

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ, БЛАГОРОДНЫЕ И РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ В РУДАХ АЛГАМИНСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЦИРКОНИЯ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

А.А. Черепанов

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: alekscherepanov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30 июля 2020 г.

Изучены образцы руд и пробы гравитационного концентрата Алгаминского рудопроявления циркония. Определены концентрации редкоземельных, редких и благородных металлов. Содержание редкоземельных в руде 200–300 г/т, в гравитационном концентрате 400 г/т. На диаграммах распределения редких земель четкий минимум Се и преобладание средних лантаноидов и иттрия. В руде и концентрате повышенные содержания Hf, W, U, Ta, Au, Pt. Источник поступления – древняя кора выветривания ультращелочных пород Ингилийского массива. Высказано предположение о наличии в районе погребенной коры выветривания, обогащенной полезными компонентами.

Ключевые слова: цирконий, бадделит, редкоземельные, редкие металлы, золото, платина, коры выветривания, Алгаминское месторождение, Ингилийский массив, Хабаровский край, Дальний Восток России.

Цирконий, относящийся к редким металлам, используется в различных сферах производства благодаря своим металлофизическим и химическим свойствам. Особенно широко он используется в металлургической, атомной и энергетической промышленности, производстве огнеупоров, керамического сырья и других материалов. Кроме того, основные минералы, содержащие цирконий – циркон и бадделит, – являются источником получения гафния, ещё более редкого и дорогого металла [5]. Циркониевая (гафниева) промышленность России в условиях, сложившихся после распада СССР, понесла существенные потери. Открытие в 1984 г. на севере Хабаровского края Алгаминского проявления бадделит-циркониевых руд может стать основой для создания на Дальнем Востоке сырьевой базы циркониевой промышленности.

Рудопроявление Алгама расположено в Аяно-Майском районе Хабаровского края, в 130 км севернее поселка Нелькан. В 2014–2016 гг. разведочные работы на месторождении проводило АО «Сосновгео» совместно с ОАО «Дальгеофизика». Последние, с целью получения дополнительных данных по вещественному составу руд и, особо, распространению в них редкоземельных элементов (РЗЭ), передали в ИТиГ для изучения коллекцию проб, образцов руды и пробы гравитационного концентрата.

Целью настоящих исследований явилось определение концентраций и форм нахождения редкоземель-

ных, редких и благородных металлов в цирконийсодержащих рудах месторождения и их концентратах, выявления связи металлов с близрасположенным Ингилийским массивом ультращелочных пород.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использована часть полевых образцов и проб руды и пород с участков Алгама, отобранных 2014–2015 гг. в разведочных канавах и скважинах, а также 6 проб гравитационного концентрата, каждая весом 20–25 кг. Последний получен в опытном порядке ОАО «Дальгеофизика».

В Хабаровском инновационно-аналитическом центре коллективного пользования ИТиГ ДВО РАН в образцах методом РФА (прибор S4 Pioneer, Брукер, Германия, аналитик Л.М. Ильин) определены содержания главных породообразующих оксидов, методом ICP-MS (прибор ELAN9000, ПеркинЭлмер, США, аналитик А.В. Штарева) – концентрации редких, редкоземельных и рассеянных элементов, благородных металлов. С помощью электронной сканирующей микроскопии (микроскоп VEGA 3 LMH, TESCAN, Чехия с энергодисперсионным спектрометром X-max 80, Оксфорд, Великобритания, оператор В.О. Крутикова) изучены формы выделения и состав минералов-носителей полезных компонентов. Применялся как точечный анализ, так и анализ «по площади» с непрерывным набором спектра по выбранной области.

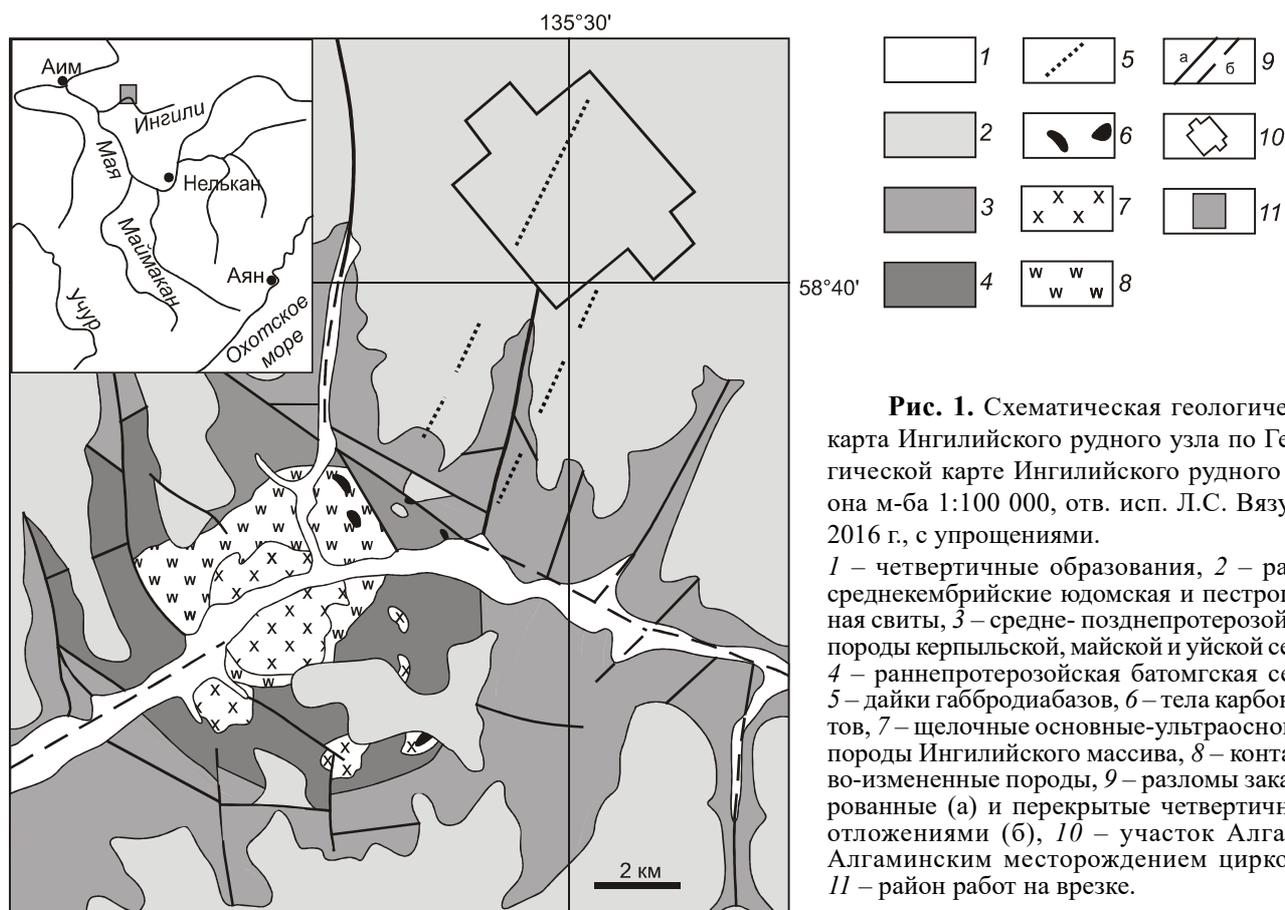


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Ингилийского рудного узла по Геологической карте Ингилийского рудного района м-ба 1:100 000, отв. исп. Л.С. Вязунов, 2016 г., с упрощениями.

1 – четвертичные образования, 2 – ранне-среднекембрийские юдомская и пестроцветная свиты, 3 – средне-позднепротерозойские породы керпыльской, майской и уйской серии, 4 – раннепротерозойская батомгская серия, 5 – дайки габбродиабазов, 6 – тела карбонатитов, 7 – щелочные основные-ультраосновные породы Ингилийского массива, 8 – контакто-измененные породы, 9 – разломы закартированные (а) и перекрытые четвертичными отложениями (б), 10 – участок Алгама с Алгаминским месторождением циркония, 11 – район работ на врезке.

Химическую подготовку проб к анализам выполняли Н.И. Ильина, А.Ю. Петрова, Г.Ф. Золотухина. При составлении спайдер-диаграмм нормирование производилось на значения континентальной коры [12].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Алгаминское месторождение циркония расположено в восточной части Сибирской платформы в зоне её сочленения с Юдомо-Майским перикратонным прогибом, разделяющим структуры Сибирской платформы и Охотского срединного массива. Оно находится в пределах Ингилийского поднятия, в котором Ингилийский купол является составной частью поднятия. В ядре купола обнажаются протерозойские стратифицированные образования, прорванные телами щелочных базит-ультрабазитов протерозойского возраста и палеозойскими дайками габбродиабазов. Обрамление купола сложено кембрийскими осадочными породами (рис. 1).

Раннепротерозойские метаморфические образования представлены скаполит-амфибол-плаггиоклазовыми гнейсами, кристаллосланцами, амфиболитами и мраморами батомгской серии. Породы интенсивно

мигматизированы мелкими телами и прожилками гнейсовидных плаггиогранитов. На них с резким угловым несогласием залегают слабометаморфизованные средне-позднепротерозойские терригенно-карбонатные породы. Существенно карбонатные вендские отложения юдомской свиты несогласно перекрывают породы рифея и нижнего протерозоя. Формированию пород этой свиты предшествовал крупный перерыв в осадконакоплении, сопровождавшийся становлением интрузий ингилийского комплекса (щелочные основные-ультраосновные породы Ингилийского массива с небольшими телами карбонатитов) с образованием Ингилийской купольной структуры. Ее положение контролируется пересечением глубинных Ураханского и Учуро-Ингилийского разломов [2–4]. Формирование Ингилийского купола завершилось в девоне внедрением даек габбродиабазов повышенной щелочности.

Рудовмещающие вендские отложения юдомской серии несогласно перекрывают породы рифея и нижнего протерозоя, а также магматические породы рифея-кембрия присущи магнезиальные разновидности, более молодым – известковистые. Отложения юдомской свиты существенно карбонатные и

подразделяются на две подсвиты. Нижняя – сложена преимущественно терригенными породами. Оруденение приурочено к верхней подсвите, сложенной в основном тонкозернистыми хемогенными известково-магнезиальными осадками, преобразованными в доломиты и известковистые доломиты. Судя по широкому распространению в рудовмещающих породах онколитовых образований, это прибрежно-мелководные хемогенные осадки, отложившиеся на пологих склонах Ингилийского валообразного поднятия. Доломиты свиты формировались с привнесом материала Ингилийского массива, о чем свидетельствуют повышенные содержания циркония (0.1–0.3 %, редко до 1.5–2.5 %), ниобия (0.015–0.024 %) и редких земель (0.05–0.27 %), а также наличие в базальных конгломератах выветрелого материала ультращелочного состава [4]. Доломитовая толща юдомы длительного времени (палеозой) находилась в континентальных условиях, необходимых и достаточных для формирования систем палеокарста со стратифицированными и секущими элементами. Развитие карста связано как с повышенной пористостью доломитов, так и с разломами, сопровождающимися мощными зонами трещиноватости и, нередко, сульфидизации. Отмечается пространственная приуроченность карстовых зон к разрывным нарушениям, залеченным дайками габбродиабазов (Л.С. Вязунов, 2016 г.). Разрывные нарушения создавали благоприятные условия для циркуляции подземных и грунтовых вод и формирования карста.

Кембрийская система представлена отложениями пестроцветной и иниканской свит, залегающих согласно на породах юдомской серии.

Современные отложения – аллювиальные галечники, пески и суглинки мощностью до 25 метров, элювиальные, элювиально-делювиальные, делювиальные, пролювиальные образования и отложения карстовых полостей – кольматолиты. Последние представляют собой образования карстовых полостей, заполненных гравитационно-объемными брекчиями, инфлювием и хемогенным материалом. Состав, сортированность и соотношение между обломочными и песчано-глинистыми фракциями кольматолитов зависят от формы, размеров, длительности формирования карстовых полостей, условий обводненности и точности подземных камер (О.Д. Лысенко, 1998 г.).

Интрузивные образования представлены разновозрастными комплексами пород (рис. 1). В рифейское время в районе проявился первый этап платформенного магматизма, выразившийся в становлении интрузий центрального типа (ингилийский комплекс) и внедрении силлов, даек диабазов и габбродиабазов трапповой формации. Интрузии первого типа распро-

странены на платформе, вторые – в Юдомо-Майском перикратонном прогибе и на платформе.

Ингилийский массив – интрузия центрального типа ультраосновной щелочной с карбонатитами формации, составляющая ядерную часть довольно крупной (диаметр 6–8 км) купольной структуры диапирового типа. Массив имеет зональное строение. В центре массива развиты ийолит-мельтейгиты, образующие систему субпараллельных и секущих жил протяженностью до 50 м, рвущих метасоматически измененные пироксениты (апопироксениты). Ядро массива окружено кольцом силикатных и карбонатных метасоматитов (тералитов), образовавшихся по метаморфическим породам и ийолит-мельтейгитам. В метасоматитах, метаморфических и осадочных породах встречаются рвущие тела и дайки нефелиновых или канкринитовых сиенитов. Более поздние кальцитовые и доломитовые карбонатиты слагают штоки и силлы во всех перечисленных выше породах [2, 4]. Свод купола интенсивно эродирован в предкембрийское время.

В генетическом отношении породы Ингилийского массива являются представителями базит-гипербазитовых ассоциаций концентрического типа, имеющих мантийную природу, и по петрохимическим классификациям относятся к натриевой серии щелочно-ультраосновных пород, сопровождающихся карбонатитами. Для таких образований характерна приуроченность к краевым частям кратонизированных блоков земной коры (Сибирской платформы), испытывающих преимущественно сжатие [3].

Другим формационным типом ультраосновных пород района являются тела кимберлитоподобных ингилитов (пикритов), широко проявленные в форме трубок взрыва и дайковых тел, завершающих становление Ингилийского комплекса. Эти тела в большинстве своем перекрыты отложениями юдомской свиты, но уверенно картируются аномалиями магнитного поля (И.Г. Корсакова, 1989 г.).

Палеозойские интрузии представлены среднепозднедевонскими дайками диабазов, габбродиабазов, оливиновых диабазов. Подавляющее большинство их имеет субмеридиональную и северо-восточную ориентировку. Мощность меняется от 5–10 м до 30–60 м, а по простиранию они прослеживаются от 0.5 км до 3–5 км, реже больше.

Полезные ископаемые. В районе известны проявления различных полезных ископаемых. Кроме Алгаминского и других рудопроявлений циркония здесь выявлены проявления железных руд и полиметаллов, приуроченные к осадочным породам платформенного чехла, ниобия и тантала, редких земель, апатитов, алмазов и золота, которые ассоциируются в основном с рифейскими интрузиями центрального типа (Инги-

лийский массив). В 2016 г. на площади Алгаминского проявления в породах юдомской свиты выявлены признаки нефте- и газоносности [7].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В пределах Ингилийского рудного узла выявлено свыше 30 точек циркониевой и сопутствующей минерализации и десятки перспективных гамма-спектрометрических аномалий. Из них относительно более детально изучены 5 участков: Алгама, Аномалия 501, Тас-Юрях, Кандык и Нижнеалгаминский. Наиболее изученным является участок Алгама, территория которого охватывает Алгаминское рудопроявление циркония и его ближайшие фланги (рис. 1).

Алгаминское рудопроявление расположено на северном склоне Ингилийского массива, в 15 км от его центральной части. Площадь участка сложена терригенно-карбонатными породами верхней под-свиты юдомской свиты венда, представленных мраморизованными доломитами, известковистыми доломитами с многочисленными карстовыми полостями, заполненными рыхлым обломочным и песчано-глинистым материалом (инфлювием). Мощность карстовых отложений изменяется от первых сантиметров до 28 м. В разрезе карстовые полости имеют линзовидную, пластообразную форму. Развитие процесса карстообразования наблюдается как в приповерхностных условиях, так и на глубине. Отложения карстовых полостей встречаются на различных гипсометрических уровнях – от 560 до 620 м. Распределение их в разрезе крайне неравномерно. Область развития карста постепенно выклинивается в северо-восточном направлении. Отложения свиты залегают субгоризонтально со слабым наклоном на север, согласно с общим наклоном северного крыла Ингилийского купола (О.Д. Лысенко, 1998 г.).

Рудные залежи месторождения расположены в верхней части разреза юдомской свиты и пространственно приурочены к зонам интенсивного карстообразования в доломитах. Всего выделено три таких зоны в пределах изученной части рудного поля: Западная, Главная и Южная. Наиболее изученной является Главная залежь, протяженностью 5.8 км, при ширине 500–800 м. Она локализована в северной части рудного поля при средней мощности 1.6 м и колебаниях от 1 до 5 м, содержание ZrO_2 от 0.9 % до 55 %. Всего выявлено 3 горизонта оруденения, разобщенных доломитами, при вертикальном размахе, оцениваемом в 300 м (Л.С. Вязунов, 2016 г.).

Руда в естественном залегании представлена дресвяно-глинистым материалом и залегает среди аналогичных по внешнему виду рыхлых карстовых образований. Поэтому рудоносные зоны в геологиче-

ском разрезе не имеют четких границ и выделяются по данным гамма-каротажа повышенными значениями радиоактивности. Для рудных тел установлено сложное морфологическое строение, которое определяется непостоянством размеров, высокой изменчивостью формы карстовых образований и содержанием ZrO_2 . Руды верхних горизонтов представлены брекчиями дезинтегрированных карбонатных пород на бадделеит-глинистом цементе, иногда это крепкие тонкозернистые руды брекчиевой текстуры, сцементированные жильным колломорфным кварцем и кальцитом. Кроме кальцита, доломита, кварца, бадделеита, циркона в руде в качестве примесей (до 1 %) установлены: апатит, шеелит, магнетит, хромит, пирохлор, гематит, фосфат редких земель.

Рудные залежи характеризуются повышенной радиоактивностью пород. Отмечен высокий уровень прямой корреляционной зависимости в распределении U и ZrO_2 в рудах, что использовалось для маркировки потенциальных рудных зон.

Циркониевые минералы концентрируются в материале крупностью менее 2.5 мм. При этом прослеживается четкая тенденция к накоплению полезного компонента в материале крупностью менее 0.05 мм (шламовый концентрат). Шламовый материал, по видимому, представляет собой алевро-пелитовую составляющую терригенных песчано-глинистых пород, в различной степени карбонатизированных и ожелезненных.

Полезные рудные минералы представлены бадделеитом и цирконом, присутствующими в виде индивидуализированных зерен, колломорфных выделений и полиминеральных агрегатов. Существовало мнение, что главным рудным минералом алгаминских руд является тонкодисперсный гель-циркон [1, 4]. Однако в процессе минералого-технологических исследований руд с применением прецизионных методов исследования (ИМГРЭ, ВИМС) этот минерал не обнаружен [8].

Бадделеит образует преимущественно тонкозернистые и почковидные агрегаты с характерной структурой: радиально-лучистой и концентрически зональной с развитыми трещинками отдельности; реже встречаются обособленные сферокристаллы минерала. Присутствует в виде полиминеральных агрегатов, в которых тесно ассоциирует с породообразующими минералами, иногда с цирконом. Размеры агрегатов и зерен минерала колеблются от тысячных до первых десятых долей мм и редко до 1–2 мм.

Циркон присутствует в виде индивидуализированных зерен и колломорфных образований, которые в значительном количестве содержат механическую примесь породообразующих минералов, в первую очередь слоистых алюмосиликатов. В основном зер-

на цирконе имеют размеры от 0.1 до 7 мкм, но отмечаются и более мелкие зерна размером первые нм. Коллоидные агрегаты цирконе имеют в основном почковидную и хлопьевидную форму. Размер их может достигать 80 мкм. Тонкодисперсные образования цирконе нередко отмечаются на поверхности кварца, карбоната, глинистых агрегатов в виде корочек толщиной до 15 мкм. Встречаются сростки гидроксидов железа с цирконом, в которых размер последнего не превышает 5 мкм.

Содержание ZrO_2 в цирконе варьирует от 41.22 % до 65.03 %, в бадделеите – от 74.94 до 93.17 %. В цирконе отмечены повышенные содержания иттрия (до 0.44 %) и урана (до 0.52 %). По данным Ю.А. Багдасарова [1], в руде присутствует силикат урана – коффинит – в виде включений размером до 2 мкм в ассоциации с цирконом и бадделеитом. В бадделеите установлено присутствие оксида вольфрама (0.9–2.63 %) и кремнезема (1.30–14.18 %).

В рудах изредка встречаются более крупные (доли мм) зерна апатита, минерала, близкого к ксенотиму, а также слабощелочной амфибол, пирит, гетит, гидрогетит, в отдельных участках мельчайший шеелит. В зоне современного гипергенеза рудных доломитов большую роль приобретает монтмориллонит и другие гидросиликаты, увеличивается количество гидрогетита и особенно кварца.

Рудообразованию на месторождении, по мнению [4], предшествовало мощное выветривание в предюдомское время, приведшее к накоплению древней коры выветривания на магматитах Ингилийской интрузии. В этот и последующие периоды выветривания происходила глубокая химическая переработка материала, его измельчение до дисперсных размеров. При длительном воздействии латеритного типа выветривания в гипергенных условиях цирконий становится подвижным и, в зависимости от кислотности-щелочности, способен перераспределяться, переотлагаться и переходить в раствор.

В периоды палеозойской активизации, приведшей к внедрению даек диабазов и габбродиабазов, происходило карстовое выщелачивание доломитов с последующим заполнением материалом гипергенного выветривания магматитов Ингилийской интрузии. Процесс был многостадийный. Начинаясь с отложения кристаллического кварца, цементирующего брекчии доломитов и покрывающие полости карста при температурах 180–80°C [10, 11]. Непосредственно на кварц отлагались почти мономинеральные слои (полоски) кристаллов бадделеита и цирконе. В последующем поступал неоднородный по составу коллоидно-суспензионный материал, заполнивший карстовые пустоты.

Рудные тела представляют собой закарстованные доломиты, в которых морфология и положение цирконийсодержащей минерализации определялись уровнем грунтовых вод, существовавших в период заполнения и в последующие периоды отложения и переотложения гипергенного материала. Значительная часть материала поступала в виде растворимых соединений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с тем, что вещественный состав руд месторождения, а также особенности минералов циркония детально изучены при технологических исследованиях [8] и подробно описаны (Л.С. Вязунов, 2016 г.), нами они практически не изучались, а основное внимание было обращено на изучение редкоземельных элементов, их распределение, источники поступления. Также отслеживалось нахождение в рудах платиноидов, золота и некоторых редких металлов.

Изученные и проанализированные образцы с месторождения Алгама разделены по содержанию циркония на 4 группы.

Первую группу (3 пробы) составили рудовмещающие доломиты юдомской свиты, содержащие Zr до 200–250 г/т, вторую (8 проб) – дезинтегрированные доломиты карстовых полостей с содержанием Zr от сотых до первых десятых долей процента, третью (8 проб) – руды с содержанием Zr от десятых долей до первых и более процентов, четвертую – гравитационные концентраты (6 проб), содержащие Zr в пределах 38–55 %. Отдельную группу составили образцы пород Ингилийского массива и габбродиабазов из даек с площади месторождения (Таблица 1).

Так как содержание Zr получали по данным измерения методом масспектрометрии (ICP-MS), позволяющим определять максимальные содержания не более 0.3–0.4 %, то для выделения проб с более высоким содержанием использовали данные ОАО «Дальгеофизики» (гравитационные концентраты).

Редкоземельная минерализация Ингилийского массива связана с жильными телами поздних карбонатов и апатитоносных пироксенитов.

По данным И.Г. Корсаковой (1989 г), вскрытые при заверке магнитных аномалий поисковыми скважинами апатитоносные пироксениты, прорванные дайками ийолитов и сиенитов, содержали до 2.5 кг/т редкоземельных металлов (РЗМ). Высокие содержания суммы РЗМ до 11.054 кг/т были установлены в монофракциях апатита. Содержание самого апатита в характеризующих породах в пределах 4–6 %. С этими же породами связаны повышенные содержания цирконе, золота и платины.

Таблица 1. Содержание редкоземельных и редких металлов в породах Ингилийского массива и дайках диабазов.

Элементы	СК-1	СК-2	СК-7	805	146
La	270.88	1.24	82.15	25.53	40.53
Ce	692.98	5.80	185.30	53.79	83.26
Pr	86.76	1.08	22.97	6.08	9.30
Nd	298.28	5.64	80.66	22.57	33.51
Sm	51.81	1.89	12.87	4.18	5.79
Eu	13.07	0.63	3.29	0.90	1.26
Gd	47.67	2.45	12.16	4.42	6.04
Tb	4.85	0.37	1.36	0.58	0.78
Dy	16.56	0.84	5.14	3.00	4.21
Ho	2.41	0.40	0.83	0.56	0.80
Er	5.51	0.94	2.05	1.63	2.26
Tm	0.46	0.17	0.22	0.23	0.31
Yb	2.31	0.92	1.26	1.59	1.98
Lu	0.28	0.13	0.18	0.24	0.28
Y	47.02	6.89	18.59	13.95	20.48
Сумма TR	1540.85	29.41	429.04	139.26	210.79
Sc	44.49	31.48	39.56	12.01	9.46
Co	62.03	50.30	50.70	16.41	19.03
Ni	22.39	79.52	96.08	15.73	17.84
Sr	1597.78	85.12	603.91	172.08	281.61
Zr	324.91	2108.67	1280.15	744.31	5447.60
Nb	129.95	10.22	100.69	19.70	80.95
Ba	416.92	427.67	452.95	276.98	525.27
Hf	12.21	54.52	33.43	14.94	103.27
Ta	5.73	0.35	8.26	1.12	1.15
W	n/a	n/a	0.48	77.40	150.28
Th	12.57	0.32	8.54	9.52	10.93
U	2.05	12.61	7.72	2.86	7.24
Ru	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00008	0.0003
Rh	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00007	0.00055
Pd	0.00157	0.006	< 0.001	0.020	0.044
Ir	0.00054	0.002	< 0.001	0.0024	0.023
Pt	0.00171	0.007	0.0057	0.006	0.0549
Au	1.0	16.946	0.128	0.03	0.079

Примечание. СК-1, СК-2, СК-7 – пироксениты Ингилийского массива, 805 – габброид, 146 – габбродиабаз. Содержание элементов в г/т.

Карбонатиты слагают штокообразные и изомерические тела в краевых частях комплекса и контактово метаморфизованных породах нижнего протерозоя. По данным Багдасарова [2], выделяется 5 типов, из которых первые 4 типа карбонатитов являются рудными, содержат вкрапленность карбоната редких земель, а также скопления цеолитов, вкрапленность пирита, флюорита, барита. Кроме того они сопровождаются телами кварц-карбонатных брекчий, содержащих TR_2O_3 0.008–0.056 %, а по данным минералогического анализа протолок содержание редкоземельных минералов достигает 4000 г/т. В них также присутствуют циркон, апатит, торий, монацит, флюорит

и барит. Из редкоземельных элементов преобладают Ce, La, Y. Во флюорит-карбонатных породах, замещающих сиениты, флюорита – 60 %, Nb_2O_3 – 0.24 %, TR_2O_3 – 0.38 %.

Собственно рудные карбонатиты обогащены пироксеном, ортитом, цирконом, сфеном и обладают повышенной радиоактивностью ториевой и урановой природы.

В других породах массива содержание редкоземельных элементов колеблется от тысячных и сотых долей, до первых процентов, обычно составляя первые доли процента. Колебания на различных участках в составе и соотношениях полезных компонентов значительные, но практически везде содержится Nb, Ta, Y, Yb, La, Ce, Sr, Zr, Sc, иногда отмечается платина, золото в десятых г/т и серебро – до 30 г/т. Носители редких земель – циркон, пироксенол, кобейт, сфен, апатит (рис. 2). Последний содержится практически во всех породах массива, но максимально – в пироксенитах (от 6 до 12 %).

Нами изучены образцы пироксенитов с повышенным содержанием P_2O_5 (до 7.08 %). В образце СК-1 по данным ICP-MS выявлено самое высокое содержание РЗЭ до 1540.8 г/т (табл. 1), при этом часть Ce находилась в виде изоморфной примеси в матрице породы. В образце СК-7 зафиксированы призматические и овальные мелкие включения редкоземельного минерала (рис. 3), имеющие линейную ориентировку. По составу он близок к паразиту из карбонатитов. РЗЭ представлены легкими разновидностями La–Nd с преобладанием Ce (до 15.2 мас. %) и La (до 9.14 мас. %). Спайдер-диаграммы распределения РЗЭ двух образцов пироксенитов с повышенным содержанием РЗЭ однотипны. Для них характерно преобладание легких и средних РЗЭ, невысокое содержание тяжелых, особенно Yb и Lu, и небольшая аномалия Eu (рис. 4, а). Диаграмма обр. СК-2 с низким содержанием РЗЭ отличается низким содержанием легких, преобладанием средних.

Во всех образцах повышенные содержания Zr, Hf, Sr и Ba. Спорадически повышены содержания Th, Pd – до 0.09 г/т; Pt – до 0.12 г/т. Характерны высокие содержания Au – более 1.0 г/т, а в образце СК-2 – до 16.9 г/т (табл. 1). Сами пироксениты сульфидизированы и содержат вкрапленность пирротина, халькопирита и арсенопирита.

В двух образцах из даек диабазов девона (обр. 805 и 146) содержание РЗЭ не превышает 210 г/т. Их спайдер-диаграммы отличаются от таковых для пироксенитов. Они выположенные, с незначительным преобладанием легких и средних РЗЭ и небольшой положительной аномалией Gd (рис. 4, б). Под микроскопом в пироксене наблюдается изоморф-

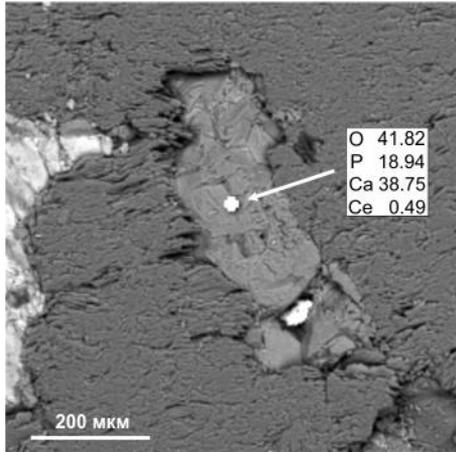


Рис. 2. Зерно апатита в пироксените.

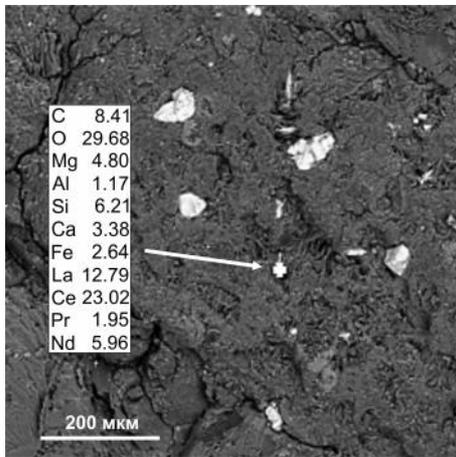


Рис. 3. Удлиненные призматические зерна карбоната РЗЭ в пироксените.

Белые овальные зерна – арсенопирит и халькопирит.

ная примесь Eu и Ho. Диабазы – с повышенным содержанием Zr (до 0.5 %). В зернах циркониевых минералов – изоморфная примесь Hf и W. Диабазы незначительно сульфидизированы, сульфиды представлены пирротинном, галенитом, сфалеритом и пиритом, что отличает их от пироксенитов массива.

Редкоземельная минерализация руд и пород Алгаминского месторождения. Химический состав руд и пород месторождения приведен в таблице 2.

Первая группа – рудовмещающие доломиты юдомской свиты представлены тонкозернистыми известково-магнезиальными разновидностями, слабо брекчированными и сцементированными кальцитом и кварцем, содержат примесь Cl до 0.3 мас. %. Их отложение связано с трансгрессией мелководного моря повышенной солености на пенепленизированную поверхность более древних образований. Терригенный

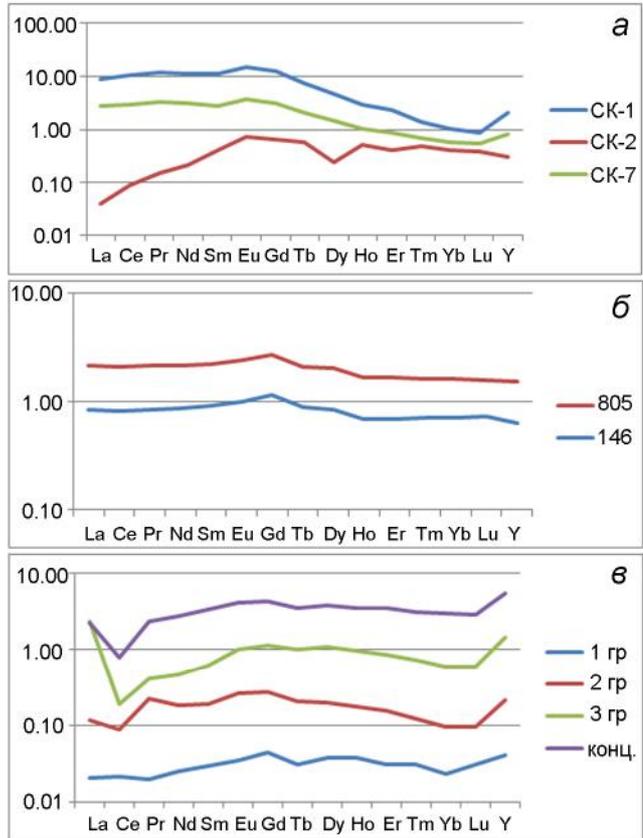


Рис. 4. Спайдер-диаграммы распределения РЗЭ в рудах и породах Алгаминского месторождения.

Нормированы по верхней континентальной коре: 4а – пироксениты Ингилийского массива; 4б – породы из даек диабазов; 4в – руды и породы месторождения Алгама: 1 гр. – доломиты юдомской свиты; 2 гр. – дезинтегрированные доломиты; 3 гр. – циркониевые руды; конц. – гравитационные концентраты.

материал поступал из коры выветривания пород Ингилийского массива. На последнее указывает наличие мелких зерен бадделеита, содержащего примесь Hf и W (рис. 5). Кроме циркона отмечаются зерна пирита, апатита, платины. Этим же обусловлено довольно высокое содержание Au – до 0.24 г/т (обр. 210-49) при среднем 0.114 г/т. Содержание РЗЭ незначительное, но позволило получить спайдер-диаграмму (рис. 4, в), имеющую черты сходства с таковыми для рудных образцов и образцов апатитсодержащих пироксенитов Ингилийского массива. Преобладают элементы средней группы и иттрий при низком содержании Yb и Lu, со слабой отрицательной аномалией Ce и Pr, положительной Eu и Gd.

Вторая группа – брекчии дезинтегрированных доломитов с бадделеит-глинистым, либо кварцевым или кальцит-кварцевым цементом. В основном это так называемые «твердые» руды либо инфлювий карстовых пустот с преобладанием породного материала.

Таблица 2. Химический состав руд и пород месторождения Алгама (среднее по группам).

	1 гр.	2 гр.	3 гр.	4 гр.
SiO ₂	27.61	21.94	33.13	31.62
TiO ₂	0.02	0.05	0.05	0.05
Al ₂ O ₃	0.31	0.47	0.81	1.58
Fe ₂ O ₃	0.63	0.92	1.73	0.91
MnO	0.04	0.39	0.40	0.19
CaO	25.07	36.67	30.32	2.34
MgO	17.52	9.55	6.25	2.19
Na ₂ O	0.06	0.08	0.84	4.88
K ₂ O	0.02	0.09	0.10	0.04
P ₂ O ₅	0.01	0.03	0.31	0.99
ппп	31.39	33.96	27.06	7.44
сумма	102.68	104.15	101.00	52.22
Sc	0.03	0.72	13.71	111.22
V	1.79	10.48	20.64	85.28
Cr	38.01	33.61	33.08	19.19
Co	4.96	7.99	9.44	6.08
Ni	5.22	17.07	31.66	33.18
Cu	7.12	29.47	42.86	76.63
Zn	4.93	29.69	63.45	34.63
Ga	0.24	0.74	2.06	12.10
Rb	0.70	2.08	2.56	1.72
Sr	31.19	42.39	24.48	205.80
Y	0.88	4.72	31.98	119.60
Zr	135.41	643.5	8221.42	ZrO ₂ – 42.40
Nb	2.21	4.79	265.01	2402.41
Ag	5.39	0.82	13.00	124.74
Sn	0.34	0.65	0.48	0.54
Cs	0.05	0.14	0.23	0.18
Ba	3.66	300	295.85	272.30
Hf	2.61	12.81	545.43	4991.15
Ta	0.05	0.07	0.11	0.03
W	20.89	37.97	456.92	4690.05
Pb	2.73	2.95	3.61	33.49
Th	0.05	1.07	0.34	0.37
U	0.98	7.41	78.52	438.78
TR				
La	0.62	3.52	70.99	66.94
Ce	1.38	5.59	12.31	49.41
Pr	0.14	1.60	2.91	16.61
Nd	0.66	4.68	12.02	72.81
Sm	0.13	0.87	2.81	15.13
Eu	0.03	0.23	0.87	3.62
Gd	0.17	1.03	4.28	16.30
Tb	0.02	0.13	0.65	2.23
Dy	0.13	0.68	3.85	13.30
Ho	0.03	0.14	0.78	2.83
Er	0.07	0.35	1.97	8.12
Tm	0.01	0.04	0.24	1.04
Yb	0.05	0.21	1.30	6.58
Lu	0.01	0.03	0.19	0.92
Y	0.88	4.72	31.98	119.6
Сумма TR	4.33	23.82	147.15	395.44
Pd	0.001	1.87	137.88	7.09
Ir	0.33	4.11	53.81	92.79
Pt	1.17	12.18	129.43	241.14
Au	114.78	249.45	37.8	62.75

Так как это больше похоже на механическую смесь карстового инфлювия, то и содержание породообразующих элементов колеблется в значительных пределах. В целом же состав преимущественно известковый (значительное преобладание CaO над MgO). Содержание РЗЭ выше чем в доломитах (в среднем Σ TR 23.2 г/т) с преобладанием средних РЗЭ и Y. Для ряда проб характерна слабая отрицательная аномалия Ce, слабо положительная Eu и Gd, низкие значения для тяжелых (Tb, Yb, Lu) (Рис. 4, в). Усредненные содержания редких элементов приведены в таблице 2. Содержание платиноидов невысокое (в среднем 0.012 г/т при максимуме 0.04 г/т). Золото распределено неравномерно, при среднем содержании 0.24 г/т, в одной пробе достигает 1.8 г/т, и в целом это выше, чем в доломитах. В пробах высокое содержание Ba и, соответственно, барита.

Третью группу составили пробы с промышленным содержанием циркония. Представлены они дезинтегрированными доломитами в виде известково-глинистого материала, дресвы и рудных брекчий, пропитанных в различной степени интенсивности гидроксидами железа. Типичное строение руды приведено на рис. 6, где брекчированная кварц-карбонатная порода сцементирована бадделеит-глинистым цементом. Содержание РЗЭ в целом невысокое – от 20.6 до 247.3 г/т при среднем 83.24 г/т. Преобладают средние РЗЭ и Y при незначительно меньшем содержании тяжелых РЗЭ. На диаграммах распределения отмечается отрицательная аномалия по Ce и небольшие положительные аномалии Gd и Dy. Содержание редких элементов (табл. 2) в целом значительно выше, чем в пробах первой и второй групп, особенно Hf, Nb, W и U, которые в виде примесей входят в состав бадделеита и циркона. Pt в среднем 0.13 г/т при максимальном 0.57 г/т. Спорадически отмечаются довольно высокие содержания Pd до 1.06 г/т при среднем 0.14 г/т. Содержание Au несколько ниже, чем в пробах второй группы, при среднем 0.038 г/т и максимальном до 0.13 г/т.

Четвертая группа представлена пробами гравитационного концентрата в виде мелко-тонкозернистого ожелезненного песка. Изучение гранулярного состава и распределения диоксида циркония по классам крупности показало, что на 64 % руда состоит из обломков кварца и пород крупностью +1.25мм, на

Примечание. 1 гр. – доломиты юдомской свиты; 2 гр. – дезинтегрированные доломиты; 3 гр. – циркониевая руда; 4 гр. – гравитационный концентрат руды. Оксиды и ZrO₂ – в вес. %; элементы – в г/т; платиноиды и золото – в мг/т.

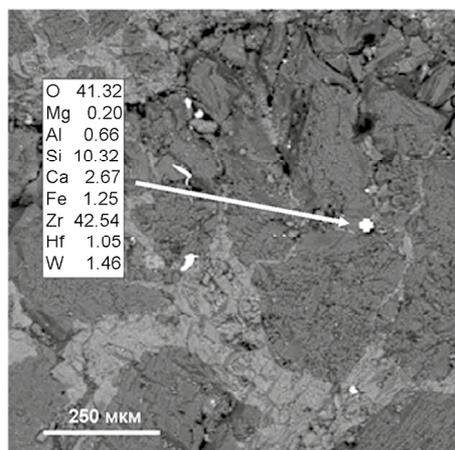


Рис. 5. Доломиты с тонкой вкрапленностью бадделлеита.

20 % – из песков продуктивной зернистой части $-1 \dots +0.044$ мм и на 16 % – из шламов -0.044 мм. Крупнообломочная часть $+1.25$ мм и песковая зернистая часть $-1+0.044$ мм обеднены цирконием. Богатыми являются шламы -0.44 мм, содержащие 7.1 % диоксида циркония. В них сосредоточены 63 % ZrO_2 от всего количества в руде. При гравитационном обогащении в тяжелую фракцию извлекается 79 % ZrO_2 . Характерно более высокое содержание редких и рудных элементов: Sc, Co, Ni, Sr, Nb, Hf, W, Th, U, платиноидов и золота по сравнению с богатыми рудами. Повышение содержания редких и рудных элементов обусловлено самим процессом гравитационного обогащения. Также повышены содержания РЗЭ от 352.5 до 454.9 г/т при среднем 395.4 г/т. Диаграмма распределения РЗЭ (рис. 4, в) с резко отрицательной аномалией Ce, что указывает на поступление материала из коры выветривания [12], с преобладанием средних лантаноидов и иттрия и незначительным понижением тяжелых РЗЭ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Промышленные (более 400 г/т) содержания по сумме РЗЭ имеют карбонатиты и апатитоносные пироксениты Ингилийского массива. В пределах же Алгаминского месторождения близки к минимально промышленным гравитационные концентраты. В рудах и вмещающих породах сумма РЗЭ не превышает 200–300 г/т. Но следует отметить, что РЗЭ в руды привнесены из коры выветривания пород Ингилийского массива. Перенос материала осуществлялся в тонкодисперсном и коллоидном состоянии. Рост концентраций РЗЭ в коре выветривания обеспечивался за счет перераспределения элементов и выноса легких РЗЭ [12]. На диаграммах распределения РЗЭ, нормированных на верхнюю континентальную кору, отмечается относительное падение концентраций элементов,

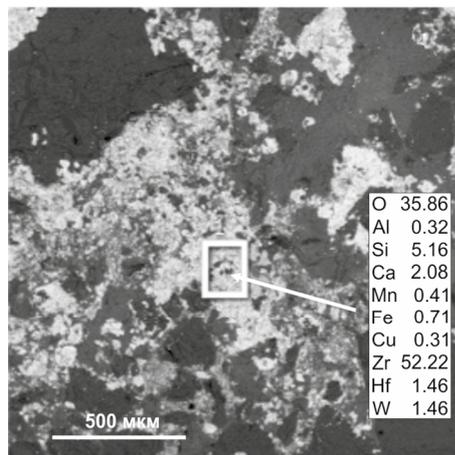


Рис. 6. Циркониевая руда. Цементирование обломков кварца и долomite тонкозернистым бадделлеит-циркониевым материалом.

прежде всего церия, и, в меньшей степени, неодима и самария, характерных для процессов первичного выветривания (рис. 4, в). При этом РЗЭ в материале перемещения из коры выветривания могли находиться в растворенном или ионно-сорбционном состоянии, легко поддающемся извлечению и обогащению.

Нами изучены по бифторидной технологии, изложенной в ранее опубликованной работе [14], две пробы руды (№№ проб 4113-2 и 4113-3) и две пробы гравитационного концентрата (КД-1 и КД-3). Результаты извлечения РЗЭ составили для руды 33–35 %, для концентрата – 45–73 %.

Технология обогащения и извлечения Zr из руд месторождения очень сложная по многоступенчатой схеме (Л.С. Вязунов, 2016 г) с применением различных кислот. Применима и бифторидная технология [4], что позволяет предположить попутное извлечения из них РЗЭ.

На площади Ингилийского массива и в его окрестностях необходимо провести поиск мест возможного захоронения коры выветривания, обогащенной РЗЭ и другими редкими металлами. Примером служит месторождение Томтор (Якутия) [13]. Там в условиях жаркого и влажного климата прошел процесс длительного (рифей–карбон) формирования коры выветривания по силикатным породам. При последующем размыве и переносе обогащенных осадков во впадины на просевшей коре выветривания по карбонатитам произошло гидрохимическое осаждение РЗЭ с образованием осадков с высоким содержанием РЗЭ (до 12 %). Процесс образования кор выветривания и их обогащения РЗЭ происходил и на Ингилийском массиве. Правда здесь больше произошло обогащение продуктов выветривания цирконием.

Щелочные комплексы пород подобных массивов могут быть источником не только общеизвестных вторичных месторождений – кор выветривания, локализованных непосредственно на материнских породах (большинство карбонатитовых массивов) или в котловинообразных депрессионных структурах, питавшихся материалом разрушенных пород по их периферии, либо в зонах перемыва и переотложения корового материала, но и рудопроявлений, связанных с хемогенным выносом рудного материала. Перенос происходил в обводненных условиях, способствовавших выносу, растворению и рассеиванию материала [2]. Областью фиксации вещества могут быть структурно благоприятные участки, находящиеся как в пределах массива, так и удаленные на много километров от массива. Об этом свидетельствуют гидрохимические аномалии La севернее Алгаминского месторождения. По материалам исследователей, на Ингилийском массиве на существующем в настоящее время эрозионном срезе практически отсутствует сколько-нибудь значимая по мощности кора выветривания. Но необходимо проверить на возможное наличие погребенного материала коры выветривания, особенно вдоль даек диабазов. Там, из-за положительных форм рельефа даек, вдоль них возможно отложение перенесенного материала.

Распределение *редких и рудных элементов* в рудах Алгаминского месторождения связано с их геохимическими особенностями и связями с корой выветривания пород Ингилийского массива. Карбонатиты массива и апатитоносные пироксениты содержат проявления с промышленным Ta-Nb-La, Ce, Sr, Th, U, платиноидным и апатитовым оруденением [4, 9]. Эти же элементы и составили основной массив редкометалльных примесей в рудах месторождения.

Hf изоморфно замещает Zr в бадделеите и цирконе. Это же, частично, относится к W, U, Y, Th, которые входят в состав циркониевых минералов месторождения и массива. Их отсутствие в цирконах гранитов и других пород, не связанных с Ингилийским массивом, – характерная особенность. Никаких собственных минералов ниобия, включая породы массива, не обнаружено. Вольфрам в рудах месторождения отмечается не только в виде изоморфной примеси в бадделеите, но и в виде мельчайших зерен шеелита. Разработана технология попутного извлечения оксида вольфрама (Л.С. Вязунов, 2016 г). Уран присутствует тоже не только в изоморфной форме, но и виде коффинита, который находится в виде мелких включений в цирконе и бадделеите [6]. Источником платиноидов и золота в рудах и вмещающих доломитах также являются породы массива, в которых известны проявления этих металлов. Если платиноиды поступали пре-

имущественно как терригенный материал, то золото, возможно, и в коллоидной форме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание РЗЭ в рудах Алгаминского рудопроявления невысокое. Основные источники РЗЭ, редких и благородных металлов в рудах – древние коры выветривания пород Ингилийского массива. Аналогия процессов образования коры выветривания на Ингилийском массиве и на месторождении Томтор в Якутии [13], их длительность и обогащение полезными компонентами позволяют рекомендовать поиски погребенной коры выветривания как в пределах массива (ложбины выветривания над карбонатитами), так и за его пределами (вдоль выступов даек диабазов).

Благодарности. Автор благодарит Н.В. Бердникова за помощь в компьютерной обработке материала, В.Е. Кузнецова, нач. геол. отдела АО «Дальгеология» и В.В. Оskarева, бывшего гл. геолога Алгаминской партии за консультации и передачу проб и образцов для исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасаров Ю.А., Потоцкий Ю.П., Зинкова О.Н. Бадделитсодержащие пластовые тела среди древних карбонатных толщ – новый возможный тип месторождений циркония // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315, № 3. С. 670–673.
2. Багдасаров Ю.А. Ингилийско-Алгаминский узел Восточного Алдана // Отеч. геология. 1994. № 1. С. 18–28.
3. Бирюков В.М. Магматические комплексы линейного и концентрического типов. Владивосток: Дальнаука, 1997. 267 с.
4. Буряк В.А., Беспалов В.Я., Гагаев В.Н. и др. Новый геолого-промышленный тип циркониевого оруденения (условия образования, перспективы использования). Хабаровск, 1999. 216 с.
5. Быховский Л.З., Тигунов Л.П., Левченко Е.Н. и др. Цирконий и гафний России: современное состояние, освоение и развитие минерально-сырьевой базы // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. М.: ВИМС, 2007. № 23. 127с.
6. Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Кирилов В.Г. Металлогения урана Дальнего Востока России. М.: Наука, 2006. 372 с.
7. Кузнецов В.Е. Сравнительная характеристика глубинной тектоники Алдано-Майской и Курумбинской рифтовых зон Сибирской платформы в связи с проблемой их нефтегазоносности // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. X Косыгинские чтения: Материалы Всерос. конф. с межд. участием, 10–12 сентября 2019. г. Хабаровск. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2019. С. 331–334.
8. Левченко Е.Н., Ожогина Е. Г. Минералогия бадделит-циркониевых руд Алгаминского месторождения // Разведка и охрана недр. 2016. № 3. С. 43–47.
9. Мильто А.Н. Государственная геологическая карта. 1: 200 000. Лист О-53-Х. 1961.
10. Некрасов И.Я., Коржинская В.С. Новый генетический тип вольфрам-циркониевой минерализации // Минерал.журн. 1991. Т. 13. С. 7–17.

11. Пахомова В.А., Залищак Б.Л., Коржинская В.С., Афанасьева Т.Б., Лапина М.И. Генетические особенности формирования гельциркон-бадделеитовых руд по данным термобарогеохимии (на примере месторождения Алгама, Хабаровский край) // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. 278 с.
12. Тейлор С.Р. Мак-Лениан С.М. Континентальная кора: её состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
13. Толстов А.В., Коноплев А.Д., Кузьмин В.И. Особенности формирования уникального редкометального месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 20–26.
14. Черепанов А.А., Гостищев В.В. Углеродистые сланцы Буреинского массива как возможный источник редкоземельных металлов // Руды и металлы. 2017. № 3. С. 68–76.

*Рекомендована к печати В.Г. Хомичем
после доработки 1.07.2021 г.
принята к печати 26.09.2021 г.*

A.A. Cherepanov

Rare-earth elements, noble and rare metals in ores of the Algaminskoe zirconium occurrence (Khabarovsky Krai)

Samples of the ore and gravity concentrate from the Algaminskoe zirconium occurrence were studied. Concentrations of rare-earth elements (REE), rare and noble metals were determined. REE content in the ore is 200–300 g/t, with 400 g/t in the gravity concentrate. REE distribution diagrams clearly show Ce depletion and the predominance of intermediate lanthanides and yttrium. The ore and the concentrate contain elevated Hf, W, U, Ta, Au, and Pt, most of which are present in the form of isomorphic admixture in baddeleyite and zircon. Their source is the ancient weathering crust of peralkalic rocks of the Ingili massif. The suggestion has been made that there should be a buried weathering crust enriched in valuable components.

Key words: zirconium, baddeleyite, rare-earth elements, rare metals, gold, platinum, weathering crust, Algaminskoe deposit, Ingili massif, Khabarovsky krai, Far East Russia.