и заключенная в границы Ичувеем-Паляваамского золоторудного района, к которому относится одно из крупнейших в стране коренных золоторудных месторождений – Майское. Система хребтов северо-западного простираения образует относительно однородный в структурном и геологическом плане блок (около 25 000 км²), преимущественно сложенный поздне-триасовыми осадочными породами с прорывающими их ранне-поздне-меловыми интрузивными образованиями с преобладанием кислых пород: гранитов, гранодиоритов, монзонитов. На юге изучаемой территории триасовые отложения сменяются ранне-меловыми. В прибрежных низменностях широко распространены неогеновые глины и алевролиты, на северо-востоке отмечаются выходы более древних пород – девонских песчаников.

Основой представляемой дистанционной методики прогноза рудных месторождений служит структурно-геоморфологический анализ территории с применением цифровых моделей рельефа (ЦМР). Связь современного облика рельефа объекта исследования с его структурным планом в некоторой степени отражают линеаменты – протяженные прямолинейные формы рельефа, как отрицательные, так и положительные, связанные с выходом на дневную поверхность сместителя разлома [11].

Необходимо отметить, что в современной структурной геологии оценка применения линеаментного анализа в целях идентификации разрывных структур весьма неоднозначна. Некоторые исследователи относятся к этому подходу крайне скептически, утверждая, что рельеф, постоянно подвергающийся экзогенному воздействию, не может отражать особенности древнего структурного плана [5]. Другие, наоборот, отстаивают идею о постоянной эволюции рельефа на протяжении длительной истории геологического развития и, как следствие, о его связях со структурами на всех этапах тектогенеза, в том числе и относительно древних [7]. В настоящем исследовании линеаментный анализ принят как одна из ведущих дистанционных методик в контексте изучения тектонического строения обширных удаленных площадей, применительно к которым иные классические методы, позволяющие подготовить грамотную основу для выявления разрывных нарушений, отсутствуют [1].

Представляемая методика прогнозных исследований включает в себя шесть основных этапов: 1) мультимасштабный линеаментный анализ; 2) реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) на основе тектонофизической интерпретации выделенных линеаментов с целью выявления наиболее проницаемых сегментов разрывных структур для флюидов на предполагаемый период рудообразования; 3) дешифрирование и пространственный анализ структур центрального (кольцевого) типа (СЦТ); 4) систематизация полученных результатов: формирование пространственно-плотностных и вероятностных критериев – структурных предпосылок для локализации оруденения и определение значимости каждого из них на основе корреляционного анализа с эталонными объектами; 5) создание весовой модели, позволяющей локализовать структурно-проницаемые в той или иной степени зоны, потенциально перспективные для обнаружения рудных месторождений; 6) формулирование рекомендаций для дальнейших поисково-оценочных работ.

Наиболее достоверной основой для дешифрирования линеаментов являются ЦМР, отражающие «чистую земную поверхность» и дающие наиболее полное представление о геоморфологических особенностях исследуемой территории, тем самым позволяя наиболее точно идентифицировать различные формы рельефа. В настоящее время существует множество моделей, в той или иной степени характеризующих неоднородности земной поверхности. При выборе источника важно понимать, что основным содержанием ЦМР, в отличие от цифровой модели местности, является точное отображение рельефа земной поверхности. Проведенные в рамках подготовки исходных материалов многочисленные сравнительные тесты продемонстрировали ряд преимуществ современной предобработанной ЦМР FABDEM над более распространенными аналогами (SRTM, ARCTIC DEM, ASTER GDEM, ALOS WORLD 3D, WORLDDDEM) как по высотной точности, так и по отсутствию зашумленности объектами местности. Таким образом, FABDEM (разрешение – 1" / пиксел) определена как наиболее достоверный источник информации о геоморфологических особенностях территории в контексте выделения линеаментов. Для обеспечения наилучших результатов дешифрирования линейных элементов рельефа проведена

фильтрация исходного изображения ЦМР по четырем основным направлениям. Затем в полуавтоматическом режиме с использованием ПО PCI Geomatica для каждого из направлений выделены линеаменты. С целью учета разноранговости тектонических структур при проведении реконструкции систем тектонических нарушений учтен масштабный эффект выделяемых линейных объектов [4], заключающийся в различных характеристиках проявления и формирования разрывных нарушений разной протяженности. Эта задача решена с помощью пошагового изменения пространственного разрешения исходной ЦМР.

Наиболее протяженные линеаменты, вероятно маркирующие крупные разломы, выделены по ЦМР низкого пространственного разрешения, а оперяющие их мегатрещины – по ЦМР среднего и относительно высокого разрешения.

Учитывая результаты проведенных ранее исследований по геодинамической эволюции Чукотки, определивших повсеместное проявление аккреционно-коллизийных процессов между блоками, актуальным является предположение о преимущественно сдвиговой кинематике разрывных структур – границ крупнейших тектонических единиц [3, 9]. Для реконструкции параметров сдвигового НДС с учетом выделенных разномасштабных линеаментов применен тектонофизический подход с использованием модели сдвига П. Л. Хэнкока [10]. Для этого применено ПО «Lineament stress calculator» (автор – А. Д. Свечеревский), позволившее классифицировать все выделенные структуры в парагенезисе по их кинематическому типу в соответствии с основными параметрами НДС – ориентировками главных осей сжатия и растяжения [6]. Установлено, что в пределах Ичувеев-Паляваамского золоторудного района под воздействием субширотного сжатия формировалась левосдвиговая зона с магистральными структурами северо-западного простирания. Для каждого из выделенных разноранговых разрывов, с учетом параметров НДС, вычислен коэффициент тенденции к сдвигу, определяющий наиболее гидравлически активные сегменты структур на предполагаемый период отложения руд [12].

Следующим важным этапом стало дешифрирование СЦТ и их дальнейший анализ. СЦТ – это округлые геологические морфоструктуры различного генезиса. Значимость их роли в процессах рудообразования доказана еще во второй половине прошлого столетия, однако задаче дешифрирования и комплексного анализа концентрических структур в контексте прогнозирования месторождений в настоящее время должное внимание не уделяется. Унифицированная методика, позволяющая автоматизировать выделение СЦТ, еще не разработана, однако вполне достоверные и полные результаты достигаются с использованием ручного дешифрирования на основе визуализированной специальным образом ЦМР [8]. В результате на рассматриваемой территории выделено 289 разноранговых СЦТ.

С опорой на полученные результаты комплексного структурно-геоморфологического анализа ЦМР территории разработан ряд прогнозно-поисковых критериев локализации оруденения, которые учитывают основные структурные элементы: линеаменты различных масштабных уровней, маркирующие разноранговые разрывные структуры с учетом их наиболее гидравлически активных сегментов; СЦТ, отражающие предполагаемые магматические очаги и вулканотектонические образования; зоны пересечений структур различных типов и рангов. По характеру представляемой пространственной информации все критерии классифицированы на две основные группы: плотностные и вероятностные.

Результатом интеграции выделенных критериев с учетом их корреляции с эталонными рудными объектами, условно отраженной весовыми коэффициентами, стала весовая структурно-тектоническая прогнозная модель. Анализ данной модели позволил выделить локальные потенциально перспективные участки для обнаружения месторождений рудных полезных ископаемых и рекомендовать их к дальнейшему изучению в рамках проведения геологоразведочных работ.

Исследование выполнено в молодежной лаборатории ИГЕМ РАН «Лаборатория прогнозно-металлогенетических исследований» в рамках темы государственного задания «Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кац Я. Г., Полетаев А. И., Румянцева Э. Ф. Основы линеаментной тектоники. – М. : Недра, 1986. – 144 с.
2. Коротаев В. Н., Поморцев О. А. Особенности формирования побережий Чукотки и Корякского нагорья // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия: науки о земле. – 2023. – № 2 (30). – С. 41–55. DOI: 10.25587/SVUFU.2023.30.2.005
3. Морозов О. Л. Геологическое строение и тектоническая эволюция Центральной Чукотки. – М. : ГЕОС, 2001. – 201 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 523).
4. Петров В. А., Леспинас М., Полуэктов В. В., Устинов С. А., Минаев В. А. Масштабный эффект в сети флюидопроводящих разрывов // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 3–14. DOI: 10.31857/S0016-77706143-14
5. Проблемы глобальной корреляции геологических явлений. Труды ГИН АН СССР. Вып. 340. – М. : Наука, 1980. – 229 с.
6. Свечеревский А. Д., Устинов С. А., Лапаев Д. С., Петров В. А. Реконструкция параметров сдвиговых напряжений при формировании разноранговых разломов Западного Прибайкалья на основе тектонофизической интерпретации линеаментов // Физика Земли. – 2025. – № 2. – С. 95–113. DOI: 10.31857/S0002333725020085
7. Устинов С. А., Чепчугов А. М., Томаровская М. А., Петров В. А., Свечеревский А. Д., Яровая Е. В. Структурно-тектонофизический подход к интерпретации результатов линеаментного анализа для прогноза рудообразующих минеральных систем на примере района Туяканского рудного узла // Исследование Земли из космоса. – 2024. – № 5. С. 35–57. DOI: 10.31857/S0205961424050037
8. Устинов С. А., Петров В. А., Минаев В. А., Нафигин И. О., Яровая Е. В. Дешифрирование и интерпретация структур центрального типа на территории Юго-Восточного Забайкалья для прогноза рудообразующих систем // Геология рудных месторождений. – 2024. – Т. 66, № 5. – С. 329–362. DOI: 10.31857/S0016777024040015
9. Шухов В. В., Устинов С. А., Свечеревский А. Д., Минаев В. А., Петров В. А. Анализ роли региональных тектонических сдвигов в процессе формирования Чукотки на основе структурно-геоморфологического подхода : материалы VII Всероссийской конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». – Владивосток : ДВГИ ДВО РАН, 2025. – С. 112–116. DOI: 10.24866/7444-5968-0
10. Hancock P. L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. – 1985. – V. 7, No 3/4. – P. 437–457. DOI: 10.1016/0191-8141(85)90048-3
11. Hobbs W. H. Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. – 1904. – V. 15. – P. 483–506. DOI: 10.1130/GSAB-15-483
12. Jaeger J. C., Cook N. G. W. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edit. – London : Chapman and Hall, 1979. – 593 p.

СОДЕРЖАНИЕ

Аунг Чит Сан, Игнатов П. А. СООТНОШЕНИЕ ОКСИДНЫХ И СУЛЬФИДНЫХ Pb-Zn-Ag РУД СТРАТИФОРМНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОУСАЙНГ, РЕСПУБЛИКА СОЮЗ МЬЯНМА	3
Барова Е. В. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ НА КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ПРЕДЕЛАХ ЛОКТЕВСКО-РЕМОВСКОГО РУДНОГО УЗЛА (РУДНЫЙ АЛТАЙ)	6
Волкова Е. А., Краснов А. Н., Шатилова Л. В., Еременко А. В., Лейбгам П. Н. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛОЩАДИ ЧЕРЕМНАЯ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)	9
Гусарова В. В., Раткин В. В., Серов П. А. ЮЖНОЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ: СТРУКТУРА И МАГМАТИЗМ (КРАСНОРЕЧЕНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, СИХОТЭ-АЛИНЬ)	12
Дедюкина С. К., Абрамова С. О., Коршунов Д. М. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТИПИЗАЦИЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ИТАКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)	16
Зарицкий А. В. «ВООРУЖИТЬ ГЕОЛОГА НОВЕЙШИМИ ДАННЫМИ»: Н. Н. ГОРНОСТАЕВ – ПЕРВЫЙ ДИРЕКТОР НИГРИЗолото	19
Калугин Д. В. ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ КОВДОЗЕРСКОГО КОМПЛЕКСА (БАЛТИЙСКИЙ ЩИТ)	21
Камагурова С. В. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ И ОЦЕНКЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ САРЫБАТЫРСКОЙ ЗОЛОТОРУДНОЙ ЗОНЫ)	25
Клюкина А. А. ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ БЕЛАЯ И РУЧЬЕВ СЮК, ГРУЗИНКА, САШКОВА, ЗОЛОТОЙ И ЛИПОВЫЙ РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ	27
Козлов Г. А., Макарьев Л. Б. ТИПИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ МАЛО-ПАТОМСКОГО РУДНОГО УЗЛА НА ПРИМЕРЕ ИЛЬИНСКОЙ ПЛОЩАДИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ РАБОТ	28
Корякин В. А., Богуславский М. А. МИНЕРАЛОГИЯ И ХИМИЗМ ГРАНАТОВ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НАСЕДКИНО (УРЮМСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ, ЗАБАЙКАЛЬЕ)	30

Кочкин И. А., Устинов С. А., Чепчугов А. М., Свечеревский А. Д., Петров В. А. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУР ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ТУЮКАНСКОГО ЗОЛОТО-УРАНОВОГО РУДНОГО УЗЛА	34
Краденов П. К., Леонтьев В. И. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЗОЗОЙСКИХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ЮЖНОГО УРАЛА, ПЕРСПЕКТИВНЫХ НА РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ	37
Краснов Д. А., Бажан И. С. ИСТОЧНИК АЛЛЮВИАЛЬНОГО ЗОЛОТА НА ТРОИЦКОМ УЧАСТКЕ КУНДАТ-ТАЛАНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (СЕВЕР КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ).....	40
Кулему Л. Т. НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПРИМЕНЕНИЮ БЕЛИТОВЫХ ШЛАМОВ АЧИНСКОГО ГЛИНОЗЕМНОГО КОМБИНАТА.....	42
Лейбгам П. Н., Вьюкова А. М., Бучко И. В. ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РУКОСУЕВСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО ПОЛЯ (О. САХАЛИН).....	45
Лекомцева Я. Л. СОЗДАНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА КАМНЕСАМОЦВЕТНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИИ МЪЯНМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА В ГИС.....	49
Лобастов Б. М., Макаров В. А., Попова Н. А. БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТСТОЙНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА	52
Лобастов Б. М., Макаров В. А., Попова Н. А. СОВРЕМЕННОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ХРАНИЛИЩЕ ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ.....	54
Лобастов Б. М., Попова Н. А. ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗОЛОТА В ШЛАМОВЫХ ВОДАХ ХРАНИЛИЩА ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАЮЩЕЙ ФАБРИКИ.....	58
Лосев В. И. , Макаров В. А. ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВОГО СУХОЛОЖСКО-СОСНОВСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЗАПАДНЫЙ САЯН)	61
Максимэн И. Э. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РУДОНОСНОСТЬ СУРГУТАНОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (РУДНЫЙ АЛТАЙ)	65
Мартынович Д. И. О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ УКРУПНЕНИЯ ЗОЛОТА В ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЯХ ПРИ ПОМОЩИ МИКРООРГАНИЗМОВ.....	68
Мильская А. А. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУМРОЧ, КАМЧАТКА.....	71

Михалко Н. П., Попов Е. М., Даниленко И. С. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД В ПРЕДЕЛАХ ХУНХАДИНСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО Au-Pb-Zn-W-Sn РУДНОГО УЗЛА (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)).....	74
Нацвин И. К. ОСОБЕННОСТИ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ НА РУЧЬЕ ОЗЕРНЫЙ (РЕСПУБЛИКА САХА) НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА	77
Омар Д. А., Масунга Э. М., Иванова Ю. Н. СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ УРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В РАЙОНЕ БАСЕЙНА РЕКИ КАРУ, ЮЖНАЯ ТАНЗАНИЯ	79
Орса Ч. Н., Ляпин С. Г. СРАВНЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАРЦА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПОМОРФНЫХ ПРИЗНАКОВ ЕГО РУДОНОСНОСТИ, ПО ОБРАЗЦАМ ПЛ. ШУРУГА (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)	82
Панасенко Ю. М., Карась С. А., Трач Г. Н., Набелкин О. А. ПОД ЧУЖИМ ИМЕНЕМ: ОШИБКИ СОВРЕМЕННОЙ АНАЛИТИКИ И ЕЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ.....	83
Паничкин И. О., Николайчук В. В. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО КЕРНОВЫМ ПРОБАМ СКВАЖИН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	86
Плюснина К. И., Голдырев В. В. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОСАЖДЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ВОД НА СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРАХ.....	89
Попов Е. М., Даниленко И. С., Михалко Н. П. ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ, КОНТРОЛЯ ВОЛЬФРАМОВОГО И СОПУТСТВУЮЩЕГО ОРУДЕНЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ХУНХАДИНСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО Au-Pb-Zn-W-Sn РУДНОГО УЗЛА (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)).....	91
Прасолов А. М., Владимирцева О. В. МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОНОСНОСТИ РУЧЬЕВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ	93
Сватков А. С., Гирфанов М. М., Истомина В. А. ДИНАМИКА МИРОВОГО РУДНИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЗАПАСОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ АБЦМ В ПЕРИОД 2020–2024 гг. (ПО ДАННЫМ ЗАРУБЕЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ).....	97
Сейров Ф. Е., Ананьев Ю. С. СТРУКТУРНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННЫХ СЪЕМОК	98

Соколов Л. В., Польшгалов С. Э., Лобанов В. Г., Седельникова Д. С., Супранкова А. С. ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЩАВЕЛЕВОЙ КИСЛОТЫ.....	102
Соколова Л. А., Белогуб Е. В., Гуревич Д. В. РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ Au-МЕСТОРОЖДЕНИЯ КРАСИВОЕ (АЛДАНСКИЙ ЩИТ)	103
Сомов Н. А. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛИХО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВ АЛМАЗОНОСНОСТИ ВАЖСКОЙ ПЛОЩАДИ.....	106
Столяров И. О. ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА СЕВЕРО-МОСТОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (СРЕДНИЙ УРАЛ): ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ФОРМАЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ.....	110
Тихомиров З. Д., Маковская О. Ю. ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЩАВЕЛЕВОЙ КИСЛОТОЙ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД БУРУКТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	111
Умидиллаев А. А. ОПИСАНИЕ ВТОРИЧНЫХ КВАРЦИТОВ И ИХ ФАЦИЙ НА УНГУРЛИКАНСКОЙ ПЛОЩАДИ.....	114
Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г., Колмачихина Э. Б., Колмачихина О. Б. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИХЛОРИЗОЦИАНУРАТА НАТРИЯ И ТРИХЛОРИЗОЦИАНУРОВОЙ КИСЛОТЫ В ПРОЦЕССАХ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА	116
Чернов Б. Ю. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛОДЕТЕКТОРНОГО ОПРОБОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ СУЛЬФИДОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД С МЕЛКИМ И ТОНКИМ ЗОЛОТОМ НА ПРИМЕРЕ УРЮМСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)	117
Чудинов П. Л. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЭВОТИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО РАЙОНА (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ, ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ).....	119
Шамсутдинов М. Д., Петров С. В. ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОНОСНОСТИ КВАРКУШСКОЙ ПЛОЩАДИ (ЗАПАДНЫЙ СКЛОН УРАЛА, ПЕРМСКИЙ КРАЙ).....	122
Шухов В. В., Устинов С. А., Петров В. А., Минаев В. А., Свечеревский А. Д. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ПРОНИЦАЕМЫХ ЗОН В КОНТЕКСТЕ ПРОГНОЗА МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧУКОТКИ).....	126