

УДК 550.42:549.514.81:552.3:553.43'411(571.620)

О. В. ПЕТРОВ (ВСЕГЕИ), Е. А. КИСЕЛЁВ (Роснедра),
 А. И. ХАНЧУК, В. В. ИВАНОВ (ДВГИ ДВО РАН), В. В. ШАТОВ,
 А. А. АЛЕНИЧЕВА, А. В. МОЛЧАНОВ, А. В. ТЕРЕХОВ, В. И. ЛЕОНТЬЕВ,
 Н. В. РОДИОНОВ, Б. В. БЕЛЯЦКИЙ, С. А. СЕРГЕЕВ (ВСЕГЕИ)

Распределение элементов-примесей (РЗЭ + Y, Hf, U, Th, Pb) в цирконе как индикатор рудоносности магматических пород Au-Cu-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье, Дальний Восток)

Обсуждаются результаты изучения на вторично-ионном масс-спектрометре (SIMS) закономерностей распределения элементов-примесей в акцессорном цирконе из магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей. Содержания элементов-примесей в цирконе определялись там же, где ранее был измерен возраст локальным U-Pb методом. Показано, что суммарное содержание РЗЭ в цирконах из малмыжских гранитоидов изменяется – 217–1158, Y 718–732, Hf 4524–4928, Pb 1,2–1,6, U 89–112 и Th 58–76 г/т. Цирконы из монцодиорит-порфиров Понийского рудного поля и гранитоидов Малмыжского района по своим геохимическим характеристикам заметно различаются. Концентрации в них практически всех элементов-примесей, особенно LREE и MREE, а также Y, Pb, U и Th в 2–3 раза и более превышают средние концентрации этих элементов в цирконах из малмыжских гранитоидов. Оценка потенциальной рудоносности магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей по геохимическим характеристикам акцессорных цирконов осуществлялась на основе использования вариационных диаграмм $Eu/Eu^* - Dy/Nd$ и $Eu/Eu^* - (Ce/Nd)/Y$. Их анализ показывает, что цирконы из малмыжских гранитоидов попадают в область рудоносных порфировых систем, а из понийских монцодиорит-порфиров – в зону безрудных объектов. Эти данные могут быть использованы при проведении прогнозно-металлогенических исследований не только в пределах территории Сихотэ-Алиня, но и всего Дальневосточного региона России.

Ключевые слова: РЗЭ + Y, Hf, U, Th и Pb в цирконах, рудоносность магматических пород, золото-медно-порфировое оруденение, Малмыжское и Понийское рудные поля, Нижнее Приамурье, Дальний Восток.

O. V. PETROV (VSEGEI), E. A. KISELEV (Rosnedra),
 A. I. KHANCHUK, V. V. IVANOV (FEGI FEB RAS), V. V. SHATOV,
 A. A. ALENICHEVA, A. V. MOLCHANOV, A. V. TEREKHOV, V. I. LEONT'EV,
 N. V. RODIONOV, B. V. BELYATSKIY, S. A. SERGEEV (VSEGEI)

REE + Y, Hf, U, Th, and Pb distribution in zircon as an indicator for fertility of magmatic rocks of the Malmyzh and Pony Cu-Au-porphyry ore fields (Trans-Amur Region, Russian Far East)

The results of studying distribution patterns of trace elements (REE + Y, Hf, U, Th, Pb) in zircons from magmatic rocks of the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields based on geochemical SIMS measurements of zircons are discussed in the paper. Trace elements contents in zircons were determined at the same spots in which isotopic age of crystallization was measured by SIMS U-Pb method (SHRIMP II). Σ REE content in zircons from the Malmyzh granitoids varies from 217 to 1158 ppm, Y – from 718 to 732 ppm, Hf – from 4524 to 4928 ppm, Pb – from 1.2 to 1.6 ppm, U – from 89 to 112 ppm, Th – from 58 to 76 ppm. Geochemical characteristics of zircons from the Pony monzodiorite-porphyry are strongly differing from the Malmyzh granitoid zircons. Concentrations of most trace elements in the Pony zircons, especially LREE and MREE, as well as Y, Pb, U and Th are of two-three times higher than in zircons from the Malmyzh granitoids. Assessment of magmatic rocks fertility from the Malmyzh and Pony ore fields based on geochemical characteristics of zircons was carried out using Eu/Eu^* vs. Dy/Nd and Eu/Eu^* vs. $(Ce/Nd)/Y$ plots. Analysis of these plots shows that zircons from the Malmyzh granitoids fall into the field of fertile porphyry systems whereas zircons from the Pony monzodiorite-porphyry fall into the field of barren suites. This result can be utilized during prognostic and metallogenic considerations not only within the limits of Sikhote-Alin territory but also within the whole Russian Far East region.

Keywords: REE + Y, Hf, U, Th and Pb in zircons, ore potential of magmatic rocks, gold-copper-porphyry ore mineralization, Malmyzh and Pony ore fields, the Trans-Amur Territory, Russian Far East.

Для цитирования: Петров О. В. Распределение элементов-примесей (PЗЭ + Y, Hf, U, Th, Pb) в цирконе как индикатор рудоносности магматических пород Au-Cu-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье, Дальний Восток) / О. В. Петров, Е. А. Киселёв, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, В. В. Шатов, А. А. Аленичева, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев / Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 84. – С. 55–70.

Введение. Месторождения порфирового семейства относятся к числу главных источников меди, молибдена и золота на нашей планете. В настоящее время на долю порфировых месторождений приходится 50–60 % мирового производства меди, 35–40 % – золота и более 95 % мирового производства молибдена (D. R. Cooke, P. Hollings, J. L. Walsh, 2005; D. A. John et al., 2010; W. D. Sinclair, 2007) [35].

Открытие в последние несколько десятилетий большого числа золото-медно-порфировых и медно-молибден-порфировых месторождений в уже известных и новых горнорудных районах (Пиббл на Аляске, Оюу-Толгой в Монголии, Быстринское в Забайкалье, Малмыж и Песчанка на Дальнем Востоке России и др.) дает основание предполагать, что роль порфировых объектов в мировой экономике с каждым годом будет только возрастать [2; 4; 5; 10; 12; 13; 36].

Однако хорошо известно, что лимит легкооткрываемых с поверхности рудных, в том числе порфировых, месторождений давно уже исчерпан и что новые месторождения данного геолого-промышленного типа могут быть обнаружены только за счет разработки и широкого применения на практике новых, как правило, прецизионных минералого-геохимических и изотопно-геохимических критериев прогноза порфирового оруденения.

В последние годы за рубежом, главным образом в Китае, Австралии, Канаде, США, Аргентине, Чили и других странах, основные усилия геологов были направлены на изучение петрохимических и геохимических особенностей отдельных минералов-индикаторов рудоносных порфировых систем, с помощью которых можно было бы решать широкий спектр задач как петролого-генетического, так и прогнозно-поискового характера.

Эти исследования можно условно разделить на две большие группы:

1. Изучение химического состава таких типоморфных минералов гидротермально измененных пород, как *эпидот*, *хлорит*, *турмалин*, *магнетит*, *алуит*, *серицит-мусковит* и др., с целью определения направления и расстояния до эпицентров рудоконцентрирования в пределах конкретных порфировых систем и оценки уровня их эрозийного среза [15; 20; 22; 24; 37].

2. Изучение закономерностей распределения элементов-примесей и, прежде всего, редкоземельных элементов, а также Y, Hf, Nb, Ta, U, Th, Pb, Ti, V, Sc, Ba, Sr, Li, P и др. в таких собственно магматических минералах, как *циркон*, *апатит*, *титанит*, *плаггиоклаз*, *магнетит*, с целью

их использования для разбраковки порфировых интрузивов на потенциально рудоносные и безрудные (J. A. Baldwin, J. A. Pearce, 1982) [26; 28; 30; 31; 40].

Результаты этих исследований показали, что из всех вышеперечисленных минералов только *циркон*, благодаря своим уникальным физическим свойствам и консервативным изотопно-геохимическим характеристикам, может рассматриваться в качестве одного из самых надежных минералов-индикаторов, продуктивных на золото-медно-порфировое оруденение интрузивных массивов. То есть циркон, будучи одним из наиболее информативных акцессорных минералов магматических горных пород, может быть использован не только для оценки радиологического возраста их кристаллизации, но и характеристики физико-химических и термодинамических условий формирования потенциально рудоносных материнских магматических расплавов.

Например, во многих публикациях по этому вопросу [1; 3; 7–9; 14; 16; 17; 19; 25; 27; 33; 38; 41–43] (Belousova E. et al., 2002; A. D. Burnham, A. J. Berry, 2012; C. Chelle-Michou et al., 2014; J. H. Dilles et al., 2015; B. Fu et al., 2008; Y. Han et al., 2013; P. W. O. Hoskin, U. Schaltegger, 2003; Sun W. D. et al., 2013; E. B. Watson, D. A. Wark, J. B. Thomas, 2006) было показано, что такие геохимические характеристики циркона, как содержание в нем Hf и Ti, величина отношений Ce/Ce^* и Eu/Eu^* – это индикаторы степени окисления материнского гранитоидного расплава, уровня его водонасыщенности и температуры кристаллизации, а также степени магматического фракционирования в расплаве рудогенных и летучих компонентов, то есть физико-химических и термодинамических параметров, во многом предопределяющих возможность проявления в связи с гранитоидными интрузивами продуктивных порфировых систем.

Экспериментальными исследованиями установлено, что величины аномалий церия (Ce/Ce^*) и европия (Eu/Eu^*) в цирконе изменяются в зависимости от степени окисленности материнского магматического расплава. Так, например, цирконы из более окисленных магматических расплавов характеризуются, как правило, *высокими значениями положительных аномалий церия и наименьшими – отрицательных аномалий европия*. Такая редокс-чувствительность имеет особое значение для прогнозирования порфировых месторождений, которые обычно формируются в тесной связи с внедрением в верхние части земной коры высокоокисленных и флюидонасыщенных известково-щелочных адакитовых расплавов [6;

10; 11; 31; 32; 35; 39] (Z.-Q. Hou et al., 2003, 2004; J. P. Richards, R. Kerrich, 2007; Y. Zheng et al., 2007).

Изучение цирконов из магматических пород, тесно ассоциирующих с рудной порфиоровой минерализацией, подтвердило эти закономерности. Однако, как показали результаты исследований М. А. Лоадера с соавторами [28], совместная кристаллизация или предшествующая кристаллизация апатита и/или титанита может значительно повлиять на микроэлементный состав циркона. Кроме того, этими авторами было продемонстрировано, что кристаллизация титанита имеет большое влияние на уровень отрицательных аномалий европия. Поэтому было рекомендовано использовать для анализа только высокотантало-содержащие цирконы ($> 0,2$ г/т Та), так как для них можно предположить отсутствие влияния титанита на микроэлементный состав циркона.

На основе использования этих закономерностей Ю. Лу с соавторами [29] предложили ряд дополнительных геохимических параметров для данной модели формирования порфиоровых систем: расчет величин отношений Eu/Eu^* , $(Eu/Eu^*)/Y$, Dy/Nd и $(Ce/Nd)/Y$, которые позволяют более надежно разбраковывать порфиоровые магматические комплексы на потенциально рудоносные и безрудные.

На данный момент предложенные этими авторами дискриминационные диаграммы могут рассматриваться в качестве достаточно точного и надежного инструмента для определения продуктивности порфиоровых интрузивных массивов. В последние годы использование подобных диаграмм набирает популярность во всем мире [16; 18; 21; 23; 27; 29; 31; 32; 34] (F. Wang et al., 2013). На территории России работы такого рода пока еще не проводились.

Поэтому **основная цель** настоящей статьи заключается в восполнении данного пробела в отечественных исследованиях, а также в демонстрации на примере магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей в Нижнем Приамурье работоспособности вышерассмотренного подхода к разбраковке порфиоровых интрузивов на продуктивные и безрудные на основе изучения особенностей распределения элементов-примесей (PЗЭ + Y, Hf, U, Th, Pb) в аксессуарных цирконах.

Фактически эта статья является продолжением наших работ, результаты которых были опубликованы в предыдущем номере журнала «Региональная геология и металлогения» в публикации под названием «U-Pb SIMS геохронология рудоносных магматических пород золото-медно-порфиоровых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье)» [6].

В этой статье было показано, что магматические породы Малмыжского и Понийского рудных полей имеют весьма близкий — сеноманский радиологический возраст их кристаллизации: 97–99 и 93 млн лет соответственно. Это свидетельствует о том, что магматические породы данных рудных полей были сформированы

в рамках одного достаточно короткого по времени (4–6 млн лет) этапа проявления интрузивной магматической деятельности в пределах Журавлёвско-Амурского террейна раннемелового турбидитового осадочного бассейна.

Кроме того, на основе сравнительного анализа изученных образцов магматических пород как друг с другом, так и с магматическими породами других порфиоровых месторождений мира была сделана попытка уточнить геологическую и геодинамическую природы их происхождения и обозначить регионы с близкими обстановками проявления адакитового гранитоидного магматизма.

В частности, авторами [6] установлено, что:

1. Петрогеохимически изученные образцы малмыжских кремнекислых пород заметно отличаются от таковых, отобранных в пределах Понийского рудного поля. Если понийские магматические породы относятся к монцонитоидной серии и характеризуются повышенной щелочностью ($Na_2O + K_2O = 6,47\%$) при незначительном преобладании натрия над калием, то малмыжские гранитоиды принадлежат известково-щелочной серии, отличаясь нормальной щелочностью ($Na_2O + K_2O = 3–4\%$) при резком преобладании натрия над калием.

2. Располагаясь в поле умеренно глиноземистых пород на границе с их высокоглиноземистыми разностями и будучи практически идентичными друг другу по этому показателю, малмыжские и понийские магматические породы практически не отличаются от гранитоидов и монцонитоидов большинства ведущих порфиоровых месторождений мира, что, скорее всего, указывает на проявление процессов контаминации магматических расплавов веществом вмещающих высокоглиноземистых осадочно-терригенных пород нижнемелового возраста в пределах Журавлёвско-Амурского террейна.

3. На вариационной диаграмме $Fe_2O_3/FeO - SiO_2$ фигуративные точки состава характеризуемых образцов группируются в поле *золото-медно-порфиоровых* и *медно-порфиоровых месторождений*, связанных с проявлением гранитоидного магматизма «магнетитовой» серии. В этом отношении гранитоиды и монцонитоиды Малмыжского и Понийского рудных полей практически не отличаются как друг от друга, так и от магматических пород большинства порфиоровых месторождений мира.

4. На вариационной диаграмме $Sr/Y - Y$ фигуративные точки состава данных образцов расположились в области «адакитовых» магматических пород порфиоровых месторождений Китая, Центральной Азии и Ирана. По этому показателю и уровню повышенной глиноземистости из всего многообразия порфиоровых месторождений мира изученные магматические породы Журавлёвско-Амурского террейна сопоставимы только со синдвиговыми интрузивными породами территории китайского Тибета, где в последние годы была открыта серия золото-медно-молибден-порфиоровых месторождений, связанных с проявлениями

высокоглиноземистого адакитового гранитоидного магматизма.

В настоящей статье авторы поставили перед собой задачу показать на примере ранее изученных образцов магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей, что рудообразующий потенциал порфировых гидротермальных систем может быть оценен в том числе и с использованием индикативных геохимических особенностей циркона, указывающих, был ли материнский гранитоидный расплав в достаточной степени водонасыщен, окислен и обогащен серой и рудогенными элементами для того, чтобы запустить механизмы процесса формирования порфировой рудной минерализации.

Методика исследований. Изучение индикативных геохимических характеристик циркона, отражающих состав и металлогенические особенности среды минералообразования, требует наличия гомогенной популяции зерен этого минерала, кристаллизовавшегося из гранитоидного расплава.

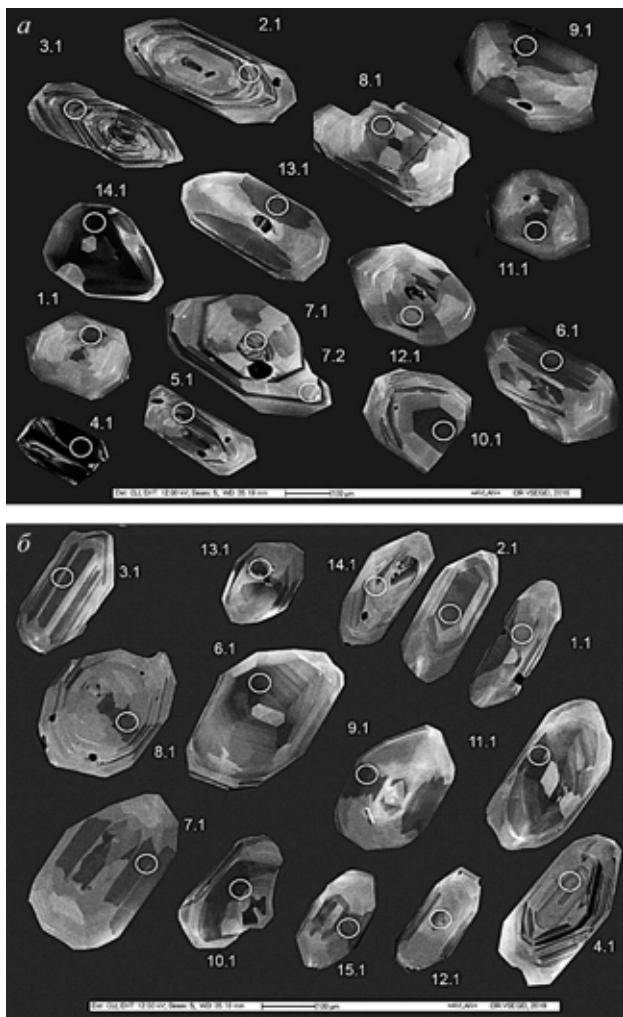


Рис. 1. Малмыжское рудное поле. Катодоллюминесцентные изображения изученных зерен цирконов с местоположением точек измерений из кварцевых диоритов и диоритов Северного рудоносного участка

a – обр. ИМ-288, *б* – обр. ИМ-2017Del

В таких случаях для исследования непригодны кристаллы многофазные гибридного происхождения, а также содержащие значительное количество минеральных включений, древние ядра, метаморфические оболочки и т. п.

Применение вторично-ионного масс-спектрометра (SIMS) в сочетании с предварительной катодоллюминесцентной (CL) и оптической документацией позволяет исключить из рассмотрения нерелевантные фазы циркона и проводить в одном микрообъеме кристалла как U-Pb изотопное определение возраста, так и определение концентраций редкоземельных и других элементов-примесей. В результате появляется однозначная привязка определенного геологического события (процесса) к его геохимическому наполнению.

В нашей статье для выделения представительной популяции акцессорных цирконов было использовано три образца диоритов, кварцевых диоритов и монцодиорит-порфиров массой около 3 кг каждый, петрографическое описание которых и геологическая привязка приводятся в статье О. В. Петрова и соавторов [6, с. 41–56].

Образцы отобраны из свежих однородных пород без признаков выветривания. Диориты и кварцевые диориты Малмыжского рудного поля представляют Боккинский массив. Образец ИМ-288 извлечен из керна скв. 081 с глубины 288 м, а обр. ИМ-2017Del – с поверхности.

Понийское рудное поле представлено обр. ИП-34-1, отобранным в пределах Медного рудоносного участка из дайкового тела, сложенного монцодиорит-порфирами.

Цирконы выделялись общепринятым способом с дроблением образцов до 300 мкм, осаждением тяжелой фракции в бромформе, извлечением немагнитной фракции и последующей ручной доочисткой. Для инструментальных исследований цирконы и цирконовые стандарты имплантировались в эпоксидные шайбы и сполировывались до середины кристаллов.

Как показано на рис. 1, полученные монофракции цирконов из малмыжских и кварцевых диоритов (образцы ИМ-288 и ИМ-2017Del) практически идентичны друг другу. Они представлены светло-желтыми прозрачными и полупрозрачными коротко-призматическими (коэффициент удлинения – КУ до 3) эвгдральными кристаллами гиацинтового габитуса размером 200–250 мкм. CL-изображения демонстрируют контрастное осцилляционное тонкозональное строение, характерное для спокойной кристаллизации из магматического расплава. Поверхности граней гладкие, ребра и вершины хорошо выражены, без следов коррозии. Зональность – от секториальной в центральных частях зерен до параллельной граням на периферии. Газо-жидкие и минеральные включения редки, тяготеют к краевым частям зерен и представлены преимущественно апатитом. U-Pb возраст этой генерации цирконов синхронный – $97,2 \pm 1,1$ млн лет для обр. ИМ-288 и $99,4 \pm 1,3$ млн

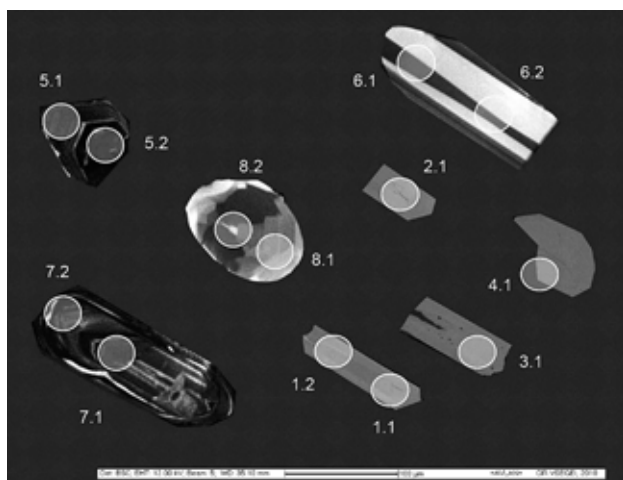


Рис. 2. Понийское рудное поле. Катодолюминесцентные изображения изученных зерен цирконов с местоположением точек измерений из монцодиорит-порфиров Медного рудоносного участка (обр. ИП-34-1)

лет для обр. ИМ-2017Del. Встречаются единичные (1–2 % от популяции) округлые, очевидно, аллохтонные зерна с корродированной поверхностью, мутные, с возрастом 120–130 млн лет.

Магматические цирконы из понийских монцодиорит-порфиров (обр. ИП-34-1 на рис. 2) длиннопризматические (КУ до 4,5), мелкие, с размером 70–100 мкм цирконового габитуса, субидiomорфные, прозрачные, с туннелеобразными газовой-жидкими и пылевыми минеральными включениями. Катодное свечение практически отсутствует. Данные кристаллы сохраняют ненарушенную (конкордантную) изотопную U-Pb систему и позволяют датировать возраст магматической кристаллизации монцодиорит-порфиров в $93,3 \pm 1,2$ млн лет, что немного моложе кварцевых диоритов и диоритов Малмыжского рудного поля. Наряду с этим в понийских монцодиорит-порфирах выявлены (до 40 % популяции) ангдральные изометричные и овальные аллохтонные (захваченные) цирконы, зональные и однородные, с широким разбросом в геохимических параметрах и значениях U-Pb возраста – от 188 млн лет до 2,8 млрд лет, что указывает на сильную возрастную и вещественную гетерогенность их источников.

Несмотря на это, аналитические возможности локального исследования позволяют получить адекватную геохронологическую и геохимическую информацию по магматической генерации цирконов.

Методика проведения локального элементного анализа в цирконе. Анализ проводился на вторично-ионном микрозонде SHRIMP II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ. Измерялись редкоземельные элементы (РЗЭ), а также иттрий и гафний по методике количественного химического анализа, предложенного П. В. Хоскиным (P. W. O. Hoskin, 1998). Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных

ионов кислорода O^{2-} составляла 3–4 нА, а диаметр аналитического кратера – 25–30 мкм.

Опорным пиком для нормализации относительно него измеряемых изотопов служил изотоп ^{91}Zr . Вторичные положительно заряженные ионы направлялись с помощью ускоряющего напряжения 10 кВ в масс-спектрометр и регистрировались электронным умножителем в одноколлекторном режиме.

Энергетическое фильтрование применялось для уменьшения излишне высокой интенсивности пика циркония, при этом так же подавляя изотопные наложения (ионов гидридов, окислов и других комплексов), что в совокупности с масс-разрешением 4000–5000 (1 % высоты пика) позволяло уверенно отделять каждый измеряемый полезный пик от паразитного наложения. Во время анализа регистрировалось три масс-спектра нижеперечисленных изотопов: ^{89}Y , ^{91}Zr , ^{139}La , ^{140}Ce , ^{141}Pr , ^{143}Nd , ^{146}Nd , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{151}Eu , ^{153}Eu , ^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{159}Tb , ^{161}Dy , ^{163}Dy , ^{165}Ho , ^{166}Er , ^{167}Er , ^{169}Tm , ^{171}Yb , ^{172}Yb , ^{175}Lu , ^{178}Hf , ^{180}Hf .

Время накопления вторичного тока ионов составляло: 2 с для ^{91}Zr , 10 с – ^{89}Y , от 15 до 40 с – легких РЗЭ, 5–10 с – тяжелых РЗЭ и двух изотопов Hf. Длительность анализа не превышала 40 минут. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием программы MS Excel. Регистрация для ряда измеряемых элементов парных изотопов позволяла осуществлять дополнительный контроль качества анализа по степени их совпадения (с учетом природной распространенности). Для учета наложения диммера $^{178}Hf^{++}$ на пик ^{89}Y вводилась поправка $^{89}Y^* = (^{89}Y - ^{178}Hf)/100$. В течение измерительной сессии в качестве первичного стандарта концентраций использовалось стекло SRM NIST-611.

В качестве вторичного стандарта измерялись цирконы 91500 и M257, контрольный анализ которых считался приемлемым, если полученные содержания измеряемых элементов не превышали 15 % от известных значений (L. Nasdala et al., 2008; M. Wiedenbeck et al., 2004).

Закономерности распределения элементов-примесей в цирконах. В табл. 1 приведены содержания редкоземельных элементов, а также иттрия, гафния, свинца, урана и тория в изученных зернах цирконов на вторично-ионном микрозонде SHRIMP II (см. рис. 1, 2). Содержания вышеперечисленных элементов-примесей в цирконе определялись в тех же точках, в которых ранее был измерен возраст локальным U-Pb методом [6].

При построении спектров распределения РЗЭ состав циркона нормировался на состав хондрита CI (W. F. McDonough, S. S. Sun, 1995).

Малмыжское рудное поле. Как показано на рис. 3, спектры распределения РЗЭ в цирконах из образцов ИМ-288 и ИМ-2017Del практически идентичны друг другу как по форме, так и уровням содержания индивидуальных редких земель.

Содержания (г/г) типоморфных элементов-примесей в изученных зернах цирконов

Зерно	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
Обр. ИМ-288												
1.1	0,01	3,80	0,01	0,29	0,60	0,30	2,71	1,14	15,99	6,95	36	10
2.1	0,04	4,34	0,02	0,23	0,63	0,22	2,90	1,26	16,47	7,31	39	11
3.1	0,01	7,15	0,02	0,35	1,05	0,45	7,07	3,47	49,39	20,75	110	28
4.1	0,05	17,98	0,39	6,18	9,50	1,29	36,77	13,00	152,12	55,68	241	52
5.1	0,01	6,88	0,07	1,17	2,29	0,84	10,12	3,93	51,71	21,11	100	25
6.1	0,01	5,23	0,04	0,76	1,56	0,67	6,19	2,56	31,29	12,33	61	16
7.1	0,02	4,43	0,02	0,40	0,95	0,38	4,49	1,85	26,73	11,36	58	16
7.2	0,03	5,98	0,04	0,43	0,70	0,32	3,02	1,39	19,66	9,31	48	14
8.1	0,01	5,06	0,04	0,60	1,29	0,58	5,51	2,36	32,50	14,29	75	21
9.1	0,02	5,33	0,03	0,70	1,44	0,65	6,81	2,55	31,00	12,17	60	16
10.1	0,01	5,71	0,03	0,82	1,84	0,77	8,37	3,11	38,84	15,49	76	19
11.1	0,02	4,48	0,06	0,91	1,64	0,72	6,57	2,57	32,61	13,35	65	17
12.1	0,01	3,75	0,03	0,49	1,06	0,49	4,77	1,96	25,91	10,58	54	15
13.1	0,02	5,51	0,04	0,58	1,28	0,59	5,29	2,01	29,31	12,47	58	15
14.1	0,02	11,57	0,05	0,95	1,84	0,77	10,05	4,76	70,60	32,07	166	43
Обр. ИМ-2017Del												
1.1	0,06	5,35	0,06	1,09	2,02	0,80	8,69	3,20	41,96	16,65	82	21
2.1	0,06	5,35	0,06	1,09	2,02	0,80	8,69	3,20	41,96	16,65	82	21
3.1	0,02	4,43	0,04	0,90	1,76	0,73	6,76	2,47	32,82	13,20	65	17
4.1	0,04	17,32	0,04	0,79	2,09	0,86	13,66	6,36	91,81	39,82	201	52
5.1	0,01	5,34	0,02	0,49	1,09	0,44	5,59	2,07	32,18	14,14	77	21
6.1	0,02	6,67	0,03	0,65	1,30	0,52	5,70	2,33	36,28	16,98	92	27
7.1	0,02	5,13	0,02	0,58	1,36	0,58	6,29	2,50	32,14	12,71	63	17
8.1	0,01	5,88	0,08	1,13	2,12	0,74	8,08	3,18	43,14	16,70	83	21
9.1	0,01	5,65	0,05	1,33	2,55	0,99	10,01	3,72	45,74	17,54	84	20
10.1	0,01	8,71	0,11	1,73	2,90	1,03	11,14	4,55	61,56	26,18	130	34
11.1	0,001	7,73	0,03	0,49	1,39	0,50	6,13	2,65	40,91	19,31	108	30
12.1	0,01	3,75	0,01	0,24	0,50	0,25	2,69	1,25	17,05	7,43	38	10
13.1	0,01	5,54	0,03	0,50	1,01	0,42	5,30	2,38	31,14	14,29	77	21
14.1	0,01	5,37	0,02	0,39	0,92	0,40	4,80	2,25	31,43	14,18	75	21
15.1	0,01	4,23	0,04	0,35	0,92	0,32	3,96	1,68	22,71	9,62	52	14
Обр. ИП-34-1												
1.1	1,23	311,23	3,24	36,77	43,37	6,59	124,76	43,20	477,63	166,45	704	152
2.1	0,37	164,38	1,12	13,09	19,38	2,21	63,69	22,91	282,16	102,11	503	114
3.1	0,96	306,88	2,33	23,59	25,99	2,44	69,31	25,77	284,32	106,39	471	104
4.1	0,53	10,26	1,28	14,30	27,18	7,83	97,39	36,03	362,99	105,39	354	61
5.1	0,05	26,61	0,06	1,31	4,54	0,11	28,28	12,89	157,38	64,41	285	59
6.1	0,02	6,82	0,11	1,75	3,42	0,82	16,38	6,74	89,14	36,73	175	39
6.2	0,01	4,23	0,01	0,37	1,06	0,28	6,65	2,85	39,40	18,24	95	23
7.1	10,37	115,62	11,84	65,23	33,28	14,69	48,66	11,98	90,02	23,80	84	16
7.2	7,23	86,33	8,98	51,41	25,59	10,88	34,54	8,82	73,48	22,16	85	17
8.1	0,03	8,03	0,11	1,93	3,73	0,73	17,13	7,36	99,48	41,62	209	42
8.2	0,04	6,98	0,08	1,48	3,00	0,65	14,22	5,90	78,12	33,09	160	33

Примечание. Номер анализа соответствует номеру и положению рассматриваемого кратера уран-свинцового изотопного анализа циркона.

Таблица 1
на вторично-ионном микрозонде SHRIMP II

	Yb	Lu	Y	Hf	Pb	U	Th
	113	26	283	4975	0,842	61	37
	135	31	329	5822	0,9	66	26
	308	69	939	5565	1,33	99	47
	490	83	2212	4503	8,43	482	433
	273	55	861	4935	2,05	155	98
	187	40	529	5351	1,01	77	47
	185	40	481	4813	0,973	70	34
	170	35	547	4130	0,715	54	25
	234	52	598	4386	1,02	75	32
	182	39	516	5609	1,19	89	56
	211	44	653	4910	0,969	73	48
	193	41	546	4608	0,937	72	45
	171	37	401	4722	0,7	52	24
	186	42	532	5252	0,971	75	49
	481	101	1345	4337	2,3	175	135
	236	47	737	4202	0,621	45	21
	236	47	737	4202	1,16	87	60
	189	39	536	4655	0,778	56	32
	566	113	1632	4986	0,68	49	18
	249	54	622	4294	1,8	131	105
	323	71	767	4571	2,4	182	118
	188	39	548	4933	0,606	45	25
	229	45	714	4484	1,0	74	49
	224	43	740	4271	0,977	70	50
	379	77	1099	4546	1,69	123	92
	354	75	873	4136	1,78	132	98
	125	28	306	4682	1,71	103	34
	250	54	633	4170	1,35	97	71
	241	51	608	4438	0,746	54	25
	173	38	421	4525	1,19	85	68
	1423	223	5765	5889	466	3682	9920
	1188	184	4541	5516			
	1072	177	6234	3438	29,3	2356	5233
	498	74	4459	6374	177	599	73
	560	100	2325	7174	28,6	1120	450
	408	76	1469	4890	1,73	131	96
	240	47	753	4871	1,49	118	79
	142	23	956	5315	102	253	21
	156	27	755	4883	42,4	90	63
	389	74	1654	4202	1,34	100	44
	343	62	1386	4041	1,82	142	111

Суммарное содержание РЗЭ в цирконах от 217 до 1158 г/т (при среднем значении 365 г/т) в обр. ИМ-288 и от 235 до 1105 г/т (при среднем значении 508 г/т) в обр. ИМ-2017Del (табл. 2). Характер распределения редких земель отчетливо дифференцирован с увеличением содержания элементов от легких к тяжелым РЗЭ (Lu_N/La_N отношение в среднем по двум образцам составляет 40 052). Eu-аномалия отрицательная, выражена достаточно слабо (Eu/Eu^* в среднем 0,60). Ce-аномалия, наоборот, положительная, проявлена весьма отчетливо и интенсивно (Ce/Ce^* в среднем составляет 61,4 в обр. ИМ-288 и 72,5 – в обр. ИМ-2017Del).

Содержания остальных элементов-примесей (Y, Hf, Pb, U, Th) в цирконах так же мало чем отличаются друг от друга в изученных образцах гранитоидов. Так, средние содержания иттрия в обр. ИМ-288 и ИМ-2017Del изменяются 718–732, гафния 4524–4928 и свинца 1,2–1,6 г/т. Концентрации U и Th весьма низкие. Средние значения содержания урана лежат в интервале 89–112, а тория – 58–76 г/т при Th/U отношении 0,59–0,62.

Понийское рудное поле. Изученные зерна цирконов из монцодиорит-порфиров (обр. ИП-34-1) заметно отличаются по своим геохимическим характеристикам от цирконов из вышерассмотренных гранитоидов Малмыжского рудного поля (см. табл. 2). Концентрации в них практически всех элементов-примесей, но особенно легких и средних редких земель, а также иттрия, свинца, урана и тория в 2–3 раза и более превышают средние значения этих элементов в цирконах из малмыжских гранитоидов.

Суммарное содержание РЗЭ в цирконах из обр. ИП-34-1 колеблется от 477 до 3716 г/т при среднем значении – 984 г/т и высокой дисперсии распределения. Так же, как и в случае с малмыжскими образцами, характер поведения редких земель отчетливо дифференцирован с увеличением содержания элементов от легких к тяжелым РЗЭ (Lu_N/La_N отношение колеблется в широких пределах, составляя в среднем 17 721). Eu-аномалия отрицательная, выражена чуть сильнее, чем в малмыжских цирконах (Eu/Eu^* в среднем 0,40). Ce-аномалия положительная, проявлена менее отчетливо, чем в случае с малмыжскими гранитоидами (Ce/Ce^* в среднем 40,7).

В цирконах из понийских монцодиорит-порфиров обнаружены высокие концентрации U и Th. Средние значения содержания урана – 859 г/т, а тория – 1609 г/т при Th/U – 0,80. Концентрации остальных элементов-примесей (Y, Hf и Pb) так же повышенные. Средние значения содержания иттрия составляют (г/т): 2754, гафния – 5145 и свинца – 85,2.

Как показывает анализ рис. 3, среди изученных цирконов из понийских монцодиорит-порфиров выделяются две группы этого минерала. Первая группа, представленная двумя зернами (номера кратеров 1.1 и 3.1), отличается от остальных двух

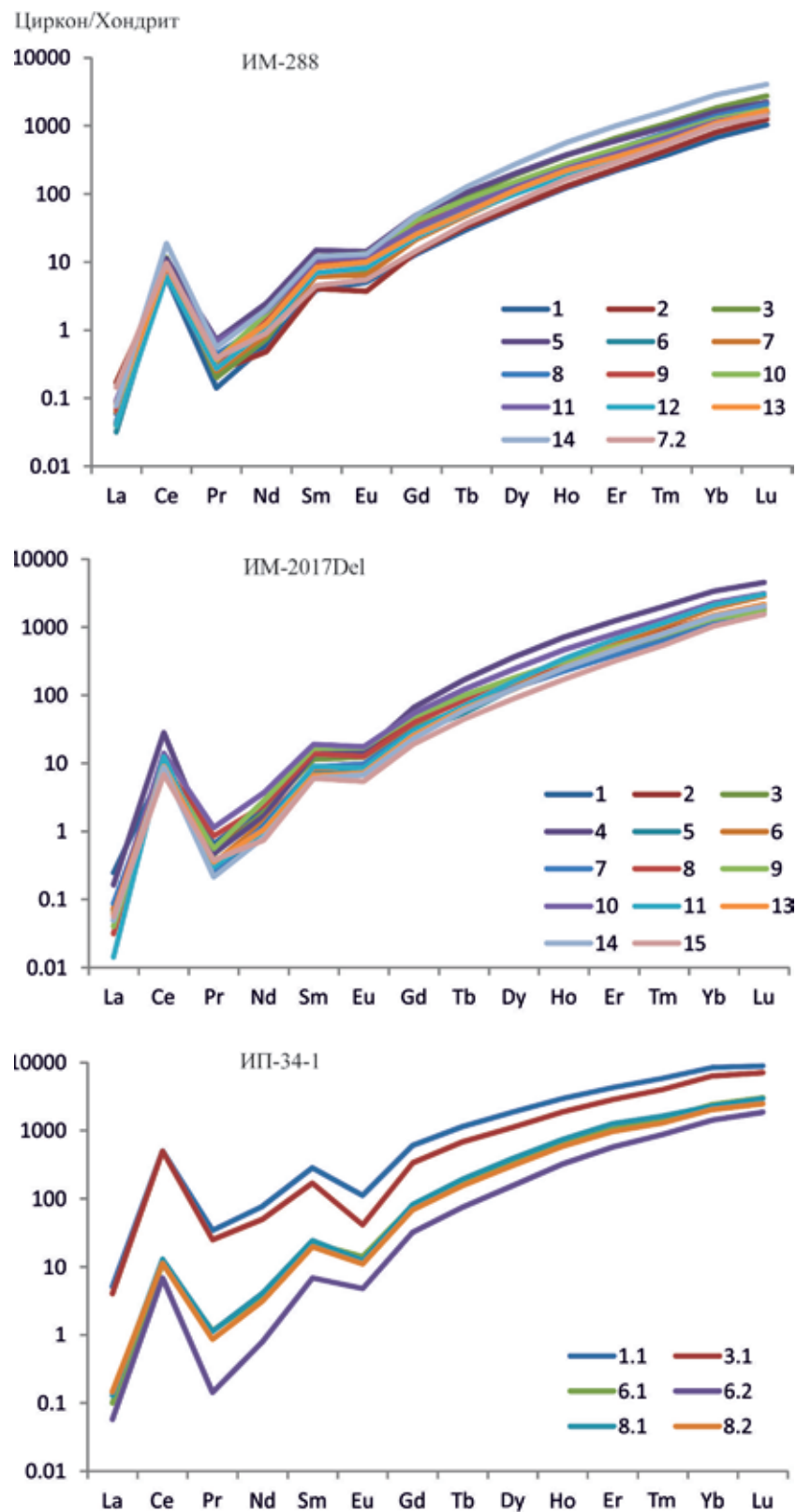


Рис. 3. Редкоземельные спектры цирконов (в нормированных единицах к содержаниям в хондритах) из магматических пород Малмыжского (образцы ИМ-288 и ИМ-2017Del) и Понийского (обр. ИП-34-1) рудных полей

**Статистические параметры распределения содержаний редкоземельных
и редких элементов-примесей (г/т) в цирконах из интрузивных пород
Малмыжского (участок Северный) и Понийского (участок Медный) рудных полей**

Элементы, индикативные показатели	Малмыжское рудное поле				Понийское рудное поле	
	Обр. ИМ-288		Обр. ИМ-2017Del		Обр. ИП-34-1	
	$\frac{X_{арф} (Me)}{\min - \max}$	Станд. отклонение	$\frac{X_{арф} (Me)}{\min - \max}$	Станд. отклонение	$\frac{X_{арф} (Me)}{\min - \max}$	Станд. отклонение
La	<u>0,02</u> (0,02) 0,01–0,05	0,01	<u>0,02</u> (0,01) 0,003–0,06	0,01	<u>1,89</u> (0,37) 0,01–10,37	0,56
Ce	<u>6,48</u> (5,33) 3,75–17,98	1,98	<u>6,47</u> (5,54) 3,75–17,32	3,29	<u>95,22</u> (26,61) 4,23–311,20	156,20
Pr	<u>0,06</u> (0,04) 0,01–0,39	0,02	<u>0,04</u> (0,04) 0,01–0,11	0,02	<u>2,65</u> (1,12) 0,01–11,34	1,43
Nd	<u>0,99</u> (0,60) 0,23–6,18	0,28	<u>0,77</u> (0,65) 0,24–1,73	0,40	<u>19,20</u> (13,09) 0,37–65,23	15,45
Sm	<u>1,85</u> (1,29) 0,60–9,50	0,51	<u>1,60</u> (1,39) 0,50–2,90	0,63	<u>17,32</u> (19,38) 1,06–43,37	17,38
Eu	<u>0,60</u> (0,59) 0,22–1,29	0,20	<u>0,63</u> (0,58) 0,25–1,03	0,23	<u>4,29</u> (2,22) 0,11–14,69	2,41
Gd	<u>8,04</u> (6,19) 2,71–36,77	2,40	<u>7,23</u> (6,29) 2,69–13,66	2,76	<u>47,36</u> (34,54) 6,65–124,80	46,67
Tb	<u>3,19</u> (2,55) 1,14–13,00	1,04	<u>2,95</u> (2,50) 1,25–6,36	1,22	<u>16,77</u> (11,98) 2,85–43,20	15,92
Dy	<u>41,61</u> (31,29) 15,99–152,10	14,96	<u>40,35</u> (36,28) 17,05–91,81	17,09	<u>184,90</u> (99,48) 39,40–477,60	169,90
Ho	<u>17,02</u> (12,47) 6,95–55,68	6,61	<u>17,11</u> (16,65) 7,43–39,82	7,41	<u>65,49</u> (41,62) 18,24–166,50	57,50
Er	<u>83,20</u> (61,21) 36,48–240,80	33,95	<u>87,61</u> (82,44) 38,14–201,30	37,04	<u>284,00</u> (208,90) 83,70–704,00	235,90
Tm	<u>21,20</u> (16,21) 9,71–51,70	8,50	<u>23,34</u> (21,32) 10,46–52,03	9,52	<u>59,98</u> (42,47) 15,90–151,60	50,98
Yb	<u>234,70</u> (186,80) 113,4–490,00	91,09	<u>264,90</u> (241,30) 125,10–566,50	103,50	<u>583,60</u> (407,70) 141,70–1423,00	482,60
Lu	<u>48,90</u> (40,58) 25,70–101,30	19,01	<u>54,87</u> (50,19) 27,69–112,60	20,70	<u>96,94</u> (74,05) 23,13–222,60	72,16
ΣREE	<u>467,86</u> (364,90) 217,10–1158,00	178,60	<u>507,88</u> (462,40) 234,50–1105,00	199,30	<u>1479,62</u> (983,53) 477,30–3716,00	1325,06
$\Sigma LREE$	<u>7,55</u> (5,98) 4,00–24,60	2,29	<u>7,30</u> (6,24) 2,29–4,00	3,73	<u>118,97</u> (41,19) 4,63–398,64	173,64
$\Sigma MREE$	<u>72,31</u> (54,38) 27,62–268,34	25,71	<u>69,86</u> (63,68) 29,17–155,57	29,34	<u>336,13</u> (209,22) 68,31–870,16	309,78
$\Sigma HREE$	<u>388,00</u> (304,80) 185,29–883,80	152,55	<u>430,72</u> (395,25) 201,39–932,43	170,76	<u>1024,52</u> (733,12) 264,43–2501,20	841,64
Y	<u>718</u> (546) 283–2212	276	<u>732</u> (714) 306–1632	299	<u>2754</u> (1654) 753–6234	2442
Hf	<u>4928</u> (4910) 4130–5822	510	<u>4524</u> (4523) 4136–4986	291	<u>5145</u> (4890) 3438–7174	852
Pb	<u>1,6</u> (1,0) 0,7–8,4	0,5	<u>1,2</u> (1,2) 0,6–2,4	0,5	<u>85,2</u> (29,0) 1,3–466,0	187,7
U	<u>112</u> (75) 52–82	36	<u>89</u> (85) 45–182	41	<u>859</u> (198) 90–3682	1553

Элементы, индикативные показатели	Малмыжское рудное поле				Понийское рудное поле	
	Обр. ИМ-288		Обр. ИМ-2017Del		Обр. ИП-34-1	
	$\frac{X_{арф} (Me)}{\min - \max}$	Станд. отклонение	$\frac{X_{арф} (Me)}{\min - \max}$	Станд. отклонение	$\frac{X_{арф} (Me)}{\min - \max}$	Станд. отклонение
Th	$\frac{76 (47)}{24-433}$	31	$\frac{58 (50)}{18-118}$	34	$\frac{1609 (88)}{21-9920}$	4144
Ce/Ce*	$\frac{61,4 (58,2)}{29,2-124,4}$	24,3	$\frac{72,5 (60,8)}{21,6-191,0}$	39,9	$\frac{40,7 (34,0)}{2,5-115,6}$	17,0
Eu/Eu*	$\frac{0,6 (0,6)}{0,2-0,7}$	0,1	$\frac{0,6 (0,6)}{0,5-0,7}$	0,01	$\frac{0,4 (0,3)}{0,01-1,1}$	0,1
Lu _N /La _N	$\frac{33\ 558 (25\ 483)}{7313-63\ 788}$	18 110	$\frac{46\ 546 (38\ 108)}{7576-210\ 468}$	47 215	$\frac{17\ 721 (12\ 751)}{22-32\ 445}$	13 540
Sm _N /La _N	$\frac{171,7 (156,3)}{24,1-361,6}$	104,2	$\frac{207,8 (123,5)}{53,3-634,2}$	170,9	$\frac{98,6 (83,2)}{5,0-224,2}$	71,5
Lu _N /Gd _N	$\frac{64,4 (64,0)}{18,6-96,7}$	17,4	$\frac{67,6 (68,1)}{35,6-102,8}$	22,7	$\frac{24,9 (23,8)}{3,9-57,9}$	15,0
Pr _N /Gd _N	$\frac{0,015 (0,013)}{0,006-0,027}$	0,005	$\frac{0,013 (0,012)}{0,007-0,022}$	0,005	$\frac{0,123 (0,029)}{0,004-0,573}$	0,029
Yb _N /Sm _N	$\frac{153,6 (146,1)}{47,0-265,8}$	53,4	$\frac{167,5 (171,1)}{80,2-247,1}$	63,5	$\frac{70,6 (55,8)}{3,9-207,3}$	63,9
La _N /Gd _N	$\frac{0,003 (0,002)}{0,001-0,012}$	0,003	$\frac{0,003 (0,002)}{0,001-0,006}$	0,001	$\frac{0,036 (0,005)}{0,001-0,183}$	0,005
Yb/Gd	$\frac{36,19 (35,77)}{13,33-56,34}$	9,37	$\frac{38,91 (41,48)}{22,42-57,78}$	11,92	$\frac{16,89 (18,65)}{2,91-36,16}$	8,58
Nd/Yb	$\frac{0,004 (0,003)}{0,001-0,013}$	0,001	$\frac{0,003 (0,002)}{0,001-0,006}$	0,002	$\frac{0,081 (0,011)}{0,002-0,460}$	0,011
Yb/Hf	$\frac{0,05 (0,04)}{0,02-0,11}$	0,02	$\frac{0,06 (0,05)}{0,03-0,11}$	0,02	$\frac{0,12 (0,08)}{0,03-0,31}$	0,11
U/Yb	$\frac{0,44 (0,38)}{0,31-0,98}$	0,09	$\frac{0,37 (0,32)}{0,09-0,82}$	0,13	$\frac{1,08 (0,58)}{0,001-2,59}$	1,05
Th/U	$\frac{0,59 (0,61)}{0,39-0,90}$	0,11	$\frac{0,62 (0,66)}{0,33-0,80}$	0,14	$\frac{0,80 (0,67)}{0,001-2,69}$	0,95
LREE-I	$\frac{82,59 (74,39)}{40,64-188,50}$	33,44	$\frac{85,99 (83,68)}{52,39-159,60}$	30,12	$\frac{60,17 (38,74)}{4,09-155,00}$	44,21

Примечание. В таблице для каждого образца в левой колонке: в числителе – значение среднего арифметического содержания, в скобках – медиана, в знаменателе – разброс частных значений в выборке (минимум – максимум); в правой колонке – стандартное отклонение. Образцы ИП-34-1 – монцодиорит-порфир; ИМ-2017Del – равномерно-зернистый диорит; ИМ-288 – порфировидный кварцевый диорит.

изученных зерен (номера кратеров 6.1, 6.2, 8.1 и 8.2) более высокими значениями содержаний практически всех элементов-примесей, включая редкие земли. Особенно сильно эти две группы отличаются друг от друга по уровням содержаний урана, тория и свинца. Различия между средними значениями концентраций этих элементов в обеих группах цирконов достигают 10–15 раз и более, что тем не менее не повлияло на точность оценки радиологического возраста кристаллизации этих пород локальным U-Pb методом [6].

Обсуждение результатов исследования. Оценка потенциальной рудоносности магматических

пород Малмыжского и Понийского рудных полей по геохимическим характеристикам аксессуарных цирконов осуществлялась на основе использования вариационных диаграмм Eu/Eu* – Dy/Nd и Eu/Eu* – (Ce/Nd)/Y, предложенных Ю. Лу с соавторами [29, Fig. 5 и 6], и обобщения большого фактического материала по золото-медно-порфировым и золото-медно-молибден-порфировым месторождениям Китая в сравнении их с заведомо безрудными магматическими образованиями различных регионов мира. На приведенных в этой работе вариационных диаграммах отчетливо выделяются практически не перекрывающиеся друг с другом поля, одни

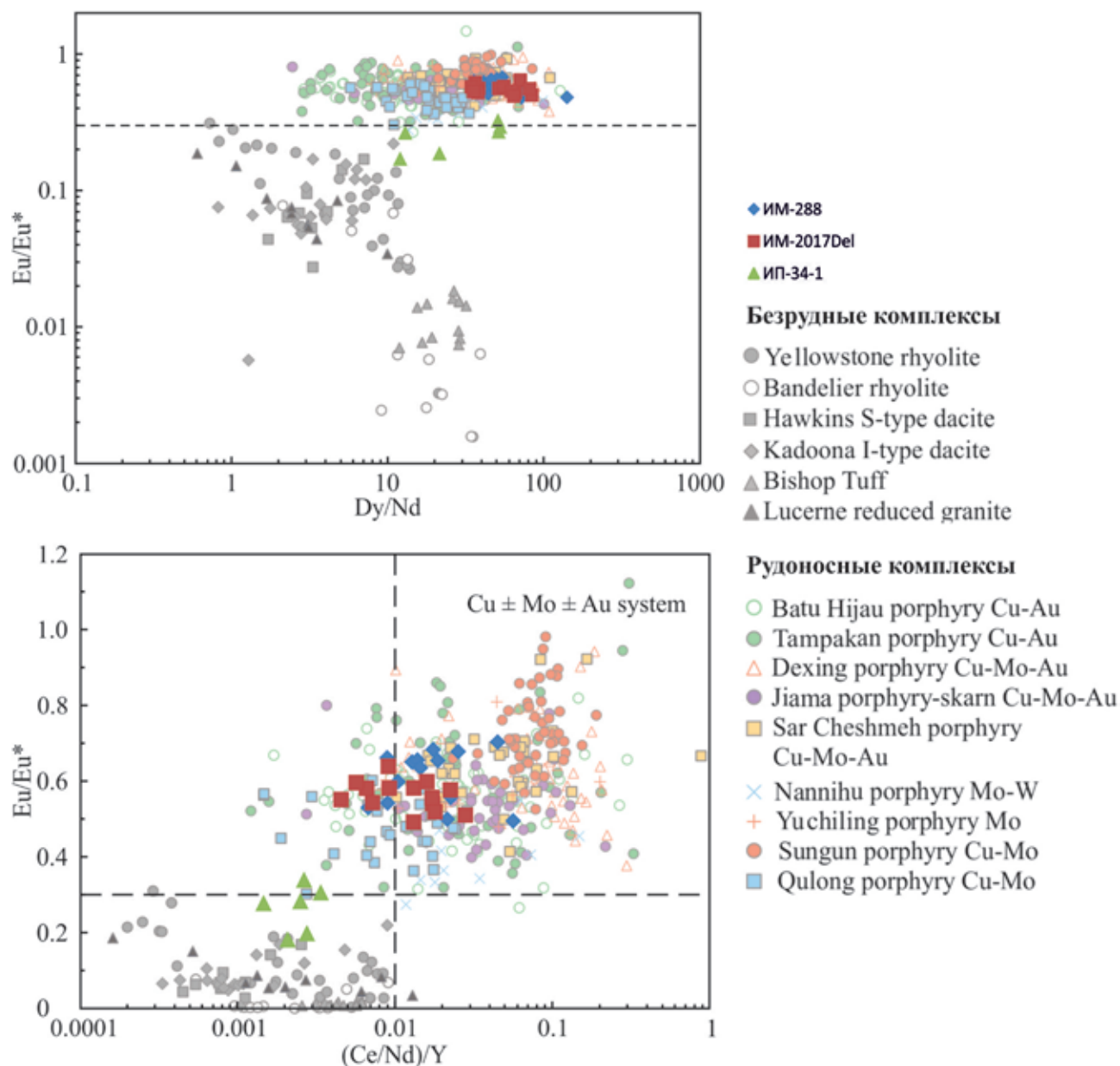


Рис. 4. Положение геохимического состава изученных зерен цирконов из образцов магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей на вариационных диаграммах, где для сравнения вынесены фигуративные точки геохимических составов цирконов из рудовмещающих интрузивных пород ведущих Au-Cu- и Au-Cu-Mo-порфировых месторождений Китая в сравнении с заведомо безрудными магматическими образованиями различных регионов мира (по [29], Fig. 5 и 6 с дополнениями авторов)

из которых отвечают цирконам из рудоносных магматических пород порфировых месторождений, а другие — заведомо безрудным магматическим комплексам.

На рис. 4 представлены вариационные диаграммы, заимствованные из работы Ю. Лу и соавторов [29], на которые специальными значками нанесены фигуративные точки геохимических составов изученных зерен циркона из магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей. Анализ диаграмм показывает, что цирконы из малмыжских гранитоидов (образцы ИМ-288, ИМ-2017Del) четко попадают в область рудоносных порфировых систем, а из понийских

монцодиорит-порфиров (обр. ИП-34-1) — в зону безрудных объектов.

Данный факт, безусловно, требует дополнительного изучения, учитывая то обстоятельство, что золоторудная минерализация порфирового и золото-кварцевого типов уже установлена в пределах Медного и Грибного участков Понийского потенциального рудного поля. Последнее, по мнению геологов АО «Росгеология», является одной из самых перспективных площадей в Хабаровском крае на обнаружение золото-медно-порфировой рудной минерализации, хотя масштаб оруденения и его промышленная значимость в пределах этих участков еще до конца

не определены. Детальные поисково-оценочные работы на территории рудного поля пока только разворачиваются усилиями компании ООО «Амур Минералс», которая по результатам прошедшего в Роснедра 20 июля 2020 г. аукциона получила право на пользование недрами и проведение дальнейших геологоразведочных работ.

Таким образом, изучение особенностей распределения элементов-примесей (P3Э + Y, Hf, U, Th, Pb) в аксессуарных цирконах из магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей, проведенное авторами статьи на основе использования геохимических моделей, предложенных Ю. Лу с соавторами [29], действительно может помочь при разбраковке порфировых магматических комплексов на потенциально рудоносные и безрудные.

Однако необходимо подчеркнуть, что до настоящего времени в зарубежной геологической литературе пока не описано ни одного случая, приведшего к открытию промышленных рудных объектов порфирового типа с помощью вышерассмотренного подхода к изучению геохимических характеристик аксессуарных цирконов из магматических комплексов. Видимо, подобные методические приемы требуют дальнейшей, более широкой апробации на примере отдельных потенциально рудоносных территорий, таких как Сихотэ-Алинь, либо всего Дальневосточного региона России в целом.

Предпосылки для успешной реализации подобного рода исследований в нашей стране имеются. В ходе реализации государственной программы по региональному геологическому изучению недр территории Российской Федерации в масштабе 1 : 1 000 000 (3-е поколение) и 1 : 200 000 (2-е издание) во ВСЕГЕИ в период с 2002 по 2020 г. создан банк изотопно-геохронологических данных по основным структурно-вещественным комплексам России. Этот банк насчитывает более 10 000 определений возраста локальным U-Pb методом и содержит коллекцию готовых к исследованию препаратов (эпоксидных шайб) с монофракциями цирконов, ранее продатированных на вторично-ионном микрозонде SHRIMP II.

Использование этого банка данных открывает перед геологами нашей страны широкие возможности при решении прогнозно-поисковых задач, связанных прежде всего с разбраковкой порфировых магматических комплексов на потенциально продуктивные и безрудные, что должно привести к повышению поисковой эффективности геологосъемочных работ за счет выявления новых участков недр, перспективных на обнаружение рудной минерализации золото-медно-порфирового геолого-промышленного типа.

1. Глебовицкий В. А. Геохимия цирконов анатектической и диатектической стадий формирования мигматов Северо-Западного Приладожья / В. А. Глебовицкий,

Л. М. Саморукова, И. С. Седова, А. М. Федосеенко // Докл. РАН. — 2008. — Т. 420, № 6. — С. 813–817.

2. Иванов В. В., Кононов В. В., Игнатъев Е. К. Минералого-геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золото-медного рудного поля Малмыж (Нижнее Приамурье) // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: VIII Косыгинские чтения. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2013. — С. 258–261.

3. Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. — М.: Наука, 1986. — 134 с.

4. Мигачев И. Ф., Гирфанов М. М., Шишаков В. Б. Медно-порфировое месторождение Песчанка // Руды и металлы. — 1995. — № 3. — С. 48–58.

5. Петров О. В. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулканоплутонических поясах восточных районов России по результатам составления листов Госгеолкарты-1000/3 / О. В. Петров, Е. А. Киселёв, В. И. Шпикерман, Ю. П. Змиевский // Региональная геология и металлогения. — 2019. — № 80. — С. 50–74.

6. Петров О. В. U-Pb SIMS геохронология рудоносных магматических пород золото-медно-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье) / О. В. Петров, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Е. А. Киселёв, В. В. Шатов, Ю. П. Змиевский, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. — 2020. — № 83. — С. 41–56.

7. Скублов С. Г. Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии / С. Г. Скублов, С. Б. Лобач-Жученко, Н. С. Гусева, И. М. Гембицкая, Е. В. Толмачёва // Геохимия. — 2009. — № 9. — С. 958–971.

8. Федотова А. А., Бибикина Е. В., Симакин С. Г. Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // Геохимия. — 2008. — № 9. — С. 980–997.

9. Ферштатер Г. Б. Геохимия циркона из магматических и метаморфических пород Урала / Г. Б. Ферштатер, А. А. Краснобаев, Ф. Беа, П. Монтеро // Литосфера. — 2012. — № 4. — С. 13–29.

10. Ханчук А. И., Гребенников А. В., Иванов В. В. Альбсеноманский окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. — 2019. — Т. 38, № 3. — С. 4–37.

11. Ханчук А. И. Альбсеноманский магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиня / А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Е. К. Игнатъев, С. В. Коваленко, Д. В. Семёнова // Докл. РАН. — 2019. — Т. 488, № 3. — С. 69–73.

12. Читалин А. Ф. Малмыж — новая крупная золото-медно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине / А. Ф. Читалин, А. А. Ефимов, К. И. Воскресенский, Е. К. Игнатъев, А. Г. Колесников // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2013. — № 3. — С. 65–69.

13. Читалин А. Ф. Порфирово-эпитермальные системы Баймской рудной зоны, Западная Чукotka / А. Ф. Читалин, Ю. Н. Николаев, И. А. Бакшеев, В. Ю. Прокофьев, Е. В. Фомичев, В. В. Усенко, Е. В. Нагорная, Л. И. Марушенко, Ю. Н. Сидорина, Г. Т. Дждежа // Смирновский сборник — 2016. Ч. I: Проблемы минерагении, экономической геологии и прогноза месторождений. — М.: МАКС Пресс, 2016. — С. 82–114.

14. Шатова Н. В. Геохронология щелочных магматических пород и метасоматитов Рябинового массива (Южная Якутия) на основе изотопно-геохимического (U-Pb, REE) исследования циркона / Н. В. Шатова, С. Г. Скублов, А. Е. Мельник, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. — 2017. — № 69. — С. 33–48.

15. Baker M. J. Epidote trace element chemistry as an exploration tool in the Collahuasi district, Northern Chile / M. J. Baker, J. J. Wilkinson, C. C. Wilkinson, D. R. Cooke,

- T. Ireland // *Economic Geology*. – 2020. – Vol. 115, no. 4. – Pp. 749–770.
16. Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2002. – Vol. 144, no. 3. – Pp. 347–364.
17. Bao X.-Sh. Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu-Au-Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny / X.-Sh. Bao, L.-Q. Yang, X. Gau, D. Groves, W.-Y. Hea, M.-M. Lia // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 116. – Pp. 1–16.
18. Bouzari F., Hart C. J. R., Bissig T. Assessing porphyry copper deposit fertility in British Columbia batholiths using zircons // *Geoscience BC* Report 2020-08*. – MDRU Publication 450. – 2020. – Pp. 1–24.
19. Buret Y. From a long-lived upper-crustal magma chamber to rapid porphyry copper emplacement: Reading the geochemistry of zircon crystals at Bajo de la Alumbrera (NW Argentina) / Y. Buret, A. Quadt, Ch. Heinrich, D. Selby, M. Walle, I. Peytcheva // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2016. – Vol. 450. – Pp. 120–131.
20. Canil D. Trace elements in magnetite from porphyry Cu-Mo-Au deposits in British Columbia, Canada / D. Canil, C. Grondahl, T. Lacourse, L. K. Pisiak // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – Vol. 72. – Pp. 1116–1128.
21. Chang Z.-G., Dong G.-C., Somarin A. K. U-Pb dating and trace element composition of zircons from the Gujiao ore-bearing intrusion, Shanxi, China: Implications for timing and mineralization of the Guojialiang iron skarn deposit // *Minerals*. – 2020. – No. 10. – Pp. 316–354.
22. Cooke D. R. Recent advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper-gold-molybdenum deposits: Detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene mineralization and alteration / D. R. Cooke, P. Agnew, P. Hollings, M. Baker, Zh. Chang, J. J. Wilkinson, A. Ahmed, N. C. White, L. Zhang, J. Thompson, J. B. Gemmill, H. Chen // *The Geological Society of London. Journal of Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2020. – Pp. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.1144/geochem2019-039>
23. Gardiner N. J. Contrasting granite metallogeny through the zircon record: A case study from Myanmar / N. J. Gardiner, Ch. J. Hawkesworth, L. J. Robb, M. J. Whitehouse, N. M. W. Roberts, Ch. L. Kirkland, N. J. Evans // *Scientific Reports*. – 2017. – No. 7. – Pp. 748–756.
24. Hedenquist J. W., Watanabe Ya., Arribas A. Hypogene alunite from the El Salvador district, Chile, indicates potential for a blind porphyry copper center // *Economic Geology*. – 2020. – Vol. 115, no. 2. – Pp. 231–240.
25. Kirkland C. L. Zircon Th/U ratios in magmatic environs / C. L. Kirkland, R. H. Smithies, R. J. M. Taylor, N. Evans, B. McDonald // *Lithos*. – 2015. – Vol. 122. – Pp. 397–414.
26. Kobylnski Ch. Protracted magmatism and mineralized hydrothermal activity at the Gibraltar porphyry copper-molybdenum deposit, British Columbia / Ch. Kobylnski, K. Hattori, S. Smith, A. Plouffe // *Economic Geology*. – 2020. – Vol. 115, no. 5. – Pp. 1119–1136.
27. Lee R. G. Magmatic evolution of granodiorite intrusions at the El Salvador porphyry copper deposit, Chile, based on trace element composition and U/Pb age of zircons / R. G. Lee, J. H. Dilles, R. M. Tosdal, J. L. Wooden, F. K. Mazdab // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112, no. 2. – Pp. 245–273.
28. Loader M. A., Wilkinson J. J., Armstrong R. N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2017. – Vol. 472. – Pp. 107–119.
29. Lu Y. J. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu \pm Mo \pm Au Deposits / Y. J. Lu, R. R. Loucks, M. L. Fiorentini, T. C. McCuaig, N. J. Evans, Z. Yang, Z. Hou, Ch. L. Kirkland, L. A. Parra-Avila, A. Kobussen // *Society Econ. Geology Special Publication*. – 2016. – No. 19. – Pp. 329–347.
30. Müller D., Groves D. I. Potassic Igneous Rocks and Associated gold-copper mineralization. – Springer, the 4th Edition. – 2016. – 311 p.
31. Park J.-W. Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu \pm Au deposits / J. -W. Park, I. H. Campbell, S. P. K. Malaviarachchi, H. Cocker, H. Hao, S. M. Kay // *Mineralium Deposita*. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 657–670.
32. Pizarro H. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits / H. Pizarro, E. Campos, F. Bouzari, S. Rousse, T. Bissig, M. Gregoire, R. Riquelme // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103771>
33. Shen P. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt / P. Shen, K. Hattori, H. Pan, S. Jackson, E. Seitmuratova // *Economic Geology*. – 2015. – Vol. 110. – Pp. 1861–1878.
34. Shu Q. Zircon trace elements and magma fertility: Insights from porphyry (-skarn) Mo deposits in NE China / Q. Shu, Zh. Chang, Y. Lai, X. Hu, H. Wu, Y. Zhang, P. Wang, D. Zhai, Ch. Zhang // *Mineralium Deposita*. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 645–656.
35. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // *Economic Geology*. – 2010. – Vol. 105, no. 1. – Pp. 3–41.
36. Soloviev S. G. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics / S. G. Soloviev, S. G. Kryazhev, S. S. Dvurechinskaya, V. E. Vasyukov, D. A. Shumilin, K. I. Voskresensky // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 113. – Pp. 1–27.
37. Uribe-Mogollon C., Maher K. White mica geochemistry: Discriminating between barren and mineralized porphyry systems // *Economic Geology*. – 2020. – Vol. 115, no. 2. – Pp. 325–354.
38. Vigneresse J.-L., Truche L., Richard A. How do metals escape from magmas to form porphyry-type ore deposits? // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 105. – Pp. 310–336.
39. Wang L. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and S-Pb isotopic compositions of the Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet, China / L. Wang, J. Tang, Y. Yang, Zh. Li, X. Lin // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – Vol. 98. – Pp. 62–79.
40. Xie F. The different source and petrogenesis of Jurassic intrusive rocks in the southern Lhasa subterranean, Tibet: Evidence from the trace element compositions of zircon, apatite, and titanite / F. Xie, J. Tang, X. Lang, D. Ma // *Lithos*. – 2018. – Vol. 314–315. – Pp. 447–462.
41. Zhang C. C. Oxygen fugacity and porphyry mineralization: A zircon perspective of Dexing porphyry Cu deposit, China / C. C. Zhang, W. D. Sun, J. T. Wang, L. P. Zhang, S. J. Sun, K. Wu // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – Vol. 206. – Pp. 343–363.
42. Zhang Z. Geochemistry and zircon trace elements composition of the Miocene ore-bearing biotite monzogranite porphyry in the Demingding porphyry Cu-Mo deposit, Tibet: Petrogenesis and implication for magma fertility / Z. Zhang, L. Wang, P. Tang, B. Lin, M. Sun, J. Qi, Y. Li, Zh. Yang // *Geological Journal*. – 2020. – Vol. 55, iss. 6. – Pp. 4525–4542.
43. Zou X. Insight into zircon REE oxy-barometers: A lattice strain model perspective / X. Zou, K. Qin, X. Han, G. Li, N. J. Evans, Zh. Li, W. Yang // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2019. – Vol. 506. – Pp. 87–96.
1. Glebovitsky V. A., Samorukova L. M., Sedova I. S., Fedoseenko A. M. Zircon geochemistry of anatectic and diatectic stages of migmatite formation in the Northwestern Ladoga Region. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 420, no. 6, pp. 813–817. (In Russian).

2. Ivanov V. V., Kononov V. V., Ignat'ev E. K. Mineralogico-geokhimicheskie osobennosti rudnoy mineralizatsii v metasomatitakh zoloto-mednogo rudnogo polya Malmyzh (Nizhnee Priamur'e) [Mineralogical and geochemical patterns of ore mineralization in metasomatites from the Malmyzh gold-copper ore field (the Trans-Amur Territory)]. *Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya Vostoka Azii: VIII Kosygin'skie chteniya*. Khabarovsk, Institut tektoniki i geofiziki im. Yu. A. Kosygina Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2013, pp. 258–261. (In Russian).
3. Krasnobaev A. A. Tsirkon kak idikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. Moscow, Nauka, 1986, 134 p.
4. Migachev I. F., Girfanov M. M., Shishakov V. B. The Peschanka copper porphyry deposit. *Ores and metals*, 1995, no. 3, pp. 48–58. (In Russian).
5. Petrov O. V., Kiselev E. A., Shpikerman V. I., Zmievskiy Yu. P. Anticipating the distribution of gold-copper-porphyry-type deposits in volcanic-plutonic belts of Russia's eastern regions based on results of compiling sheets of the State Geological Map-1000/3. *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 80, pp. 50–74. (In Russian).
6. Petrov O. V., Khanchuk A. I., Ivanov V. V., Kiselev E. A., Shatov V. V., Zmievskiy Yu. P., Molchanov A. V., Terekhov A. V., Sergeev S. A. U-Pb SIMS geochronology of ore-bearing magmatic rocks of the Malmyzh and Poni gold-copper-porphyry ore fields (Lower Amur River Region). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 83, pp. 41–56. (In Russian).
7. Skublov S. G., Lobach-Zhuchenko S. B., Guseva N. S., Gembitskaya I. M., Tolmacheva E. V. Raspre-delenie redkozemel'nykh i redkikh elementov v tsirkonakh iz miaskitovykh lamproitov Panozerskogo kompleksa Tsentral'noy Karelii [Rare earth and trace elements distribution in zircons from miaskite lamproites of the Panozero Complex, Central Karelia]. *Geokhimiya*, 2009, no. 9, pp. 958–971. (In Russian).
8. Fedotova A. A., Bibikova E. V., Simakin S. G. Ion-microprobe zircon geochemistry as an indicator of mineral genesis during geochronological studies. *Geokhimiya*, 2008, no. 9, pp. 980–997. (In Russian).
9. Fershtater G. B., Krasnobaev A. A., Bea F., Montero P. Geokhimiya tsirkona iz magmaticheskikh i metamorficheskikh porod Urala [Zircon geochemistry from magmatic and metamorphic rocks of the Urals]. *Litosfera*, 2012, no. 4, pp. 3–29. (In Russian).
10. Khanchuk A. I., Grebennikov A. V., Ivanov V. V. Albian-Cenomanian orogenic belt and igneous province of Pacific Asia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2019, vol. 38, no. 3, pp. 4–37. (In Russian).
11. Khanchuk A. I., Ivanov V. V., Ignatiev E. K., Kovalenko S. V., Semenova D. V. Albian-Cenomanian magmatism and copper ore genesis of the Sikhote-Alin. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 488, no. 3, pp. 69–73. (In Russian).
12. Chitalin A. F., Yefimov A. A., Voskresensky K. I., Ignatiev Y. K., Kolesnikov A. G. Malmyzh – a new large world-class porphyry copper-gold system in the Sikhote Alin. *Mineral resources of Russia. Economics and management*, 2013, no. 3, pp. 65–69. (In Russian).
13. Chitalin A. F., Nikolaev Yu. N., Baksheev I. A., Prokofiev V. Yu., Fomichev E. V., Usenko V. V., Nagornaya E. V., Marushchenko L. I., Sidorina Yu. N., Dzhedzheya G. T. Porfirovo-epitermal'nye sistemy Baimskoy rudnoy zony, Zapadnaya Chukotka [Porphyry-epithermal systems of the Baimskaya ore zone, Western Chukotka]. *Smirnovskiy sbornik – 2016. Ch. I: Problemy mineragenii, ekonomicheskoy geologii i prognoza mestorozhdeniy*. Moscow, MAKS Press, 2016, p. 82–114. (In Russian).
14. Shatova N. V., Skublov S. G., Mel'nik A. E., Shatov V. V., Molchanov A. V., Terekhov A. V., Sergeev S. A. Geochronology of alkaline magmatic rocks and metasomatites of the Ryabinov stock (South Yakutia) based on zircon isotopic and geochemical (U-Pb, REE) investigations. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 69, pp. 33–48. (In Russian).
15. Baker M. J., Wilkinson J. J., Wilkinson C. C., Cooke D. R., Ireland T. Epidote trace element chemistry as an exploration tool in the Collahuasi district, Northern Chile. *Economic Geology*, 2020, vol. 115, no. 4, pp. 749–770.
16. Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, vol. 144, no. 3, pp. 347–364.
17. Bao X.-Sh., Yang L.-Q., Gau X., Groves D., Hea W.-Y., Lia M.-M. Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu-Au-Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 116, pp. 1–16.
18. Bouzari F., Hart C. J. R., Bissig T. Assessing porphyry copper deposit fertility in British Columbia batholiths using zircons. *Geoscience BC* Report 2020-08*, MDRU Publication 450, 2020, pp. 1–24.
19. Buret Y., Quadt A., Heinrich Ch., Selby D., Walle M., Peytcheva I. From a long-lived upper-crustal magma chamber to rapid porphyry copper emplacement: Reading the geochemistry of zircon crystals at Bajo de la Alumbrera (NW Argentina). *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, vol. 450, pp. 120–131.
20. Canil D., Grondahl C., Lacourse T., Pisiak L. K. Trace elements in magnetite from porphyry Cu-Mo-Au deposits in British Columbia, Canada. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 1116–1128.
21. Chang Z.-G., Dong G.-C., Somarin A. K. U-Pb dating and trace element composition of zircons from the Gujiao ore-bearing intrusion, Shanxi, China: Implications for timing and mineralization of the Guojialiang iron skarn deposit. *Minerals*, 2020, no. 10, pp. 316–354.
22. Cooke D. R., Agnew P., Hollings P., Baker M., Chang Zh., Wilkinson J. J., Ahmed A., White N. C., Zhang L., Thompson J., Gemmel J. B., Chen H. Recent advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper-gold-molybdenum deposits: Detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene mineralization and alteration. *The Geological Society of London. Journal of Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2020, pp. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.1144/geochem2019-039>
23. Gardiner N. J., Hawkesworth Ch. J., Robb L. J., Whitehouse M. J., Roberts N. M. W., Kirkland Ch. L., Evans N. J. Contrasting granite metallogeny through the zircon record: A case study from Myanmar. *Scientific Reports*, 2017, no. 7, pp. 748–756.
24. Hedenquist J. W., Watanabe Ya., Arribas A. Hypogene alunite from the El Salvador district, Chile, indicates potential for a blind porphyry copper center. *Economic Geology*, 2020, vol. 115, no. 2, pp. 231–240.
25. Kirkland C. L., Smithies R. H., Taylor R. J. M., Evans N., McDonald B. Zircon Th/U ratios in magmatic environs. *Lithos*, 2015, vol. 212, pp. 397–414.
26. Kobylinski Ch., Hattori K., Smith S., Plouffe A. Protracted magmatism and mineralized hydrothermal activity at the Gibraltar porphyry copper-molybdenum deposit, British Columbia. *Economic Geology*, 2020, vol. 115, no. 5, pp. 1119–1136.
27. Lee R. G., Dilles J. H., Tosdal R. M., Wooden J. L., Mazdab F. K. Magmatic evolution of granodiorite intrusions at the El Salvador porphyry copper deposit, Chile, based on trace element composition and U/Pb age of zircons. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 245–273.
28. Loader M. A., Wilkinson J. J., Armstrong R. N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 472, pp. 107–119.
29. Lu Y.-J., Loucks R. R., Fiorentini M., Mc Cuaig T. C., Evans N. J., Yang Z.-M., Hou Z.-Q., Kirkland Ch. L., Parra-Avila L. A., Kobussen A. Zircon compositions as a pathfinder

for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. *Society Econ. Geology Special Publication*, 2016, no. 19, pp. 329–347.

30. Müller D., Groves D. I. *Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization*. Springer, the 4th Edition. 2016, 311 p.

31. Park J.-W., Campbell I. H., Malaviarachchi S. P. K., Cocker H., Hao H., Kay S. M. Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu ± Au deposits. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 657–670.

32. Pizarro H., Campos E., Bouzari F., Rousse S., Bisig T., Gregoire M., Riquelme R. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103771>

33. Shen P., Hattori K., Pan H., Jackson S., Seitmuratova E. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 1861–1878.

34. Shu Q., Chang Zh., Lai Y., Hu X., Wu H., Zhang Y., Wang P., Zhai D., Zhang Ch. Zircon trace elements and magma fertility: Insights from porphyry (-skarn) Mo deposits in NE China. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 645–656.

35. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, no. 1, pp. 3–41.

36. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechinskaya S. S., Vasyukov V. E., Shumilin D. A., Voskresensky K. I. The super-large Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113, pp. 1–27.

37. Uribe-Mogollon C., Maher K. White mica geochemistry: Discriminating between barren and mineralized porphyry systems. *Economic Geology*, 2020, vol. 115, no. 2, pp. 325–354.

38. Vignerresse J.-L., Truche L., Richard A. How do metals escape from magmas to form porphyry-type ore deposits? *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 310–336.

39. Wang L., Tang J., Yang Y., Li Zh., Lin X. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and S-Pb isotopic compositions of the Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet, China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 98, pp. 62–79.

40. Xie F., Tang J., Lang X., Ma D. The different source and petrogenesis of Jurassic intrusive rocks in the southern Lhasa subterranean, Tibet: Evidence from the trace element compositions of zircon, apatite, and titanite. *Lithos*, 2018, vol. 314–315, pp. 447–462.

41. Zhang C.-C., Sun W.-D., Wang J.-T., Zhang L.-P., Sun S.-J., Wu K. Oxygen fugacity and porphyry mineralization: A zircon perspective of Dexing porphyry Cu deposit, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 206, pp. 343–363.

42. Zhang Z., Wang L., Tang P., Lin B., Sun M., Qi J., Li Y., Yang Zh. Geochemistry and zircon trace elements composition of the Miocene ore-bearing biotite monzogranite porphyry in the Demingding porphyry Cu-Mo deposit, Tibet: Petrogenesis and implication for magma fertility. *Geological Journal*, 2020, vol. 55, iss. 6, pp. 4525–4542.

43. Zou X., Qin K., Han X., Li G., Evans N. J., Li Zh., Yang W. Insight into zircon REE oxy-barometers: A lattice strain model perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, vol. 506, pp. 87–96.

Петров Олег Владимирович – чл.-корр. РАН, доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ¹. <vsegei@vsegei.ru>

Киселёв Евгений Аркадьевич – зам. министра природных ресурсов и экологии Российской Федерации, руководитель, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). Большая Грузинская ул., 4/6, стр. 1, Москва, 125993, Россия.

Ханчук Александр Иванович – академик РАН, доктор геол.-минерал. наук, науч. руководитель, ДВГИ ДВО РАН². <axanchuk@mail.ru>

Иванов Владимир Викторович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, руководитель лаборатории, ДВГИ ДВО РАН². <d159327@yandex.ru>

Шатов Виталий Витальевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. специалист, ВСЕГЕИ¹. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Аленичева Антонина Андреевна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹.

<antonina_alenicheva@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, директор, Центр прогнозно-металлогенических исследований ВСЕГЕИ¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Терехов Артем Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <artem_terekhov@vsegei.ru>

Леонтьев Василий Иванович – канд. геол.-минерал. наук, вед. геолог, ВСЕГЕИ¹. <vasily_leontiev@vsegei.ru>

Родионов Николай Викторович – канд. физ.-мат. наук, зав. сектором, Центр изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ¹. <nickolay_rodionov@vsegei.ru>

Беляцкий Борис Владимирович – вед. инженер, ЦИИ ВСЕГЕИ¹. <bbelyatsky@mail.ru>

Сергеев Сергей Андреевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, ЦИИ ВСЕГЕИ¹. <sergey_sergeev@vsegei.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Corresponding Member of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <vsegei@vsegei.ru>

Kiselev Evgeniy Arkad'evich – Deputy Minister of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Head, Federal Agency of Mineral Resources (Rosnedra). 4/6 Bol'shaya Gruzinskaya, str. 1, Moscow, 125993, Russia.

Khanchuk Alexander Ivanovich – Academician of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Research Supervisor, FEGI FEB RAS². <axanchuk@mail.ru>

Ivanov Vladimir Victorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Scientist, Head of Laboratory, FEGI FEB RAS². <d159327@yandex.ru>

Shatov Vitaly Vitalievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Geologist, VSEGEI¹. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Alenicheva Antonina Andreevna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI¹. <antonina_alenicheva@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilievich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Predictive Metallogenic Studies of VSEGEI¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Terekhov Artem Valer'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹.
<artem_terekhov@vsegei.ru>

Leont'ev Vasily Ivanovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Geologist, VSEGEI¹.
<vasily_leontiev@vsegei.ru>

Rodionov Nikolay Viktorovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Sector, Centre of Isotopic Research of VSEGEI¹ (CIR VSEGEI). <nickolay_rodionov@vsegei.ru>

Belyatskiy Boris Vladimirovich – Leading Engineer, CIR VSEGEI¹. <bbelyatsky@mail.ru>

Sergeev Sergey Andreevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, CIR VSEGEI¹.
<sergey_sergeev@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.

² Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН). Пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022, Россия.

Far East Geological Institute of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS). 159 Prospekt 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia.