

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья

УДК 553.3

doi: 10.17223/25421379/35/5

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦИРКОНА ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД, АССОЦИИРУЮЩИХ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ ОРУДЕНЕНИЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТАЛЛОВ



Юрий Олегович Редин¹, Александра Владиславовна Малюткина²,
Владислав Федорович Дульцев³

^{1,2,3} *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *redin@igm.nsc.ru*

² *malyutina@igm.nsc.ru*

³ *dultsev@igm.nsc.ru*

Аннотация. На представительном фактическом материале были установлены индикаторные особенности циркона из рудоносных комплексов Восточного Забайкалья, которые показали высокую эффективность в определении рудоносности гранитоидов. Значения аномалий Ce и Eu, а также Yb/Dy в цирконах могут быть использованы в качестве показателей степени окисленности магм. Так, рудоносными на «классический» порфиновый тип оруденения в Восточном Забайкалье могут являться магматические породы $Ce/Ce^* > 100$, $Eu/Eu^* > 0,4$, $Yb/Dy > -4,0-5,0$ и $(Ce/Nd)/Y > 0,01$. Комплексное рассмотрение редкоземельного состава циркона и магнитной восприимчивости пород также можно использовать в качестве поискового критерия на порфиновый тип, а также на некоторые другие типы оруденения. Как показывает исследование, высокие значения магнитной восприимчивости ($> 1,0 \times 10^{-3}$ SI) магматических пород указывают на окислительные условия их образования, благоприятные для формирования Au-Cu-Fe скарново-порфирового, порфирового и Au-полиметаллического типов оруденения.

Ключевые слова: *рудоносность, типохимизм, циркон, магнитная восприимчивость, Восточное Забайкалье, условия формирования*

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках госзадания ИГМ СО РАН (122041400237-8) (петрографические исследования, и определение магнитной восприимчивости). Исследования цирконов методом LA-ICP-MS выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 13.1902.21.0018

Для цитирования: Редин Ю.О., Малюткина А.В., Дульцев В.Ф. Геохимический состав циркона из различных магматических пород, ассоциирующих с разными типами оруденения (Восточное Забайкалье): разработка инновационных методов прогноза и поисков месторождений металлов // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 61–71. doi: 10.17223/25421379/35/5

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/5

GEOCHEMICAL COMPOSITION OF ZIRCON FROM VARIOUS IGNEOUS ROCKS ASSOCIATED WITH DIFFERENT TYPES OF MINERALIZATION (EASTERN TRANSBAIKALIA): DEVELOPMENT OF INNOVATIVE METHODS FOR FORECASTING AND SEARCHING FOR METAL DEPOSITS

Yury O. Redin¹, Alexandra V. Malyutina², Vladislav F. Dultsev³

^{1,2,3} *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Russia*

¹ *redin@igm.nsc.ru*

² *malyutina@igm.nsc.ru*

³ *dultsev@igm.nsc.ru*

Abstract. The indicator features of zircon from the ore-bearing complexes of Eastern Transbaikalia were established relying on representative factual basis. These features were demonstrated to be highly efficient for determining the potential ore content of granitoids. The values of Ce and Eu anomalies, as well as Yb/Dy in zircons, may be used as indicators of magma oxidation level. Thus, the magmatic rocks of Eastern Transbaikalia with $Ce/Ce^* > 100$, $Eu/Eu^* > 0.4$, $Yb/Dy > \sim 4.0-5.0$ and $(Ce/Nd)/Y > 0.01$ may be bearing the classical porphyry type of mineralization. The integrated consideration of the rare earth element composition of zircon and magnetic susceptibility of rocks also may be used as a criterion to search for porphyry type, as well as for some other types of mineralization. It is demonstrated that the high values of magnetic susceptibility ($> 1.0 \times 10^{-3} SI$) of magmatic rocks point to the oxidative conditions of rock formation, favorable for the formation of Au-Cu-Fe skarn-porphyry, porphyry and Au-polymetallic types of mineralization.

Keywords: mineralization, typochemism, zircon, magnetic susceptibility, Eastern Transbaikalia, formation conditions

Source of financing: Determining petrographic studies was supported by state assignment of the VS Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. The LA-ICP-MS study of zircons was carried out with the financial support of the project of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 13.1902.21.0018 (agreement 075-15-2020-802).

For citation: Redin Yu.O., Malyutina A.V., Dultsev V.F. (2025). Geochemical composition of zircon from various igneous rocks associated with different types of mineralization (Eastern Transbaikalia): development of innovative methods for casting and searching for metal deposits. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 61–71. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/5

Введение

В международном геологическом сообществе в течение последних лет активно обсуждается направление исследований (PIMS), нацеленное на выявление признаков фертильности (рудности) магматических образований. Комплексное исследование индикаторных особенностей элементного состава (типохимизма) обширного круга минералов является важным элементом генетических и прогнозно-поисковых моделей. К основным решаемым задачам относится определение индикаторных особенностей аксессуарных минералов (циркона) рудоносных гранитоидных массивов на скарновый или совмещенный скарново-порфировый (Лугоканский, Култуминский, Быстринский массивы), порфировый (Бугдаинский и Шахтаминский массивы), редкометалльный грезейновый (Белухинский и Олдонинский массивы), золото-полиметаллический (Антиинский, Тургинский и Лугинский массивы) типы оруденения, а также «безрудных» гранитоидных массивов (массивы ундинского комплекса). В ряде вышедших в свет за последнее десятилетие работ приводятся статистически подтвержденные данные о специфических характеристиках циркона для различных типов месторождений, а также аксессуарных Fe-содержащих минералов. К основным задачам относится сравнительный анализ состава аксессуарных минералов рудоносных и «безрудных» гранитоидных массивов. Полученные данные будут «фундаментом» для решения основной цели, а именно разработки инновационных методов прогноза и поисков месторождений металлов, имеющих большое значение для высокотехнологической промышленности. Решение всех этих задач и определяет актуальность и новизну проводимых исследований.

Первостепенное внимание уделялось крупным комплексным месторождениям, которые могут рассматриваться как перспективные на обнаружение критических видов минерального сырья. К таким месторождениям относятся: Cu-Mo, Mo-W-золотосодержащие порфировые месторождения, которые потенциально могут служить одним из основных источников Re – металла, имеющего стратегическое значение для России. Руды этих типов месторождений потенциально перспективны и на многие другие критические металлы: Ga, Bi, In, Cd и др. Однако их содержания и запасы требуют уточнения.

Другие не менее важные типы – Fe-Cu-Au (Быстринское, Култуминское, Лугоканское и др.) и Pb-Zn-скарновые месторождения, которые являются центральным звеном в цепочке многочисленных скарновых месторождений и рудопроявлений Центрально-Азиатского подвижного пояса. Руды этих месторождений потенциально перспективны на РЗЭ и другие критические металлы [Бортников и др., 2016]. Еще одним перспективным типом главных промышленных поставщиков многих критических металлов (In, Cd, Ge, Ga, Te, Se) являются полиметаллические месторождения, некоторые из них связаны с порфировыми и скарновыми системами. Несколько крупных рудных районов с многочисленными месторождениями этого типа известны на территории Забайкальского края (Нерчинский, Газимуровский, Александрово-Заводский).

Методы исследований

Микрокомпонентный состав цирконов был определен методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific Ltd, США) с эксимерной системой лазерной

области Analyte Excite (Teledyne Cetac, США), оснащенной двухкамерной ячейкой HeEx II. Диаметр лазерного луча составлял 50 мкм, частота повторения импульсов 5 Гц и плотность энергии лазерного излучения 3 Дж/см². Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала ²⁰⁸Pb при минимальном значении ²⁴⁸ThO⁺/²³²Th⁺ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Для U-Pb изотопного датирования измерения выполняли по массам ²⁰²Hg, ²⁰⁴(Pb+Hg), ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²³²Th, ²³⁸U. Для определения микроэлементного состава цирконов сканирование выполняли по массам ³¹P, ⁴⁴Ca, ⁴⁹Ti, ⁸⁵Rb, ⁸⁸Sr, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ⁹³Nb, ¹³⁸Ba, ¹³⁹La, ¹⁴⁰Ce, ¹⁴¹Pr, ¹⁴⁶Nd, ¹⁴⁷Sm, ¹⁵³Eu, ¹⁵⁷Gd, ¹⁵⁹Tb, ¹⁶³Dy, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁶Er, ¹⁶⁹Tm, ¹⁷²Yb, ¹⁷⁵Lu, ¹⁷⁸Hf, ¹⁸¹Ta, ²³²Th, ²³⁸U. Съемка проводилась в режиме E-scan. Детектирование сигналов проводилось в режиме счета для всех изотопов, кроме ³¹P, ⁴⁴Ca, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ¹⁷⁸Hf, ²³²Th и ²³⁸U, для которых использовался трехканальный режим работы. Zr использовался в качестве внутреннего стандарта с учетом стехиометрических значений циркона для калибровки концентраций микроэлементов в цирконах. Стандарты анализировались на протяжении всей съемки, чтобы обеспечить коррекцию дрейфа. Стандарт силикатного стекла NIST 610 использовался для мониторинга микроэлементного состава для оценки точности анализов.

Данные масс-спектрометрических измерений, в том числе расчет изотопных отношений, обрабатывали с помощью программы Glitter. Для учета элементного и изотопного фракционирования U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов Plešovice. Расчет содержаний элементов в цирконах проводился с использованием внешней градуировки по стандарту NIST SRM610 и изотопа ⁹¹Zr в качестве внутреннего стандарта. Стандартный природный циркон GJ-1 использовался в качестве вспомогательного стандарта. Погрешности единичных анализов приведены на уровне 1σ.

Цирконы были выделены из магматических пород, развитых на Лугоканском, Култуминском, Быстринском, Шахтаминском, Бугдаинском (как из вмещающей рамы, так и из потенциально рудоносных магматических пород шахтаминского комплекса), Антиинском, Ноцуйском, Лугиинском, Белухинском, Антоновогорском месторождениях, а также из «безрудных» гранитоидных массивов ундинского комплекса. Для определения морфологии и внутреннего строения цирконов использовались катодоллюминесцентные изображения (CL), полученные с помощью электронного микроскопа (LEO-1430VP). Содержания редких и редкоземельных элементов локально определялись методом LA-ICP-MS.

Оценка магматического происхождения анализируемых цирконов проводилась по визуальной оценке C1-нормированного спектра распределения PЗЭ [Lu et al., 2016]. Из 530 проанализированных цирконов в дальнейшем были исключены 100 анализов (согласно требованиям по [Lu et al., 2016]).

Содержание окисного и закисного железа было определено методом фотометрии «методом мокрая химия».

Геологический очерк

В пределах Восточного Забайкалья известно большое количество золоторудных, золотосодержащих, полиметаллических, редкометалльных и других месторождений и рудопроявлений. Особенности металлогении, проблемы генезиса различных типов месторождений этого региона исчерпывающе изложены во многих монографиях, статьях и фондовых материалах [Козлов, 2009; Берзина и др., 2013; Редин и др., 2017, 2018; Редина и др., 2019; Redin et al., 2022, 2023]. Ввиду этого мы дадим лишь краткий геологический очерк относительно изучаемых месторождений.

Шахтаминский интрузивный комплекс выделен Ю.А. Билибиным и длительное время изучался многими геологами. К нему относятся штоки, лакколиты и дайкообразные тела умеренно кислого и среднего состава. Обычно это типично трещинные или полусогласные тела. Их размещение контролируется участками пересечения зон разрывных нарушений различного простирания. С магматическими породами шахтаминского комплекса многие исследователи связывают промышленное молибденовое, полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золотое оруденение, а также проявления мышьяка, сурьмы и других металлов [Спиридонов и др., 2006]. Интрузивные образования шахтаминского комплекса широко распространены в пределах Аргунской и Агинской зон Забайкалья.

Агинская рудная зона. В пределах Агинской тектонической зоны расположен Кукульбейский рудный район (юго-восточное Забайкалье), рассматриваемый в качестве самостоятельной минерально-сырьевой базы вольфрама Забайкалья. В этом старейшем рудном узле в сороковых-пятидесятых годах эксплуатировались Букуинское, Белухинское, Антоновогорское и другие месторождения. Помимо редкометалльного оруденения в Кукульбейском районе также известны месторождения (Антиинское, Кирченновское и др.) и многочисленные рудопроявления золота, генетически связанные с магматическими породами шахтаминского комплекса.

Белухинское месторождение. Белухинское месторождение расположено в экзоконтактовой зоне

одноименного гранитного массива. Массив сложен преимущественно биотитовыми и амфибол-биотитовыми гранитами второй и третьей фазы шахтаминского комплекса, которые прорывают гранодиориты ундинского комплекса. Для исследований были отобраны цирконы из биотит-амфиболовых гранитов второй и третьей фазы шахтаминского комплекса, так и вмещающих гранодиоритов ундинского комплекса.

Антиинское месторождение. Антиинское золоторудное месторождение приурочено к одноименному массиву шахтаминского комплекса и находится

примерно в 40 км на юго-запад от Белухинского месторождения. Центральная и восточные части массива сложены граносиенитами и гранодиоритами с переходами до гранитов, а западная и северная – кварцевыми монцодиоритами и монцодиоритами. Для исследований были выделены цирконы из кварцевых монцодиоритов, отобранных в северной части (район Антиинского месторождения) Антиинского массива.

Ноцуйское месторождение аналогично Антиинскому и приурочено к граносиенитам и гранодиоритам шахтаминского комплекса.

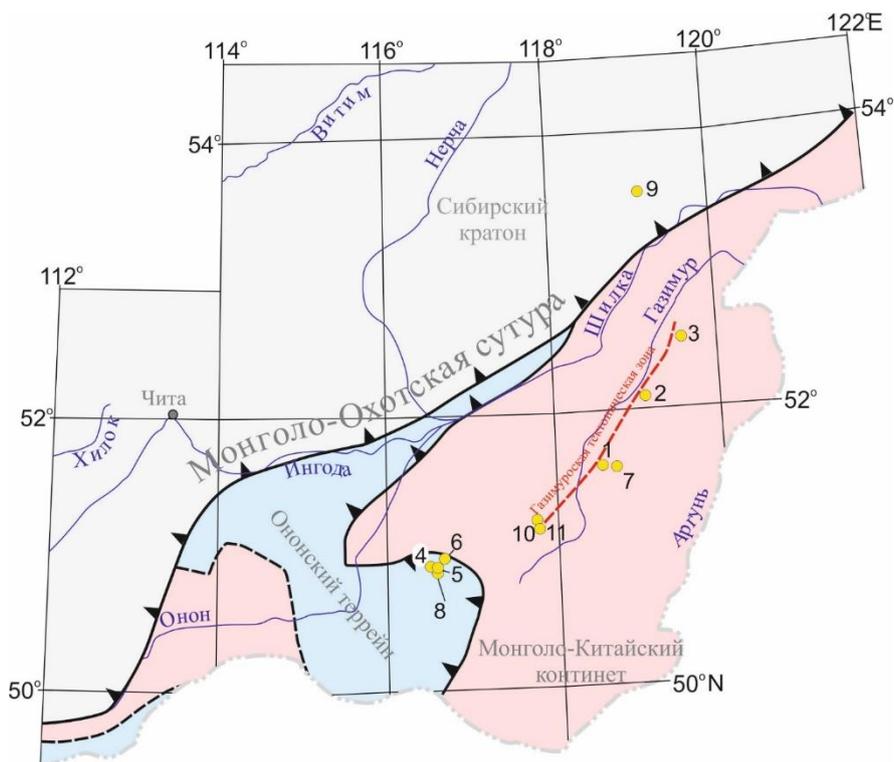


Рис. 1. Схема расположения исследуемых месторождений

1 – Быстринское; 2 – Култуминское; 3 – Лугоканское; 4 – Ноцуйское; 5 – Антоновогорское; 6 – Белухинское; 7 – Лугинское; 8 – Антиинское; 9 – Александровское; 10 – Шахтаминское; 11 – Бугдаинское

Fig. 1. Scheme of location of the studied deposits

1 – Bystrinskoye; 2 – Kultuminskoye; 3 – Lugokanskoye; 4 – Notsuyskoye; 5 – Antonovogorskoye; 6 – Belukhinskoye; 7 – Luginskoye; 8 – Antiinskoye; 9 – Aleksandrovskoye; 10 – Shakhtaminskoye; 11 – Bugdainskoye

Аргунская рудная зона. Территория Аргунской зоны характеризуется широким развитием в ее пределах золото-медно-железо-скарновых, порфириновых (и комплексных, например, золото-порфириновых) и золото-полиметаллических месторождений. Au-Cu-Fe-скарновые месторождения расположены главным образом в северо-восточной и юго-восточной частях Шилка-Аргунского междуречья. К наиболее крупным относятся Быстринское, Култуминское и Лугоканское месторождения. Все месторождения приурочены к Газимуровской региональной тектонической

зоне и парагенетически связаны со становлением магматических пород шахтаминского комплекса.

Лугоканское месторождение. Месторождение приурочено к одноименному массиву шахтаминского комплекса. Вмещающие породы представлены карбонатно-терригенными отложениями нижнего кембрия (быстринская свита E_{1bs}). Оруденение приурочено к скарнам и в меньшей степени к карбонатным породам (подвергшимся интенсивной тектонической проработке), редко к гранодиорит-порфирам. Лу-

гоканский массив сложен преимущественно гранодиоритами и гранодиорит-порфирами второй фазы шахтаминского комплекса. Цирконы были выделены из гранодиоритов и гранодиорит-порфириров.

Быстринское месторождение. В геологическом строении месторождения принимает участие серия свит палеозойско-мезозойского возраста, которые прорываются средне-верхнеюрскими интрузивными породами шахтаминского комплекса. Рудовмещающими толщами являются кембрийские, девонские терригенно-карбонатные отложения и раннеюрские терригенные отложения. На контактах с интрузивными телами шахтаминского комплекса вмещающие известняки и доломиты скарнируются вплоть до образования гранатовых, пироксеновых, амфиболовых и флогопитовых скарнов. Основным рудоконтролирующим фактором на территории Быстринского месторождения является комплексная многоэтапная и разнопорядковая система складчато-разрывных нарушений, выраженная серией протяжённых (простирающихся с севера на юг), долгоживущих разрывных нарушений и сложной системой опережающих разломов меньшего порядка [Спиридонов и др., 2006]. Быстринский массив сложен крупным штоком диоритов (монцититов) первой фазы шахтаминского интрузивного комплекса ($J_2-3\delta$) и относительно мелкими штокообразными телами гранодиорит-порфириров и диоритовыми порфирами второй фазы шахтаминского комплекса. Для исследований были отобраны несколько разновидностей магматических пород, широко развитых в пределах месторождения: монцититы, монцитит-порфиры, диорит-порфиры и гранодиориты.

Култуминское месторождение является одним из крупнейших и наиболее представительных месторождений Au-Cu-Fe-скарнов, расположенных в Восточном Забайкалье. Оно локализовано в пределах Газимуровской металлогенической зоны и приурочено к одноименному массиву Шахтаминского комплекса, сложенному монцитит-порфирами второй фазы. Основное промышленное оруденение тяготеет к эндо- и экзоконтактным зонам скарнов гранитоидного массива и ороговикоманым и скарнированным терригенно-карбонатным породам быстринской свиты и ерниченской толщи.

К порфирировым месторождениям относятся Шахтаминское и Бугдаинское месторождения.

Бугдаинское месторождение приурочено к центральной части очаговой вулканокупольной структуры. Эта структура осложнена интерферирующими кольцевыми структурами меньшего диаметра, контролирующими положение рудных тел: штоками гранит-порфириров, которые относятся к шахтаминскому

интрузивному комплексу. Вмещающие породы представлены биотит-роговообманковыми гранитами и гранодиорит-порфирами ундинского комплекса. Рудоносными магматическими породами являются риолит-порфиры и гранит-порфиры шахтаминского комплекса. Цирконы для исследований были выделены из аляскит-порфириров шахтаминского комплекса (рудоносные) и вмещающих гранодиорит-порфириров ундинского комплекса.

Шахтаминское месторождение относится к группе существенно молибденовых месторождений Cu-Mo-порфирировой формации. Пространственно и во времени оруденение связано с мелкими телами (штоками, дайками) порфириров, сформированных на завершающем этапе магматизма. В Шахтаминском массиве доминируют породы, варьирующие по составу от монцититов до гранитов. Основное молибденовое оруденение представлено серией кварцевых жил близширотного простирания и прожилковой минерализацией штокверкового типа.

Лугинское месторождение расположено в Широкинском рудном поле. Месторождение приурочено к сравнительно узкой полосе юрских отложений шадоронской и олон-борзинской серий. В строении этих серий участвуют несколько свит, непосредственно на месторождении наблюдаются выходы двух из них: государственная свита (олон-борзинская серия), которая представлена песчаниками, алевролитами, аргиллитами и конгломератами, и кипринская свита (шадоронская серия), сложенная дацитами, андезитобазальтами, туфами, прослоями туфопесчаников и туфоконгломерато-брекчиями. Субвулканические интрузии шадоронского комплекса на месторождении развиты повсеместно и представлены в основном андезито-дацитами, дацитами, кварцевыми диоритовыми порфирирами, гранодиорит-порфирами, дайками кварцевых диоритовых порфириров, диоритовыми порфирирами. Вся гамма этих пород прорывается дайками гранит-порфириров и гранодиоритами шахтаминского рудоносного комплекса. Гранодиориты в юго-восточной части месторождения образуют крупный шток (Лугинский), границы которого выходят далеко за пределы месторождения. Минерализованные зоны приурочены к тектонически нарушенным и гидротермально измененным субвулканическим и вулканогенно-осадочным породам. Цирконы для исследований были выделены из биотит-роговообманковых гранитов, биотит-роговообманковых гранодиоритов и роговообманковых гранит-порфириров Лугинского массива.

Дайланор-Газимуровская-Олекминская минерогеническая зона. В этой зоне располагается

основная масса крупных рудных узлов Au, Mo, U, Pb-Zn, Cu и флюоритовой минерализацией.

Александровское месторождение расположено в пределах золото-молибденового пояса. Основную роль в геологическом строении играют гранитоидные породы палеозойского и мезозойского возраста. Породы рудоносного амуджикано-сретенского комплекса (J₂-K₁) представлены интрузиями порфировидных гранитоидов и умеренно щелочных крупно-порфировых гранитов и гранит-порфиров. Заключительная дайковая серия представлена протяженными крутопадающими телами северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания. Среди них описаны гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры, субщелочные лейкократовые гранит-порфиры и др. На месторождении золотое оруденение представлено серией золотосодержащих пирит-кварцевых жил, а также несколькими участками компактного распространения золотоносных турмалин-пирит-кварцевых, халькопирит-сфалерит-галенит-кварцевых жил и зон пиритизации в гидротермально измененных диоритах. Золотоносные жилы пространственно тяготеют к дайкам амуджикано-сретенского комплекса, имея с ними близкие элементы залегания. Молибденит-кварцевая ассоциация имеет незначительное распространение и представлена редкими прожилками мощностью до 1 см. Цирконы были отобраны из измененных магматических пород амуджикано-сретенского комплекса.

Обсуждение результатов

Как уже говорилось ранее, в последнее время для определения рудоносного потенциала магматических пород стали широко использоваться данные о химическом составе циркона (Ce/Ce*, Eu/Eu*, Yb/Dy, (Ce/Nd)/Y) (рис. 2). В частности, было установлено, что величина аномалий Ce и Eu изменяется в зависимости от fO_2 в расплаве и наиболее потенциально рудоносными на порфировый тип оруденения являются магматические породы с высокими значениями Ce/Ce* и Eu/Eu* [Ballard et al., 2002; Burnham, Berry, 2012; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Zhong et al., 2019; Wen et al., 2020]. Другими признаками, которые отражают окислительно-восстановительную обстановку формирования магматических пород, являются значения Fe₂O₃/FeO, акцессорные минералы (ильменит/магнетит) и магнитная восприимчивость пород. На основе первых двух параметров мы попытаемся разработать инновационные методы поиска и прогноза месторождений на различные типы. Для удобства разделим их на несколько групп: в первую группу будут входить собственно порфировые месторождения (Шахтаминское, Бугдаинское и Алексан-

дровское), во вторую – месторождения совмещенного типа, такие как скарново-порфировые (Лугоканское, Култуминское и Быстринское), в третью группу входят редкометалльные (грезейновые) (Белухинское и Антоноговское) и в четвертую – Au-полиметаллические месторождения. Для сравнения мы берем условно безрудные гранитоиды ундинского комплекса.

Наиболее ярким представителем первой группы является Бугдаинское и Александровское месторождения (таблица).

На *Бугдаинском* месторождении были изучены две популяции цирконов – цирконы из вмещающих гранитоидов ундинского комплекса (в таблице выделены курсивом) и цирконы из шахтаминского комплекса.

Как видно из таблицы, цирконы из вмещающих гранитоидов характеризуются относительно низкими (здесь и далее приводятся средние значения по пробам) Eu/Eu* (0,21), и Ce/Ce* (126), в то время как для рудоносных гранитоидов установлено относительно высокое Eu/Eu* (0,57) и чуть более низкое Ce/Ce* (63).

Цирконы из магматических пород *Александровского* месторождения также имеют высокое Eu/Eu* – от 0,49 до 0,68 и высокое Ce/Ce* – от 202 до 372. В то же время цирконы, выделенные из магматических пород, развитых на *Шахтаминском* месторождении, имеют более низкие отношения Eu/Eu* 0,27 и Ce/Ce*. Низкие отношения Eu/Eu*, скорее всего, говорят о том, что данные породы не являются рудоносными на порфировый тип. На Шахтаминском месторождении развита большая гамма пород, и, по всей видимости, наши образцы были отобраны не из рудоносных разновидностей.

Резюмируя, можно отметить, что для цирконов из магматических пород, развитых на месторождениях Мо-(Au)-порфирового типа характерной чертой является высокое Eu/Eu* > 0,4, так же, как и для других порфировых месторождений мира, но более низкое отношение Yb/Dy < 5. В этой связи индикаторное значение для данного типа месторождений является высокое Eu/Eu* отношение.

Ко второй группе относятся скарновые и скарново-порфировые месторождения. Рассмотрим их на примере Быстринского месторождения, где совмещены в пространстве два типа оруденения – скарновое и порфировое. Так, рудоносными на Au-Fe-Cu-порфировый тип являются породы, которые обладают высокими значениями Eu/Eu* (> 0,4), Ce/Ce*, Yb/Dy (> 5,0). В то время как магматические породы, ответственные за скарновое оруденение, характеризуются более низкими значениями Eu/Eu* (< 0,4), Ce/Ce*, Yb/Dy (< 5,0).

Эта закономерность наиболее ярко выражена на Быстринском месторождении. Для сравнения возьмем еще два ярких представителя скарновых месторождений – Култуминское и Лугоканское. Цирконы из магматических пород, указанных выше, характеризуются также низкими значениями Eu/Eu^* ($< 0,4$), Ce/Ce^* , Yb/Dy ($< 5,0$), что отражает окислительно-восстановительную обстановку формирования магматических пород – степень окисления расплавов не была достаточно высокой, чтобы сгенерировать продуктивную порфировую минерализацию. Обусловило формирование наличие магматических пород с высокими значениями Eu/Eu^* ($> 0,4$), Ce/Ce^* , Yb/Dy ($> 5,0$) обусловило формирование комплексного скарново-порфирового оруденения.

К третьей группе относятся два месторождения – Белухинское и Антоновогорское. На Белухинском месторождении изучались две популяции цирконов: из вмещающих ундинских гранитоидов и рудоносных шахтаминских гранитоидов. Так, биотит-амфиболовые граниты (ундинский комплекс) характеризуются низкими Eu/Eu^* , Ce/Ce^* и относительно высокими Yb/Dy значениями. В то время как рудоносные гранитоиды характеризуются $Eu/Eu^* > 0,4$ и относительно низкими Ce/Ce^* и Yb/Dy (см. таблицу). Рудоносные гранитоиды, развитые на Антоновогорском месторождении, также характеризуются $Eu/Eu^* > 0,4$ и относительно низкими Ce/Ce^* и Yb/Dy (в отличие от таковых для порфировых месторождений). В целом можно с уверенностью сказать, что для обоих месторождений индикаторными значениями являются $Eu/Eu^* > 0,4$.

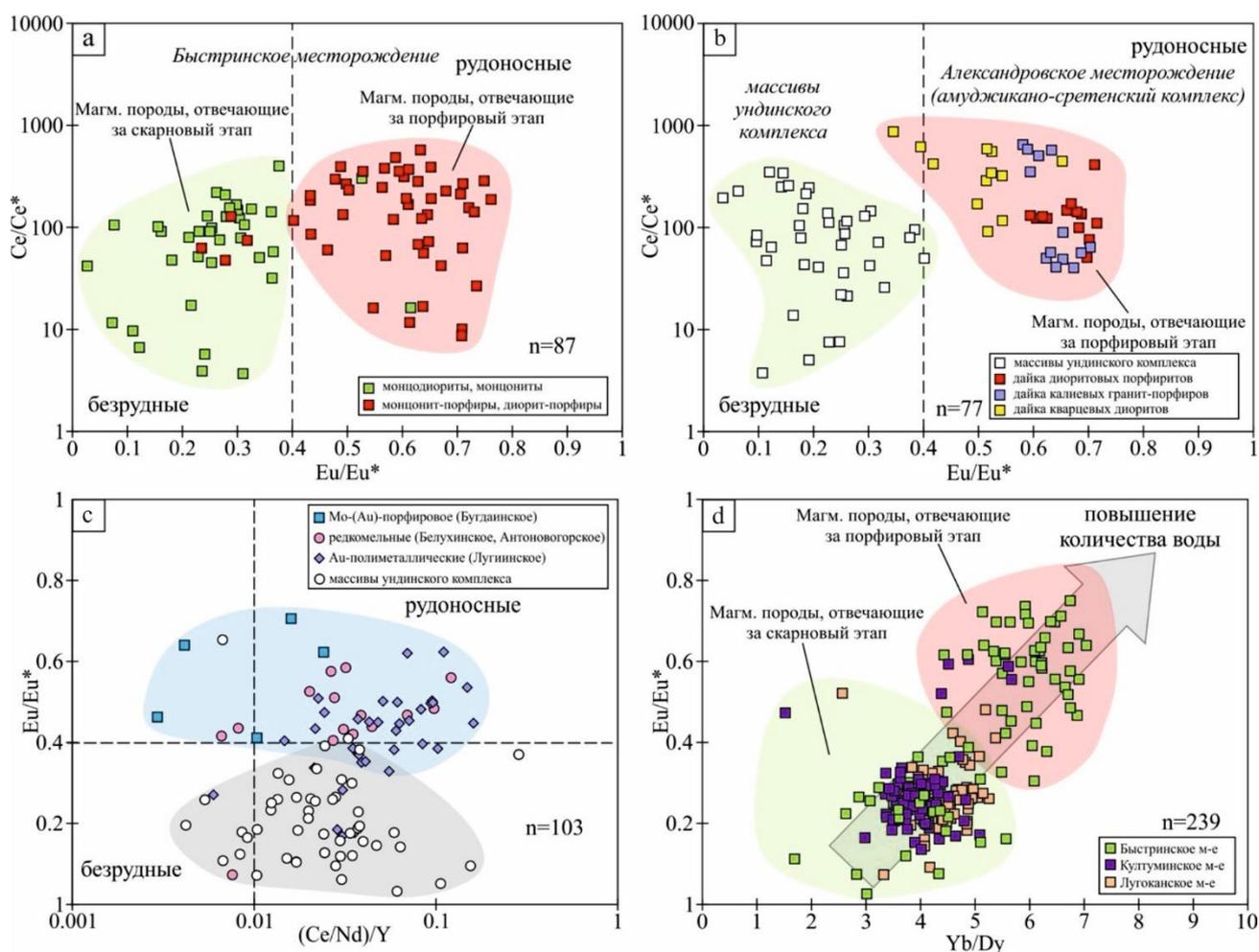


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы для разделения магматических пород на рудоносные (фертильные) и безрудные

a–b – в координатах Ce/Ce^* vs Eu/Eu^* ; b–c – в координатах Eu/Eu^* vs $(Ce/Nd)/Y$; d – в координатах Eu/Eu^* vs Yb/Dy [Ballard et al., 2002; Burnham, Berry, 2012; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Zhong et al., 2019; Wen et al., 2020]

Fig. 2. Discrimination diagrams for dividing igneous rocks into ore-bearing and non-ore-bearing

a–b – Ce/Ce^* vs Eu/Eu^* ; b–c – Eu/Eu^* vs $(Ce/Nd)/Y$; d – Eu/Eu^* vs Yb/Dy [Ballard et al., 2002; Burnham, Berry, 2012; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Zhong et al., 2019; Wen et al., 2020]

Результаты LA-ICP-MS цирконов и «мокрая химия»

Zircon LA-ICP-MS Results and chemistry

Тип месторождения	Месторождение	Породы	Eu/Eu* (ср. зн.)	Ce/Ce* (ср. зн.)	Yb/Dy (ср. зн.)	Fe ₂ O ₃ /FeO		
Au(±Mo,W)- Порфировые	Бугдаинское	Аляскит-порфиры	0,57	63,4	2,83	Нет данных		
		<i>Вт-гранит</i>	0,26	76,3	2,7	Нет данных		
		<i>Монцодиориты</i>	0,14	189,1	4,75	0		
	Александровское	Диоритовые порфиры	0,49	372,1	3,48	Нет данных		
		К-граниты	0,65	202	2,45	Нет данных		
		Q-диориты	0,68	137	2,89	Нет данных		
	Шахтаминское	Гранодиориты	0,27	126	3,54	Нет данных		
Au-Cu-Fe- скарновые	Быстринское	Монцонит-порфиры	0,44	159	5,16	0,35		
		Монцодиориты	0,3	122,2	3,51	Нет данных		
		Монцодиорит-порфиры	0,64	138,1	5,87	0,55		
		Тоналит-порфиры	0,6	176,5	5,79	0,44		
		<i>Гранодиориты</i>	0,23	191,6	4,93	Нет данных		
		Монцонит-порфиры	0,63	280,9	5,24	0,52		
		Монцониты	0,22	36,8	4,14	Нет данных		
	Култуминское	Монцонит-порфиры	0,22	98,7	3,49	0,21		
		Монцонит-порфиры	0,19	100,2	3,42	0,27		
		Монцонит-порфиры	0,2	101,1	3,33	0,28		
	Лугоканское	Гранодиориты	0,29	48,3	4,28	0,17		
		Гранодиорит-порфиры	0,25	43,5	4,48	0,1		
		Гранодиорит-порфиры	0,32	29,2	4,1	0,18		
		Гранодиориты	0,28	33,3	3,89	0,1		
		Гранодиорит-порфиры	0,25	28,8	3,76	0,12		
		Гранодиориты	0,3	21,4	3,88	0,17		
	Редкометалльные	Антоновогорское	Граниты	0,46	33,7	4,69	нет данных	
		Белухинское	Вт-Амр-граниты	0,45	49,49	4,24		
			<i>Граниты</i>	0,15	180,4	4,4	нет данных	
		Au- полиметаллические	Лугинское	Вт-NbI-гранодиорит	0,38	139,2	3,74	0,52
				Гранит-порфиры	0,4	110,9	4,13	0,44
Вт-NbI-граниты				0,47	130,1	5,68	0,52	
Антиинское			Монцониты	0,31	30,47	2,61	нет данных	
Ноцуйское	Монцониты	0,25	83,3	5,19	нет данных			

Примечание. Курсивом выделены магматические породы ундинского комплекса.

Note. Igneous rocks of the Undinsky complex are highlighted in italics.

В четвертую группу мы включили три месторождения: Антиинское, Ноцуйское и Лугинское. Монцитоны, ответственные за Au (\pm Sb) оруденение на Антиинском месторождении, характеризуются низкими Eu/Eu*, Ce/Ce*, Yb/Dy. Схожая картина наблюдается на Ноцуйском месторождении, только с одним исключением: здесь установлено относительно высокое Yb/Dy (> 5). На Лугинском месторождении цирконы выделены из нескольких разновидностей магматических пород. Так одна разновидность биотит-роговообманковых гранитов характеризуются относительно высокими Eu/Eu* (в среднем 0,38) и Ce/Ce*, Yb/Dy. Гранит-порфиры характеризуются относительно высокими Eu/Eu* и Ce/Ce*, Yb/Dy. Вторая разновидность биотит-роговообманковых гранитов характеризуется высокими Eu/Eu* ($> 0,4$), Ce/Ce*, Yb/Dy, сравнимыми с таковыми на порфировых месторождениях. Здесь также к индикаторным показателям можно отнести высокие Eu/Eu* ($> 0,4$) и Yb/Dy (> 5). Что касается Ноцуйского и Антиинского месторождений, то слагающие их породы с низкими Eu/Eu*, Ce/Ce* и Yb/Dy не способствовали формированию крупных рудопроявлений на порфировый тип.

Также нами было определено содержание окисного и закисного железа в некоторых изучаемых породах (см. таблицу).

Сравнивая данные по геохимическому составу цирконов и Fe₂O₃/FeO, видно, что цирконы из магматических пород с высоким Eu/Eu* обладают Fe₂O₃/FeO $> 0,5$ (доминирующее число анализов), что

говорит об образовании магматических пород в условиях окисленной системы. Это подтверждается также преобладанием магнетита над ильменитом (аксессуары минералы). Наиболее хорошо это видно на примере Быстринского месторождения, в частности, на примере монцодиорит-порфиров и монцитонит-порфиров. Также видно, что это характерно и для магматических пород, развитых на Лугинском месторождении. График, отражающий связь Eu/Eu* в цирконах и Fe₂O₃/FeO в магматических породах, приводит в данном случае несообразно, в виду небольшого количества анализов магматических пород (Fe₂O₃/FeO).

Заключение

Оценка рудного потенциала различных гранитоидов на основе изучения геохимического состава циркона показала, что лучшими показателями потенциальной рудоносности магматических пород являются Ce/Ce*, Eu/Eu*, Yb/Dy, (Ce/Nd)/Y. Рудоносными на «классический» порфировый тип оруденения в Восточном Забайкалье могут являться магматические породы Ce/Ce* > 100 , Eu/Eu* $> 0,4$, Yb/Dy $> \sim 4,0-5,0$ и (Ce/Nd)/Y $> 0,01$. Значения аномалий Ce и Eu, а также Yb/Dy в цирконах являются хорошими показателями степени окисленности исходных магм. Магматические породы, развитые на Култуминском, Лугоканском, Антиинском и Ноцуйском месторождениях, являются производными слабоокисленных магм и не могут продуцировать порфировое оруденение.

Список источников

Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 2. С. 97–119.

Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О., Крымский Р.Ш., Ларионов А.Н., Николаева И.В., Серов П.А. Шахтаминская Мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, источники, генетические особенности // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 6. С. 764–786.

Козлов В.Д. Редкоземельные элементы как индикаторы источников рудного вещества, степени дифференциации и рудоносности интрузий редкометалльных гранитов (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 1. С. 38–53.

Редин Ю.О., Редина А.А., Колпаков В.В. Минеральный состав и условия формирования руд Лугинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 3–8.

Редин Ю.О., Редина А.А., Мокрушников В.П., Дульцев В.Ф. Антиинское рудопроявление – как пример рудообразующих систем, связанных с восстановленными интрузиями (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 17–29.

Редина А.А., Мокрушников В.П., Редин Ю.О. Условия формирования и возраст редкометалльного оруденения Кукульбейского рудного района (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 9. С. 90–102.

Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск : Гео, 2006, 291 с.

Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., Campbell McCuaig T., Evans N.J., Yang Zh.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu \pm Mo \pm Au Deposits // Economic Geologists. 2016. Inc. Special Publication 19. Chapter 13. P. 329–347. doi: https://www.researchgate.net/publication/303386427_Zircon_compositions_as_a_pathfinder_for_porphyry_Cu_Mo_Au_deposits

Ballard J.R., Palin M.J., Campbell L.H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile // Contrib. Mineral. Petrol. 2002. V. 144. P. 347–364. doi: 10.1007/s00410-002-0402-5

Burnham A.D., Berry A.J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 95. P. 196–212. doi: 10.1016/j.gca.2012.07.034

Dilles J.H., Kent A.J.R., Wooden J.L., Tosdal R.M., Koleszar A., Lee R.G., Farmer L.P. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas // *Econ. Geol.* 2015. V. 110. P. 241–251. doi: 10.2113/econgeo.110.1.241

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F. The Kultuma Au–Cu–Fe–Skarn Deposit (Eastern Transbaikalia): Magmatism, Zircon Geochemistry, Mineralogy, Age, Formation Conditions and Isotope Geochemical Data // *Minerals.* 2022. V. 12. 12. doi: 10.3390/min12010012.

Redin Y.O., Redina A.A., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Y.A., Abramov B.N., Borisenko A.S. Rock-Forming (Biotite and Plagioclase) and Accessory (Zircon) Minerals Geochemistry as an Indicator of the Metal Fertility of Magmas by the Example of Au–Cu–Fe–Skarn Deposits in Eastern Transbaikalia // *Minerals.* 2022. V. 12. 50. doi: 10.3390/min12010050.

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Yu., Abramov B., Borisenko A. Distinctive Features of the Major and Trace Element Composition of Biotite from Igneous Rocks Associated with Various Types of Mineralization on the Example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia) // *Minerals.* 2023. V. 13. 1334. doi: 10.3390/min13101334

Wen G., Zhou R.-J., Li J.-W., Chang J., Hu H., Yan D.-R., Wei K.-T., Jin S.-G. Skarn metallogeny through zircon record: An example from the Daye Cu–Au–Fe–Mo district, eastern China // *Lithos.* 2020. V. 378–379. 105807. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105807

Zhong S., Seltmann R., Qu H. et al. Characterization of the zircon Ce anomaly for estimation of oxidation state of magmas: a revised Ce/Ce* method // *Miner. Petrol.* 2019. V. 113. P. 755–763. doi: 0.1007/s00710-019-00682-y

References

Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentiev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state and development prospects // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. 2016. V. 58, No. 2. pp. 97–119. In Russian

Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Krymsky R.Sh., Larionov A.N., Nikolaeva I.V., Serov P.A. Shakhtama Mo-porphry ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): age, sources, genetic features // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2013. V. 54, No. 6. pp. 764–786. In Russian

Kozlov V.D. Rare earth elements as indicators of sources of ore matter, the degree of differentiation and ore content of rare metal granite intrusions (Eastern Transbaikalia) // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2009. V. 50, No. 1. pp. 38–53. In Russian

Redin Yu.O., Redina A.A., Kolpakov V.V. Mineral composition and conditions for the formation of ores of the Lugiinsky gold-polymetallic deposit (Eastern Transbaikalia) // *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil]. 2017. No. 8. pp. 3–8. In Russian

Redin Yu.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Dultsev V.F. Antiinsky ore occurrence - as an example of ore-forming systems associated with restored intrusions (Eastern Transbaikalia) // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2018. V. 329, No. 6. pp. 17–29. In Russian

Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Redin Yu.O. Conditions of formation and age of rare metal mineralization in the Kukulbey ore district (Eastern Transbaikalia) // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2019. V. 330, No. 9. pp. 90–102.

Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2006. 291 p.

Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., Campbell McCuaig T., Evans N.J., Yang Zh.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits//*Economic Geologists*. 2016. Inc. Special Publication 19. Chapter 13. pp. 329–347. https://www.researchgate.net/publication/303386427_Zircon_compositions_as_a_pathfinder_for_porphyry_Cu_Mo_Au_deposits

Ballard J.R., Palin M.J., Campbel L.H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. V. 144. pp. 347–364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>

Burnham A.D., Berry A.J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. V. 95. pp. 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.07.034>

Dilles J.H., Kent A.J.R., Wooden J.L., Tosdal R.M., Koleszar A., Lee R.G., Farmer L.P. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Econ. Geol.* 2015. V. 110. pp. 241–251. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.241>

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F. The Kultuma Au–Cu–Fe–Skarn Deposit (Eastern Transbaikalia): Magmatism, Zircon Geochemistry, Mineralogy, Age, Formation Conditions and Isotope Geochemical Data. *Minerals.* 2022. V. 12. 12. <https://doi.org/10.3390/min12010012>.

Redin Y.O., Redina A.A., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Y.A., Abramov B.N., Borisenko A.S. Rock-Forming (Biotite and Plagioclase) and Accessory (Zircon) Minerals Geochemistry as an Indicator of the Metal Fertility of Magmas by the Example of Au–Cu–Fe–Skarn Deposits in Eastern Transbaikalia. *Minerals.* 2022. V. 12. 50. <https://doi.org/10.3390/min12010050>.

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Yu., Abramov B., Borisenko A., Distinctive Features of the Major and Trace Element Composition of Biotite from Igneous Rocks Associated with Various Types of Mineralization on the Example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia). *Minerals.* 2023. V. 13. 1334. <https://doi.org/10.3390/min13101334>

Wen G., Zhou R.-J., Li J.-W., Chang J., Hu H., Yan D.-R., Wei K.-T., Jin S.-G. Skarn metallogeny through zircon record: An example from the Daye Cu–Au–Fe–Mo district, eastern China. *Lithos.* 2020. V. 378–379. 105807. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105807>

Zhong S., Seltmann R., Qu H. et al. Characterization of the zircon Ce anomaly for estimation of oxidation state of magmas: a revised Ce/Ce* method // *Miner. Petrol.* 2019. V. 113. pp. 755–763. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00682-y>

Информация об авторах:

Редин Ю.О., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: redin@igm.nsc.ru

Малютина А.В., младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: malyutina@igm.nsc.ru

Дульцев В.Ф. инженер, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: dultsev@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Redin Yu.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: redin@igm.nsc.ru

Malyutina A.V., Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: malyutina@igm.nsc.ru

Dultsev V.F., Engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: dultsev@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.01.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 21.01.2024; approved after reviewing 11.12.2024; accepted for publication 02.06.2025