

Научная статья

УДК 552.321.1/.4:553.43'411(470)

doi:10.52349/0869-7892_2024_100_126-146

Оценка перспектив рудоносности гранитоидных комплексов территории Российской Федерации на золото-медно-порфировое оруденение по результатам изотопно-геохимического изучения акцессорных цирконов

В. В. Шатов¹✉, М. А. Ткаченко¹,
Т. Н. Зубова¹, С. С. Шевченко¹,
В. И. Леонтьев¹, Б. В. Беляцкий¹,
Н. В. Родионов¹, С. А. Сергеев¹,
А. В. Тарасов², С. И. Трушин³,
А. В. Козлов⁴

¹Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия, vitaly_shatov@karpinskyinstitute.ru✉

²Федеральное агентство по недропользованию, Москва, Россия

³АО «Полиметалл», Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: изотопно-геохимические исследования цирконов (PIZs), рудоносность магматических пород, золото-медно-порфировое оруденение, территория Российской Федерации

Для цитирования: Оценка перспектив рудоносности гранитоидных комплексов территории Российской Федерации на золото-медно-порфировое оруденение по результатам изотопно-геохимического изучения акцессорных цирконов / В. В. Шатов [и др.] // Региональная геология и металлогения. 2024. Т. 31, № 4. С. 126–146. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_100_126-146

Аннотация. В статье обсуждаются новые данные, полученные в ходе регионального прогнозно-минерагенического анализа территории Российской Федерации на золото-медно-порфировое оруденение на основе изучения закономерностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Ti, Hf, U, Th, Pb) в акцессорных цирконах. В них определялись индикативные геохимические параметры — Porphyry Indicator Zircons (PIZs): 1) Ce/Nd; 2) Eu/Eu*; 3) (Ce/Nd)/Y; 4) Dy/Yb; 5) (10000xEu/Eu*)/Y; 6) Th/U и 7) T° C (*Ti-in-zircon thermometer*), предложенные Х. Пизарро с соавторами для разбраковки разновозрастных гранитоидных комплексов на потенциально рудоносные и «безрудные». За весь период исследований на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe было изучено 317 образцов, принадлежащих 255 объектам исследования. Они относятся либо к интрузивным комплексам, либо к отдельным гранитоидным массивам (или к их отдельным фазам внедрения), перспективным на порфировое оруденение.

В результате было установлено, что большая часть из изученных комплексов гранитоидов показала отрицательный результат, тогда как наивысшей степени продуктивности (когда значения всех семи индикативных параметров PIZs соответствуют их референтным значениям) отвечает каждый восьмой из изученных объектов. Полученные результаты исследований позволили из более чем 200 перспективных участков обосновать по изотопно-геохимическим данным 15 площадей, находящихся в Нераспределенном фонде недр, что будет способствовать развитию заявительного принципа лицензирования в нашей стране.



© В. В. Шатов, М. А. Ткаченко, Т. Н. Зубова, С. С. Шевченко, В. И. Леонтьев, Б. В. Беляцкий, Н. В. Родионов, С. А. Сергеев, А. В. Тарасов, С. И. Трушин, А. В. Козлов, 2024

Original article

UDC 552.321.1/.4:553.43*411(470)
doi:10.52349/0869-7892_2024_100_126-146

Revealing the porphyry copper-gold potential in granitoid complexes of the Russian Federation based on Porphyry Indicator Zircons (PIZs)

V. V. Shatov¹✉, M. A. Tkachenko¹,
T. N. Zubova¹, S. S. Shevchenko¹,
V. I. Leontev¹, B. V. Belyatsky¹,
N. V. Rodionov¹, S. A. Sergeev¹,
A. V. Tarasov², S. I. Trushin³,
A. V. Kozlov⁴

¹All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky, Saint Petersburg, Russia, vitaly_shatov@karpinskyinstitute.ru✉

²Federal Subsoil Resources Management Agency, Moscow, Russia

³Polymetal, Saint Petersburg, Russia

⁴Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Keywords: Porphyry Indicator Zircons — PIZs, ore potential of magmatic rocks, copper-gold-porphyry mineralization, Russian Federation

For citation: Revealing the porphyry copper-gold potential in granitoid complexes of the Russian Federation based on Porphyry Indicator Zircons (PIZs) / V. V. Shatov [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2024; 31 (4): 126–146. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_100_126-146

Abstract. The paper discusses new data from the regional metallogenic surveillance of the Russian Federation territory for porphyry gold-copper mineralization after the authors analyzing the distribution patterns of trace elements (REE+Y, Ti, Hf, U, Th, Pb) in accessory zircons. They correspond to their indicative geochemical parameters — Porphyry Indicator Zircons (PIZs): 1) Ce/Nd; 2) Eu/Eu*; 3) (Ce/Nd)/Y; 4) Dy/Yb; 5) (10000xEu/Eu*)/Y; 6) Th/U and 7) T^oC (*Ti-in-zircon thermometer*), which H. Pizarro et al. proposed to sort the granitoid complexes of different ages into potentially ore-bearing and barren. The SHRIMP-II secondary ion microprobe studied 317 samples belonging to 255 granitoid complexes. They relate to either intrusive complexes or separate granitoid massifs (or their separate intrusion phrases) as prospective for porphyry mineralization.

Most of the studied granitoid complexes were found to show a negative result, while only every eighth met the highest degree of productivity, when the values of all seven PIZs correspond to their reference values. The findings justify 15 new localities from the unlicensed subsoil fund out of more than 200 prospective sites, which will contribute to applying for new licenses in Russia.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что месторождения порфиrowого семейства относятся к числу главных источников меди, молибдена и золота на нашей планете. На долю порфиrowых месторождений в настоящее время приходится до 60 % мирового производства меди, 35–40 % — золота и более 95 % мирового производства молибдена [1–4].

Главными планетарными тектоническими структурами, контролирующими размещение месторождений порфиrowого семейства (рис. 1), являются [4]:

— Средиземноморско-Гималайский альпийский подвижный пояс, протянувшийся от Филиппин и Индонезийского архипелага через Тибет, Иран и Турцию до Болгарии и Румынии;

— Западно-Тихоокеанский и Восточно-Тихоокеанский окраинно-континентальные интрузивно-вулканические пояса;

— Урало-Монгольский подвижный пояс;

— Северо-Американский (Аппалачский) подвижный пояс;

— складчатые структуры древних щитов (в Австралии, Африке, Южной и Северной Америке, Восточно-Европейская платформа).

Открытие в последние несколько десятилетий крупных золото-медно-порфиrowых и медно-молибден-порфиrowых месторождений как в известных, так и в новых горнорудных районах (Пиббл на Аляске, Ою Толгой в Монголии, Чукару Пеки в Сербии, Каскабель в Перу, Быстринское в Забайкалье, Малмыж на Дальнем Востоке России и др.) дает основание предполагать, что роль порфиrowых объектов в мировой экономике меди с каждым годом будет только возрастать.

В нашей стране на долю порфиrowого геолого-промышленного типа приходится не более 21 % разведанных запасов меди и 6 % золота. Похожая картина сложилась и с молибденом. В структуре минерально-сырьевой базы (далее — МСБ) молибдена России на долю порфиrowых объектов приходится только 15 % разведанных запасов, тогда как в мире — 95 %. Еще в 2012 г. добыча меди на порфиrowых месторождениях России не велась. Однако в 2023 г. она составила уже около 20 %.

На данный момент на территории Российской Федерации выявлено 71 месторождение (17 — крупных, 15 — средних и 39 — мелких) и 518 рудопроявлений, которые с определенной долей условности можно отнести к порфировому геолого-промышленному типу (рис. 2). Из шести ведущих золото-медно-порфириновых месторождений России четыре (Малмыж, Аксуг, Томинское и Михеевское) относятся к крупным по запасам месторождениям, одно — к средним (Сорское) и одно — это месторождение Песчанка — возможно, в ближайшее время после экспертизы Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых перейдет в разряд уникальных ($\text{Cu} > 10$ млн т), таких как Эль-Тениенте, Рио-Бланко, Эскондида и Чукикамата в Чили, Грасберг в Папуа — Новая Гвинея, Кальмакыр и Дальнее в Узбекистане, Бингэм, Клаймакс и Хендерсон в США, Ою-Толгой в Монголии, Пэбл на Аляске и др. [2–8].

Здесь возникает закономерный вопрос: почему структура МСБ меди, золота и молибдена в России

так разительно отличается от мировой? В чем причина?

В геологическом отношении территория России выглядит достаточно благоприятно с точки зрения возможностей обнаружения новых порфириновых объектов. В ее пределах установлены кайнозойские, мезозойские и палеозойские вулканоплутонические пояса окраинно-континентального типа, получил широкое развитие мощнейший островодужный или син- и постколлизийный магматизм. То есть, казалось бы, в пределах нашей страны существовали все необходимые условия для формирования порфириновых объектов, а месторождений мало.

Ответ на это вопрос связан, по-видимому, с тем обстоятельством, что в течение длительного времени, еще начиная с советских времен, прогнозу и поискам этого типа рудных объектов на территории Российской Федерации не уделялось должное внимание из-за наличия гораздо более богатых медных руд в колчеданных и сульфидно-никелевых месторождениях. На прогнозирование порфиринового

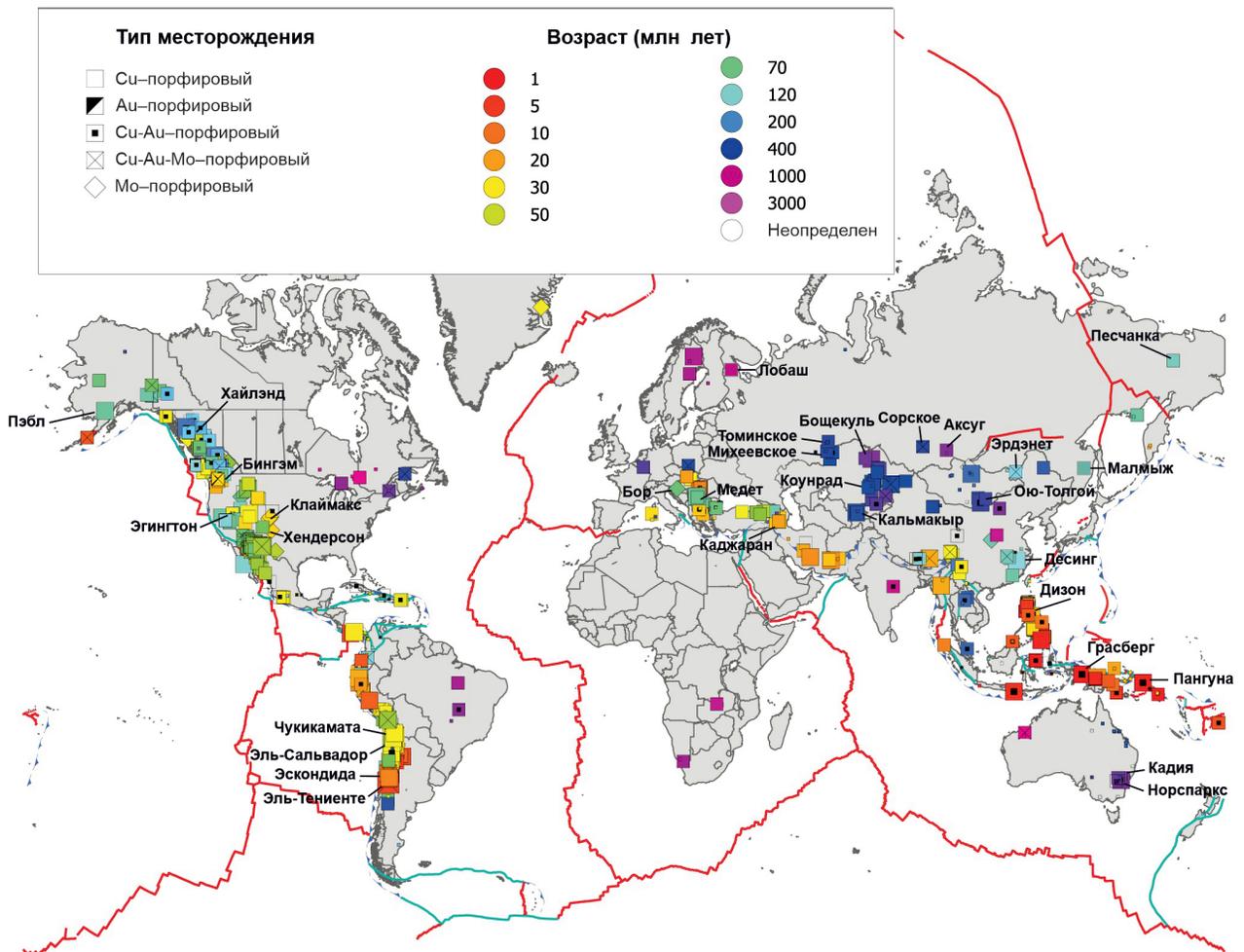


Рис. 1. Закономерности глобального распределения месторождений порфиринового семейства с учетом их рудной специализации и возраста оруденения

Источник: составлено автором В. В. Шатовым на основе [4]

Fig. 1. Global distribution patterns of the porphyry family deposits, with their ore specialization and mineralization age considered

Source: adapted by the author V. V. Shatov from [4]

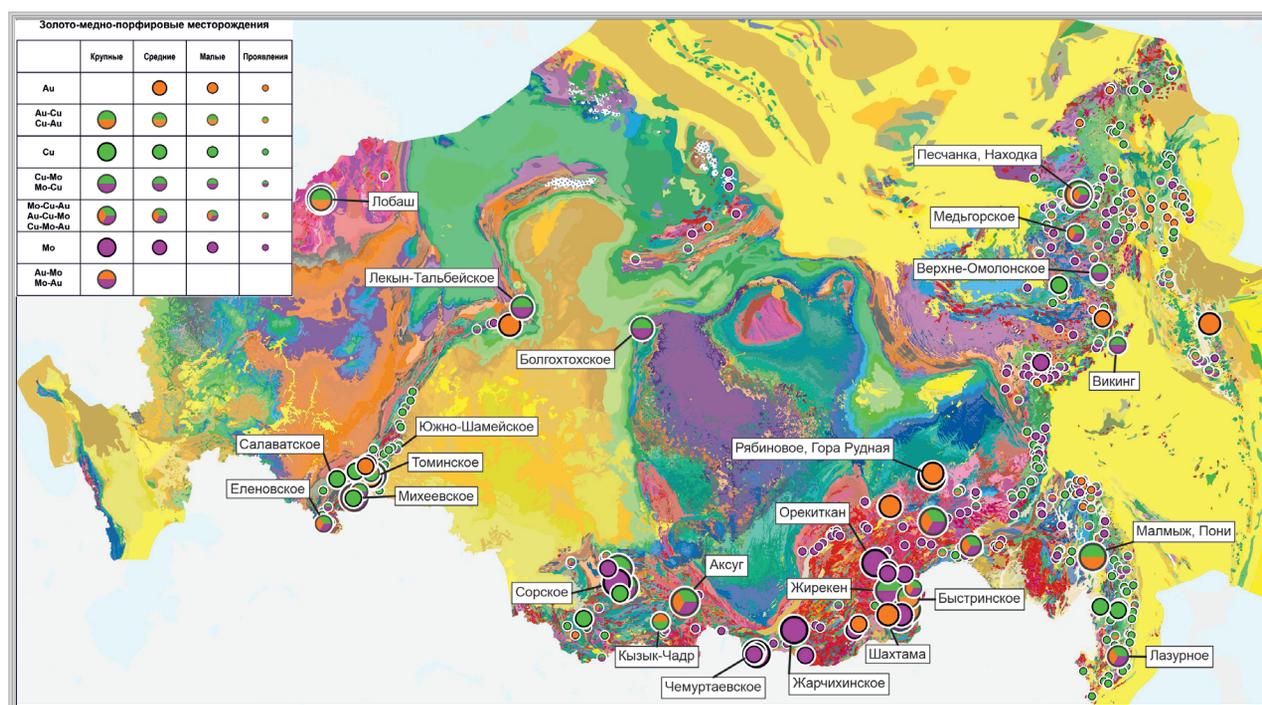


Рис. 2. Месторождения и рудопроявления порфирового семейства на территории Российской Федерации

Fig. 2. Porphyry family deposits and ore occurrences in the Russian Federation

оруденения все усилия были направлены в пределах Среднеазиатских и Закавказских Республик бывшего Советского Союза — в Казахстане, Узбекистане, Таджикистане, Кыргызстане и Армении, что привело к открытию там целого ряда порфирировых объектов мирового класса, таких как Медный Коунрад, Боцекуль, Актогай, Айдарлы, Нурказган, Саяк, Кокташжал, Карата, Коксай, Талдыбулак, Кальмакыр, Дальнее, Каджаран и др.

Тем не менее количество отечественных запасов меди, золота и молибдена, связанных с порфирировыми объектами, хоть и медленно, но с каждым годом продолжает расти, прежде всего в связи с открытием таких крупных порфирировых месторождений, как Малмыж и детальной разведки месторождения Песчанка на Дальнем Востоке России, как и ранее открытых Быстринского в Забайкалье, Михеевского и Томинского на Урале, Аксуг и Кызык-Чадр в Алтае-Саянской складчатой области и др. [5–8].

То есть можно ожидать, что перспективы воспроизводства МСБ меди, золота и молибдена нашей страны будут связаны в ближайшие годы, в том числе и с открытием и разведкой новых объектов порфирирового семейства.

Карта закономерностей размещения золото-медно-порфирировых месторождений России. ФГБУ «Институт Карпинского» в последние годы в результате реализации Государственной программы по региональному геологическому изучению недр территории Российской Федерации в масштабе 1 : 1 000 000 (3-е поколение) (далее — ГК-1000/3) и 1 : 200 000 (2-е издание) (далее — ГК-200/2) накоплен обширный фактический материал по характе-

ристике золото-медно-порфирировых месторождений территории Российской Федерации, обстановкам их проявления и закономерностям размещения, что позволило составить *Карту закономерностей размещения золото-медно-порфирировых месторождений России масштаба 1 : 2 500 000* [9].

Карта подготовлена в формате ArcGIS 10.2 и включает в себя целый ряд тематических «слоев», а также базу данных по рудным объектам порфирирового семейства. На карте отражено положение всех известных месторождений, рудопоявлений и проявлений порфирировой рудной минерализации, а также 297 рудных и потенциально рудных узлов, перспективных на обнаружение порфирирового оруденения.

Анализ карты дал возможность локализовать на территории Российской Федерации более 200 перспективных на обнаружение порфирировой рудной минерализации участков недр, привязанных к номенклатурным листам ГК-200/2 с целью постановки в их пределах геологического доизучения площадей указанного масштаба, в том числе 179 единиц (50 — первой и 129 — второй очереди) по территории Дальневосточного федерального округа [9] (табл. 1).

Однако здесь возникает закономерный вопрос: каким образом выделить среди такого многообразия перспективных участков наиболее интересные в поисковом отношении объекты?

Общезвестно, что одной из главных проблем геологосъемочных работ на современном этапе является повышение их поисковой эффективности. Актуальность этой проблемы не вызывает сомнений

в связи с тем, что лимит легко открываемых месторождений, в том числе и золото-медно-порфирового геолого-промышленного типа, в настоящее время практически полностью исчерпан как в нашей стране, так и за рубежом. Новые рудные объекты могут быть обнаружены только за счет не выходящих на дневную поверхность рудных месторождений.

Повышение поисковой эффективности средних и мелкомасштабных геологосъемочных работ, а также региональных прогнозно-минерагенических исследований можно ожидать от широкого привлечения наряду с геохимическими, геофизическими, дистанционными и другими методами, также и *прецизионных изотопно-геохимических методов исследования вещества горных пород, руд и минералов.*

Прецизионные изотопно-геохимические методы исследования при прогнозировании порфирового оруденения. В последние годы за рубежом, главным образом в Австралии, Канаде, США, Аргентине, Чили, Китае, Великобритании и в 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.

Первое направление — изучение химического состава типоморфных минералов гидротермально измененных пород, таких как *эпидот, хлорит, турмалин, магнетит, алунит, серицит-мусковит, пирит* и др., что позволяет определить направление и оценить расстояние до эпицентров рудоконцентрирования в пределах конкретных порфировых систем и осуществить оценку уровня их эрозионного среза.

Второе направление — 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 аксессуарных минералах, в первую очередь в цирконе.

То есть циркон, будучи одним из наиболее информативных аксессуарных минералов магматических горных пород, может быть использован не только для оценки радиологического возраста их кристаллизации, но и для характеристики физико-химических и термодинамических условий формирования потенциально рудоносных материнских магматических расплавов.

Так, например, во многих публикациях по этому вопросу [10–30] было показано, что такие геохимические характеристики циркона, как содержание в нем Y, Hf, U, Th, P и Ti, величина отношений Ce/U , U/Ti , Ce/Ce^* и Eu/Eu^* , являются индикаторами 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 значениями отрицательных аномалий европия* [20]. Такая

Таблица 1

Распределение по федеральным округам Российской Федерации наиболее перспективных для обнаружения порфировой рудной минерализации номенклатурных листов масштаба 1 : 200 000 с целью постановки в их пределах работ по ГДП-200/2

Table 1. Topographic sheets distribution (scale of 1 : 200,000) by federal districts of the Russian Federation, with the most prospective porphyry mineralization sites included, in order to organize the relevant additional site exploration (scale of 1 : 200,000, second edition)

Федеральный округ	Без учета ООПТ и изученности	С учетом ООПТ и изученности	Перспективные участки	
			1-й очереди	2-й очереди
Дальневосточный (без Саха Якутии)	279	179	50	129
Дальневосточный (Саха Якутия)	46	32	9	23
Приволжский	7	0	0	0
Северо-Западный	1	0	0	0
Сибирский	102	44	23	21
Уральский	28	1	1	0
В целом по России	463	256	83	173

Источник: составлено автором В. В. Шатовым на основе [9]

Source: adapted by the author V. V. Shatov from [9]

«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.

Изучение цирконов из магматических пород, тесно ассоциирующихся с рудной порфировой минерализацией, подтвердило эти закономерности. Однако, как показали результаты исследований М. А. Лоадера с соавторами [20] и Карраско-Годоя с соавторами [18], совместная кристаллизация или предшествующая кристаллизация фосфатов (апатита, монацита, ксенотима и др.) и/или титанита может значительно повлиять на микроэлементный состав редкоземельных элементов циркона. Кроме того, этими авторами было продемонстрировано, что кристаллизация титанита может иметь большое влияние на уровень отрицательных аномалий европия. Поэтому было рекомендовано использовать для анализа только цирконы с содержаниями тантала выше 0,2 г/т, и фосфора ниже 176 г/т, т. к. в таких случаях можно предположить отсутствие влияния титанита и апатита на микроэлементный состав циркона.

На основе использования этих закономерностей Ю. Лу с соавторами [22] предложили ряд дополнительных геохимических параметров для данной модели формирования порфировых систем, а именно, расчет величин отношений Eu/Eu^* , $Eu/Eu^*/Y$, Dy/Nd , Ce/Nd и $Ce/Nd/Y$, которые позволяют более надежно разрабатывать порфировые магматические комплексы на потенциально рудоносные и «безрудные».

На данный момент предложенные этими авторами дискриминационные диаграммы (рис. 3) могут рассматриваться в качестве достаточно точного и надежного инструмента для определения продуктивности порфировых интрузивных массивов. Позднее Х. Пизарро с соавторами [29] на основе обобщения большого фактического материала по порфировым месторождениям мира удалось статистически обосновать семь основных индикативных геохимических параметров цирконов — Porphyry Indicator Zircons (далее — PIZs), указывающих на то — был ли материнский гранитоидный расплав в достаточной степени водонасыщен, окислен, обогащен серой и рудогенными элементами для того, чтобы запустить продуктивную рудоформирующую порфировую систему (табл. 2).

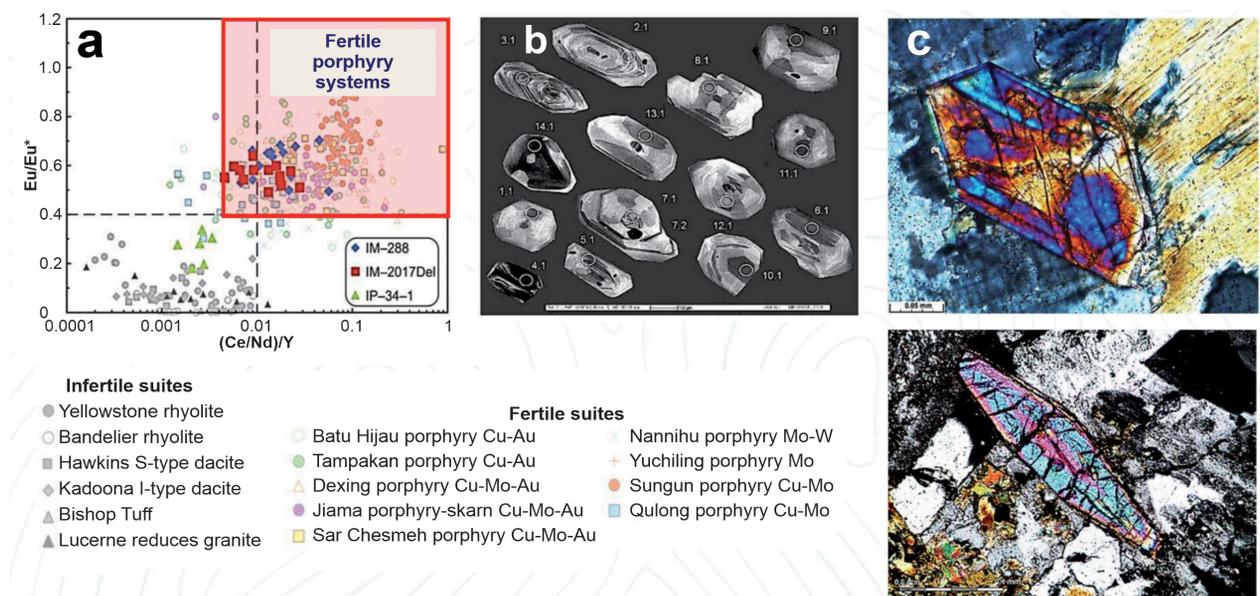


Рис. 3. Прецизионные изотопно-геохимические методы исследований при прогнозировании порфирового оруденения

a — положение геохимического состава изученных зерен цирконов из образцов магматических пород Малмыжского (обр. IM-288 и IM-2017Del) и Понийского (обр. IP-34-1) рудных полей на вариационной диаграмме: Eu/Eu^* — $(Ce/Nd)/Y$, на которой для сравнения вынесены фигуративные точки геохимических составов цирконов из рудовмещающих интрузивных пород ведущих Au-Cu- и Au-Cu-Mo-порфировых месторождений Центрально-Азиатского подвижного пояса в сравнении с заведомо безрудными магматическими образованиями из различных регионов мира; **b** — катодолуминесцентное изображение зерен циркона из гранитоидов Малмыжского рудного поля; **c** — микрофотографии цирконов из гранитоидов Малмыжского и Понийского рудного поля

Источник: составлено автором В. В. Шатовым на основе [22]

Fig. 3. Precision isotope and geochemical research methods for predicting porphyry mineralization

a — geochemical composition of the studied zircon grains from igneous rock samples of the Malmyzh (samples IM-288 and IM-2017Del) and Poni (sample IP-34-1) ore fields, its location on the variation diagram Eu/Eu^* — $(Ce/Nd)/Y$. Geochemical compositions of ore-hosting intrusive rock zircons from major Au-Cu- and Au-Cu-Mo-porphyry deposits of the Central Asian mobile belt display figurative points to compare with obviously barren igneous formations from various world regions; **b** — cathodoluminescence image of zircon grains from the Malmyzh ore field granitoids; **c** — microphotographs of zircons from the Malmyzh and Poni ore fields granitoids

Source: adapted by the author V. V. Shatov from [22]

В 2022 г. в рамках Госзадания Роснедра в ФГБУ «Институт Карпинского» был запущен трехлетний проект «*Определение критериев рудоносности гранитоидов в отношении золото-медно-порфирирового оруденения по результатам изотопно-геохимического изучения акцессорных цирконов*» в пределах Уральской, Таймыро-Северо-земельской, Алтае-Саянской, Ангаро-Енисейской, Анабаро-Виллюйской, Алдано-Забайкальской, Дальневосточной, Верхояно-Колымской, Охотоморской, Чукотской и Корякско-Курильской серий листов (далее — СЛ) ГК-1000/3.

Главная задача этих исследований заключалась в проведении регионального прогнозно-минерагенического анализа территории Российской Федерации на золото-медно-порфирировое оруденение на основе изучения закономерностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Ti, Hf, U, Th, Pb) в акцессорных цирконах с определением их PIZs, позволяющих разбраковывать разновозрастные гранитоидные комплексы на потенциально рудоносные и «безрудные».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе реализации Государственной программы по региональному геологическому изучению недр территории России в масштабе 1 : 1 000 000 (3-е поколение) и 1 : 200 000 (2-е издание) в Институте Карпинского в период с 2002 по 2024 г. был создан Геохронологический атлас как интернет-ресурс изотопно-геохронологических данных по основным структурно-вещественным комплексам России.

Этот банк к началу работ по объекту насчитывал более 8000 определений возраста локальным U-Pb методом и содержал коллекцию готовых к исследованию **препаратов (эпоксидных шайб) с монофракциями цирконов**, ранее продатированных на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe.

Использование этого банка эпоксидных шайб позволило исполнителям проекта подойти к решению выше поставленных задач, связанных, прежде всего, с разбраковкой порфирировых магматических комплексов на *потенциально продуктивные* и «*безрудные*» в отношении порфирирового оруденения.

Всего за весь период исследований, начиная с 2022 г., на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe было изучено **317** образцов или эпоксидных шайб, принадлежащих к **255** объектам исследования, которые относились либо к интрузивным комплексам, либо к отдельным гранитоидным массивам (или к их отдельным фазам внедрения), перспективным на порфирировое оруденение.

Выбор образцов с цирконами из банка эпоксидных шайб Центра изотопных исследований ФГБУ «Институт Карпинского» (далее — ЦИИ) под изучение на предмет определения PIZs осуществлялся в три этапа: в 2022 г. было изучено 100 обр., в 2023 г. — 100 обр. и в 2024 г. — 117 обр.

При этом использовались все имеющиеся у исполнителей данные: материалы регионального прогнозно-минерагенического анализа территории России на порфирировое оруденение, текущие и ретроспективные результаты геологосъемочных работ ГК-1000/3 и ГК-200/2, а также опубликованные материалы специалистов из институтов РАН

Таблица 2

Значения индикативных геохимических параметров циркона Porphyry Indicator Zircons (PIZs)

Table 2. Indicative geochemical parameters values of zircon – Porphyry Indicator Zircons (PIZs)

№ п/п	Индикативные геохимические параметры циркона (PIZs)	Референтные значения параметра PIZs	
		after Lu at al., 2016 and Pizarro et al., 2020	after Carrasco-Godoy et al., 2024
1	Ce/Nd	> 1	> 12
2	Eu/Eu*	> 0,4	> 0,36
3	(Ce/Nd)/Y	> 0,01	> 0,018
4	Dy/Yb	< 0,3	< 0,25
5	(10000xEu/Eu*)/Y	> 1	> 4,4
6	Th/U	0,1 ÷ 1,0	–
7	To C (Ti-in-zircon thermometer)	637 ÷ 738	–
8	Gd (r/t)	–	< 13,5
9	Sm (r/t)	–	< 2,4
10	P (r/t)	–	< 176

Источник: составлено авторами В. В. Шатовым, С. А. Сергеевым, Б. В. Беляцким, Н. В. Родионовым на основе [18; 22; 29]

Source: adapted by the authors V. V. Shatov, S. A. Sergeev, B. V. Belyatsky, N. V. Rodionov from [18; 22; 29]

и Минобрнауки. То есть в ходе этой селекционной работы была задействована большая группа специалистов как из региональных и предметных отделов ФГБУ «Институт Карпинского» (В. Н. Александров, А. А. Аленичева, А. А. Багаева, В. Н. Безруков, Е. А. Брусницына, Н. А. Гольцин, В. Г. Гузев, Н. И. Гусев, Д. В. Зархидзе, Ю. П. Змиевский, В. И. Леонтьев, К. Н. Мазуркевич, А. В. Молчанов, М. А. Павлова, В. М. Павлюк, С. Ю. Петров, М. Н. Петрова, В. Ф. Проскурнин, М. А. Проскурнина, С. В. Серегин, В. В. Снежко, Т. Н. Сурин, С. Н. Сычев, А. В. Терехов, Н. В. Шатова, В. И. Шпикерман, Ю. Ю. Юрченко и др.), так и из институтов РАН (И. В. Викентьев, А. И. Грабежев, А. А. Калинин, О. Ю. Плотинская, С. Г. Скублов и др.) и компаний-недропользователей (С. И. Трушин, А. И. Осецкий — АО «Полиметалл»).

При отборе образцов на определение PIZs в качестве петрогеохимических критериев их принадлежности к порфиоровому семейству авторы статьи использовали типовые вариационные диаграммы (рис. 4): 1) TAS ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$); 2) глиноземистости $\text{CaO}/[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}] - \text{Al}_2\text{O}_3/[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}]$; 3) $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} - \text{SiO}_2$ и 4) $\text{Sr}/\text{Y} - \text{Y}$, на которых, по данным литературных источников, показано положение фигуративных точек усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород главных Cu-, Au-Cu-, Au-Cu-Mo-, Mo и Sn-порфиоровых месторождений мира.

Определение индикативных геохимических характеристик циркона проводилось в тесном взаимодействии со специалистами ЦИИ Института Карпинского — С. А. Сергеевым, Н. В. Родионовым, Б. В. Беляцким и др.

Применение в ЦИИ вторично-ионного масс-спектрометра (SIMS) в сочетании с предварительной катодолуминесцентной и оптической документацией позволило исключить из рассмотрения не отвечающие по качеству 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 чего была достигнута однозначная привязка определенного геологического события (процесса) к его геохимическому наполнению. Аналитические возможности локального U-Pb SIMS исследования позволили получить адекватную геохронологическую и геохимическую информацию по магматической генерации цирконов из всех 317 изученных образцов гранитоидов.

Анализ проводился на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe в ЦИИ. Измерялись редкоземельные элементы (далее — PЗЭ), а также иттрий и гафний по методике количественного химического анализа, предложенного П. В. Хоскиным [30]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода O^{2-} составляла 3–4 нА, 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 также 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 составляли: 2 с для ^{91}Zr , 10 с для ^{89}Y , от 15 до 40 с для легких PЗЭ, 5–10 с для тяжелых PЗЭ и двух изотопов Hf. Длительность анализа не превышала 40 мин. 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 $^{178}\text{Hf}^{++}$ на пик ^{89}Y вводилась поправка $^{89}\text{Y}^* = (^{89}\text{Y} - ^{178}\text{Hf})/100$. 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 [31–32].

Содержания редкоземельных элементов, а также иттрия, гафния, титана, свинца, урана и тория в цирконе определялись на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe в тех же точках, где ранее был измерен возраст локальным U-Pb методом. Из 317 изученных образцов для расчета геохимических параметров циркона — PIZs использовались результаты замеров как минимум в 5 точках, реже в 10 точках и более. Всего за весь период исследований было произведено 1785 измерений содержаний выше перечисленных элементов-примесей в цирконах.

Точки для расчета PIZs выбирались из самых представительных (из измеренных ранее на возраст) 15 зерен циркона со схожей морфологией. При этом отбраковывались многофазные кристаллы циркона гибридного происхождения, а также кристаллы, содержащие древние ядра, метаморфические оболочки и т. п., то есть использовались только гомогенные популяции зерен циркона, кристаллизовавшиеся из гранитоидного расплава и не содержащие включения других аксессуарных минералов, таких как апатит, монацит, ксенотим, титанит, рутил и алланит, то есть тех минералов, которые могли составить циркону конкуренцию и существенным образом повлиять на уровни концентрации в нем редкоземельных и других элементов-примесей.

В каждом из изученных 317 образцов определялись концентрации 14 редкоземельных элементов, а также Y и Hf в цирконе. Оценка температуры кристаллизации циркона выполнялась с помощью «Ti-в цирконе» геотермометра [28]. По результатам определения концентрации редких и редкоземель-

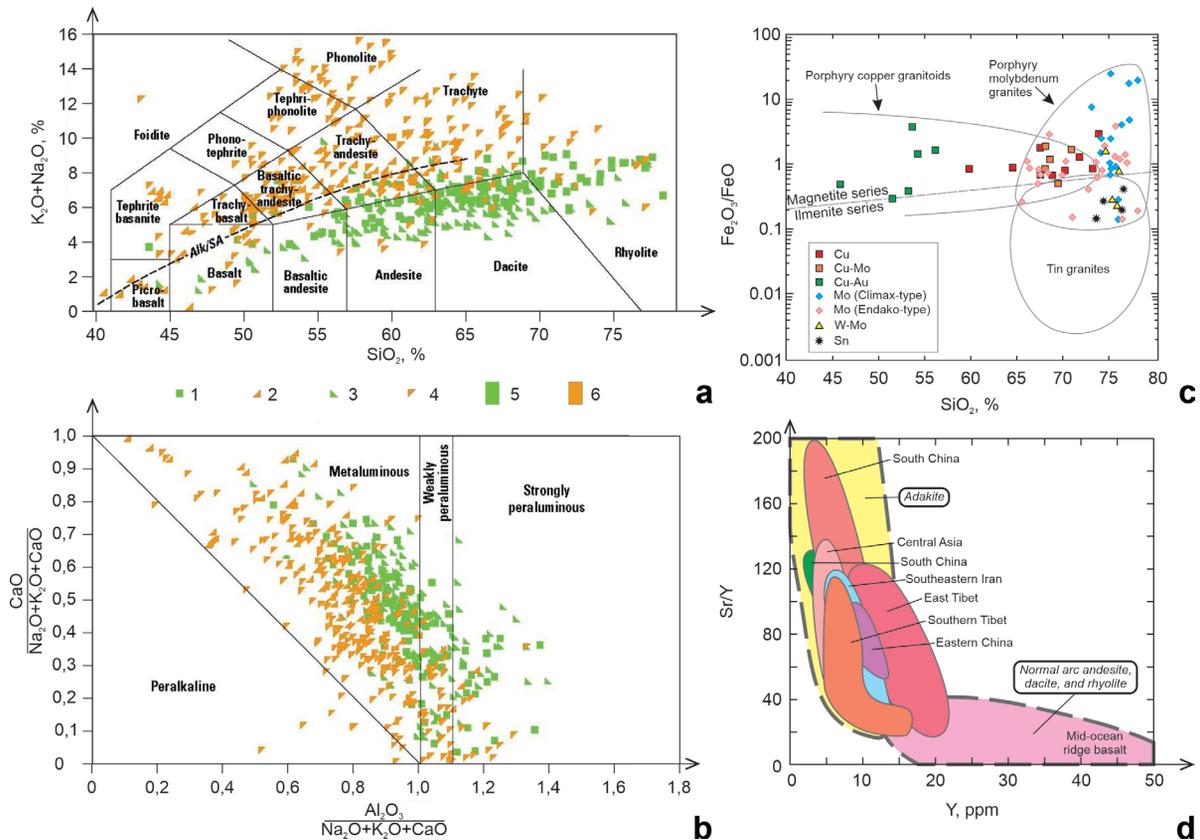


Рис. 4. Положение фигуративных точек усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород главных Cu-, Au-Cu-, Au-Cu-Mo-, Mo и Sn-порфировых месторождений мира на петрохимических и геохимических вариационных диаграммах, предложенных Д. А. Джоном и соавторами, В. Д. Синклером [4] в качестве петрогеохимических индикативных показателей принадлежности изучаемых образцов магматических пород к порфировому семейству

a — TAS ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$), состав порфировых интрузивов: 1 — кварцево-монцодиорит-гранитовый Cu-(Mo), 2 — монзонитовый Cu-(Mo-Au), 3 — тоналит-гранодиоритовый Cu-(Au-Mo), 4 — сиенитовый Cu-(Au), 5 — габбро-диоритовый, 6 — щелочно-сиенитовый; **b** — $\text{CaO}/[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}]-\text{Al}_2\text{O}_3/[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}]$; **c** — $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}-\text{SiO}_2$; **d** — Sr/Y

Источник: составлено автором В. В. Шатовым на основе [2; 4]

Fig. 4. Average compositions of ore-hosting intrusive rocks from major Cu-, Au-Cu-, Au-Cu-Mo-, Mo, and Sn-porphyry deposits of the world. The petrochemical and geochemical variation diagrams display figurative points that D. A. John et al. and V. D. Sinclair located as petrogeochemical indicators to identify the studied igneous rock samples as the ones from the porphyry family

a — TAS ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$), Porphyry intrusions composition: 1 — quartz monzodiorite, granite Cu-(Mo), 2 — monzonite Cu-(Mo-Au), 3 — tonalite-granodiorite Cu-(Au-Mo), 4 — syenite Cu-(Au), 5 — gabbro-diorite, 6 — alkali-syenite; **b** — $\text{CaO}/[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}]-\text{Al}_2\text{O}_3/[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}]$; **c** — $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}-\text{SiO}_2$; **d** — Sr/Y .

Source: adapted by the author V. V. Shatov from [2; 4]

ных элементов в цирконах рассчитывались значения всех семи индикативных геохимических параметров циркона — PIZs (см. табл. 2): 1) Ce/Nd; 2) Eu/Eu*; 3) (Ce/Nd)/Y; 4) Dy/Yb; 5) $(10000 \times \text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Y}$; 6) Th/U и 7) $T^\circ\text{C}$ (*Ti-in-zircon thermometer*).

Разработка изученных гранитоидных комплексов и массивов на потенциально рудоносные и «безрудные» проводилась по методике, приведенной в работах Ю. Лу с соавторами [22] и Х. Пизарро с соавторами [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 демонстрируется пространственное распределение изученных листов ГК-200/2 на территории Российской Федерации, в пределах которых определялись PIZs в образцах гранитоидов.

Изученные листы ГК-200/2 ранжированы по степени вероятности выявления в их пределах месторождений порфирового семейства на четыре группы: наивысшую, высокую, умеренную и низкую.

Наивысшая степень продуктивности присваивалась только тем из изученных образцов, у которых значения всех семи индикативных параметров PIZs совпадали с их референтными значениями (см. табл. 2). *Высокая* степень присваивалась в случае соответствия шести параметров из семи их референтным значениям, включая обязательно параметры 2 и 3 согласно данным табл. 2. *Умеренная* и *низкая* степень продуктивности в случае совпадения значений пяти, четырех и менее параметров их референтным значениям.

Анализ показывает (табл. 3), что большая часть (48%) из изученных комплексов гранитоидов пока-

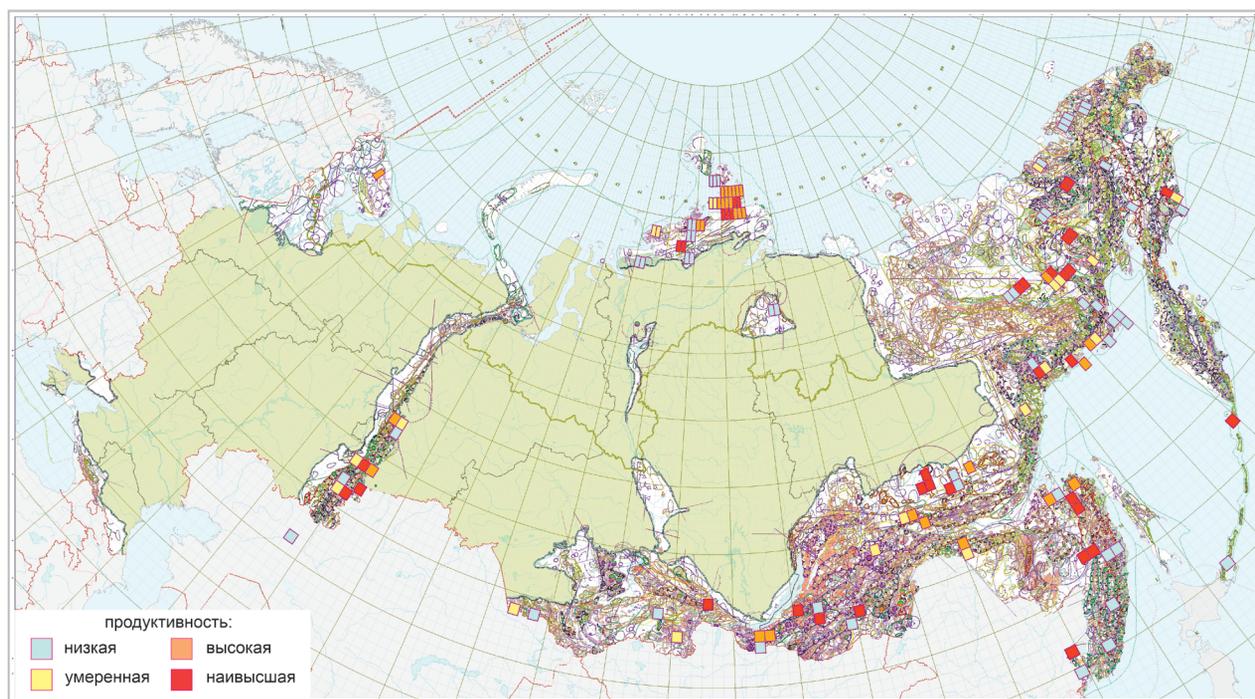


Рис. 5. Распределение магматических комплексов пород, изученных на предмет установления закономерностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Ti, Hf, U, Th, Pb) в акцессорных цирконах с целью определения индикативных геохимических параметров циркона — PIZs (пояснения в тексте и в табл. 7)

Fig. 5. Igneous rock complexes distribution, with distribution patterns of trace elements (REE+Y, Ti, Hf, U, Th, Pb) in accessory zircons considered, in order to determine indicative geochemical parameters of zircon — PIZs (refer to the text and table 7)

зала отрицательный результат. Одна треть (35 %) приходится на высокую и умеренную продуктивность. Тогда как наивысшей степени продуктивности соответствуют только 17 % из общего числа изученных объектов.

Однако, если из этого количества исключить девять гранитоидных комплексов, изученных при тестировании методики в пределах конкретных порфировых месторождений России, таких как Малмыж, Песчанка, Михеевское, Томинское, Медьгорское,

Рябиновое, Морозкинское, Самолазовское и Тарутинское (табл. 4), то наивысшая степень продуктивности останется только у 33 объектов из 255 изученных, что соответствует 13 %. То есть можно сделать вывод, что только каждый **восьмой из изученных объектов** показал максимальную степень продуктивности на порфировое оруденение.

Распределение изученных объектов и их продуктивности по сериям листов ГК-1000/3 приводится в табл. 5 и на рис. 6. Как показывает анализ этих

Таблица 3

Сводные результаты продуктивности по данным изотопно-геохимических исследований акцессорных цирконов из потенциально рудоносных на порфировое оруденение 255 изученных интрузивных комплексов гранитоидов (массивов или их отдельных частей — фаз внедрения)

Table 3. Productivity summary results from the isotope and geochemical data on accessory zircons from 255 studied intrusive granitoid complexes (massifs or intrusion phases as their individual parts) as potential porphyry mineralization ones

Продуктивность	Количество объектов	%
Наивысшая	42	17
Высокая	31	12
Умеренная	59	23
Низкая	123	48
Итого	255	100

Таблица 4

Значения индикативных геохимических параметров циркона (PIZs) для рудоносных магматических пород некоторых промышленных порфировых и скарново-порфировых месторождений России
 Table 4. Indicative geochemical parameters values of zircon (PIZs) for ore-bearing igneous rocks from some Russian porphyry and skarn-porphyry commercial deposits

№ п/п	Месторождение	Порода	Возраст, млн лет	Индикативные геохимические параметры циркона — PIZs (Porphyry Indicator Zircons) (after Lu et al. [19], 2016 and Pizarro et al. [23])						To C (Ti-in-zircon thermometer)
				Ce/Nd	Eu/Eu*	(Ce/Nd)/Y	Dy/Yb	(10000x Eu/Eu*)/Y	Th/U	
				> 1	≥ 0,4	≥ 0,01	< 0,3	> 1	0,1 ÷ 1,0	637 ÷ 738
1	Малмыж	Кварцевый диорит-порфир	98,3 ± 1,2	10,0	0,60	0,018	0,16	10,0	0,61	680
2	Песчанка	Гранодиорит-порфир	140,0 ± 1,0	15,2	0,78	0,016	0,23	9,9	0,63	718
3	Михеевское	Кварцевый диорит	356,0 ± 6,0	10,0	0,41	0,011	0,12	5,1	0,33	702
4	Томинское	Кварцевый диорит-порфир	432,6 ± 3,2	29,4	0,47	0,035	0,13	11,1	0,21	673
5	Медьгорское	Кварцевый монцодиорит	143,4 ± 2,0	14,8	0,53	0,027	0,18	8,6	0,69	724
6	Рябиновое	Сиенит	142,5 ± 3,0	14,2	0,54	0,012	0,13	6,0	0,61	780
7	Морозкинское	Сиенит-порфир	117,9 ± 1,4	22,5	1,07	0,013	0,13	2,6	0,57	696
8	Самозавское	Сиенит	130,0 ± 1,1	35,1	0,81	0,048	0,12	10,0	0,72	695
9	Тарутинское	Плаггиогранодиорит	362,0 ± 4,0	16,8	0,50	0,035	0,22	10,1	0,43	675

материалов, основной объем изученных объектов и положительных результатов по ним приходится на серии листов ГК-1000/3, принадлежащих восточным регионам России: Верхне-Колымской, Дальневосточной, Охотоморской и Алдано-Забайкальской СЛ, где и сосредоточены основные перспективные объекты на золото-медно-порфировое оруденение.

В табл. 6 и на рис. 7 приводится характеристика распределения изученных образцов гранитоидов по возрасту (по данным изучения акцессорных цирконов локальным U-Pb SIMS методом и на PIZs). Анализ этих материалов показывает, что потенциально продуктивными на золото-медно-порфировое оруденение на территории России оказались главным образом гранитоиды мезозойского (мелового) возраста и в меньшей степени палеозойского возраста, тогда как в масштабе всей планеты основная масса порфировых месторождений связана с проявлением гранитоидного магматизма кайнозойского возраста.

Такое различие в продуктивности мезозойской и кайнозойской эпох на порфировое оруденение в России по сравнению с зарубежными странами может быть объяснено либо иной металлогенической специализацией северо-западной активной окраины Тихого океана, либо недостаточной геологической изученностью на порфировое оруденение структурно-формационных комплексов кайнозойского возраста в пределах территорий Дальневосточной, Охотоморской, Чукотской и Корякско-Курильской серий листов ГК-1000/3.

В табл. 7 приводится перечень объектов гранитоидных комплексов или отдельных массивов, пока-

завших *наивысшую* перспективность на порфировое оруденение по данным изучения PIZs, и из которого исключены магматические породы из изученных порфировых месторождений (Малмыж, Песчанка, Михеевское, Томинское, Рябиновое, Тарутинское, Самолазовское, Морозкинское и Медьгорское).

Категорийность перспективных объектов, показавших *наивысшую* и *высокую* перспективность на порфировое оруденение по данным изучения PIZs, демонстрируется материалами табл. 8.

По степени изученности здесь выделяются пять категорий перспективных объектов: 1) нелицензированные и поставленные на учет; 2) лицензированные и поставленные на учет; 3) лицензированные и не поставленные на учет; 4) нелицензированные и для которых наивысшая оценка их продуктивности на порфировое оруденение по данным PIZs оказалась недостаточной для постановки паспортов перспективных объектов (далее — ПО) на учет и 5) нелицензированные и для которых паспорта учета ПО находятся в стадии подготовки.

Из 36 перспективных объектов 21 оказался в Распределенном фонде недр, а 15 — в Нераспределенном фонде.

По этим 15 нелицензированным объектам, показавшим наивысший результат по продуктивности на порфировое оруденение по данным PIZs, были подготовлены или находятся в стадии подготовки Паспорта учета ПО.

Часть из них (6 объектов) прошла апробацию и поставлена на учет. Это Паспорта учета по Медьгорскому рудному узлу (далее — РУ), Каменному потенциальному рудному узлу (далее — ПРУ), Хавинскому

Таблица 5

Распределение количества изученных образцов и объектов по сериям листов ГК-1000/3

Table 5. Studied samples and objects number distribution by sheet series of the State Geological Map of the Russian Federation, scale 1 : 1,000,000 (third generation)

№ п/п	Серия листов ГК-1000/3	Количество образцов	Количество объектов
1	Северо-Карско-Баренцевоморская	4	4
2	Уральская	16	13
3	Алтае-Саянская	6	6
4	Ангаро-Енисейская	10	6
5	Анабаро-Вилюйская	1	1
6	Таймырско-Североземельская	34	31
7	Алдано-Забайкальская	42	33
8	Верхояно-Колымская	75	57
9	Чукотская	23	16
10	Охотоморская	27	23
11	Дальневосточная	66	54
12	Корякско-Курильская	13	11
	Итого	317	255

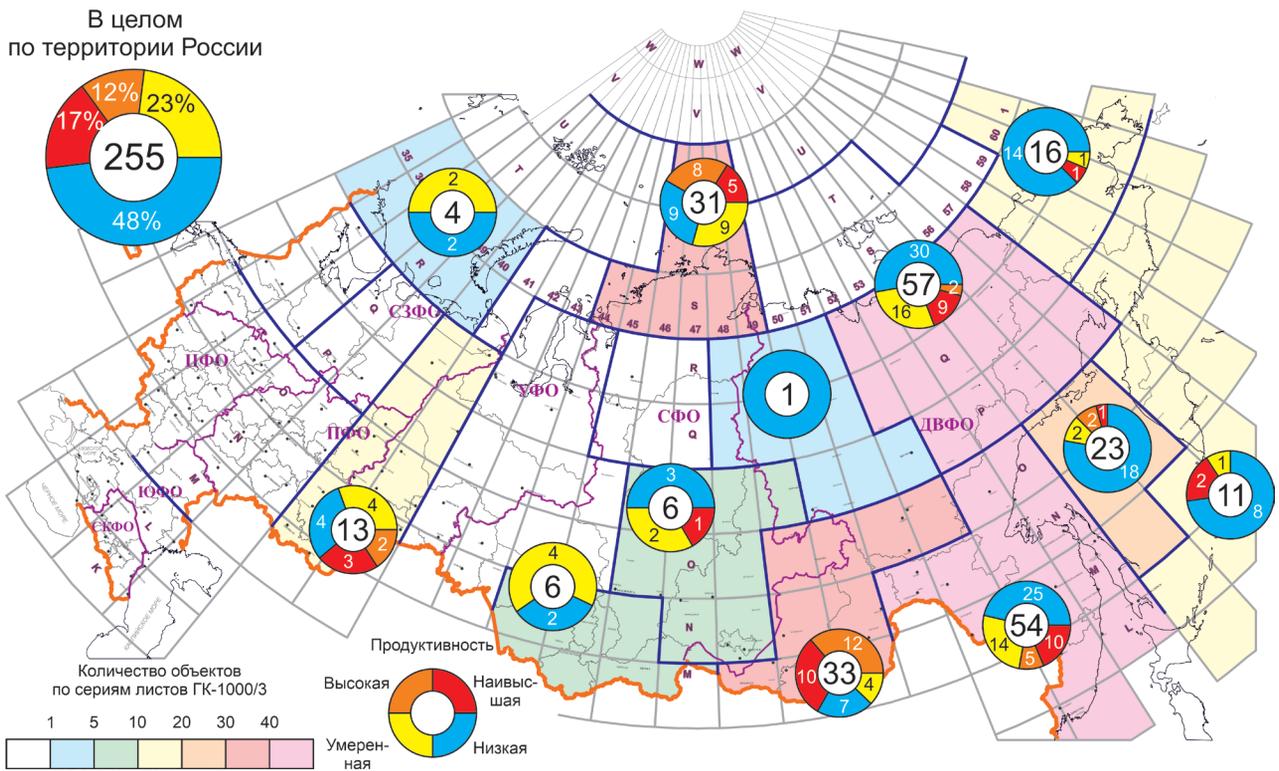


Рис. 6. Распределение продуктивности на порфировое оруденение изученных объектов по сериям листов ГК-1000/3

Fig. 6. Porphyry mineralization fertility distribution, the studied objects from sheet series of the State Geological Map of the Russian Federation, scale 1 : 1,000,000 (third generation)

Таблица 6

**Распределение 317 изученных образцов гранитоидов по возрасту
(по данным изучения акцессорных цирконов U-Pb SIMS методом в ЦИИ ФГБУ «Институт Карпинского»)**

Table 6. Age distribution of 317 studied granitoid samples (from the data on accessory zircons with the U-Pb SIMS method in the Centre of Isotopic Research)

Эра	Период/отдел		Количество образцов	
Кайнозойская	Четвертичный		4	9
	Неогеновый		2	
	Палеогеновый		3	
Мезозойская	Меловой	Верхний отдел	111	246
		Нижний отдел	74	
	Юрский		39	
	Триасовый		22	
Палеозойская	Пермский		16	56
	Каменноугольный		11	
	Девонский		14	
	Силурийский		3	
	Ордовикский		6	
	Кембрийский		6	
Неопротерозойская			1	6
Мезопротерозойская			1	
Палеопротерозойская			—	
Неоархейская			4	
Итого			317	

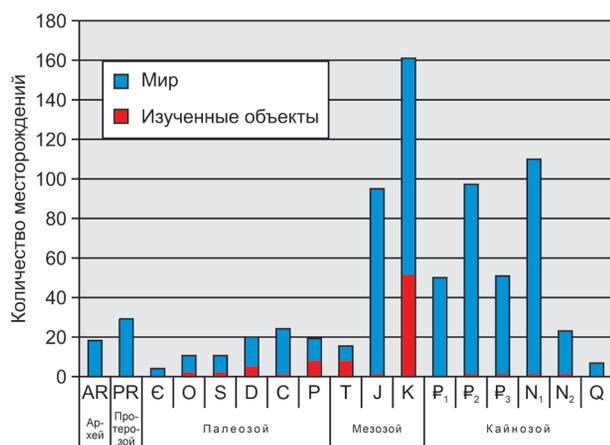


Рис. 7. Распределение по возрасту 74 изученных объектов с наивысшей и высокой продуктивностью на диаграмме: возраст магматической породы vs. количество порфировых месторождений, предложенной В. Д. Синклером на основе обработки материалов по более чем 750 порфировым месторождениям мира

Источник: составлено автором В. В. Шатовым на основе [4]

Fig. 7. Age distribution of 74 studied objects with the highest and high productivity. The diagram displays V. D. Sinclair's data on more than 750 porphyry deposits of the world: igneous rock age vs number of porphyry deposits

Source: adapted by the author V. V. Shatov from [4]

Таблица 7

Перечень объектов магматических комплексов или массивов, показавших наивысшую перспективность на порфировое оруденение по данным изучения PIZs (без учета изученных порфировых месторождений)

Table 7. List of igneous complexes or massifs with the highest prospects for porphyry mineralization (from the PIZs data, excluding the studied porphyry deposits)

№ п/п	Интрузивный комплекс, массив, фаза внедрения	Серия листов ГК-1000/3	Возраст, млн лет	Номенклатура
1	Жипхошинский комплекс	Алдано-Забайкальская	403,3 ± 2,7	M-50-I
2	Алданский комплекс, Эвотинский массив		113,7 ± 1,0	O-51-XXIII-XXIV
3	Алданский комплекс, Чайдахский массив		120,0 ± 1,0	O-52-XXVI
4	Алданский комплекс, Билибинский массив		116,8 ± 1,1	O-52-XXVI
5	Витимканский комплекс		295,0 ± 2,0	N-49-XXXI
6	Участок Яук-2, южная часть массива		86,8 ± 0,8	M-49-III
7	Участок Удунин-3		94,9 ± 0,5	M-48-IX
8	Участок Удунин-4		94,7 ± 0,5	M-48-IX
9	Урикский комплекс, массив Ара-Сайлаг	Ангаро-Енисейская	478,0 ± 3,0	N-47-XXVIII
10	Белоночинская площадь, Начальный участок	Верхояно-Колымская	416,3 ± 4,4	Q-56-XXXIII
11	Белоночинская площадь, массив Сурунтах		86,3 ± 1,3	Q-56-XXXIV
12	Намындыканский комплекс, участок Айненэ		137,2 ± 1,1	Q-57-XXVII
13	Рассошинский массив		166,8 ± 2,1	Q-55-XXIX-XXX
14	Наяханский комплекс, массив Нарзан, 1-я фаза		85,3 ± 0,8	P-56-V-VI
15	Наяханский комплекс, массив Кобзарь, 2-я фаза		84,8 ± 1,1	
16	Ульбейский комплекс, Шахский массив		107,6 ± 1,3	P-54-XXXVI
17	Нижнеамурский комплекс, массив Гион		76,7 ± 0,7	M-53-94
18	Рязановский комплекс, Гродековский батолит		260,1 ± 4,9	L-52-XXX
19	Первомайский РУ, рязановский комплекс		260,0 ± 7,5	
20	Ульбанский комплекс, Хавинский массив	80,8 ± 0,5		
21	Нижнеамурский комплекс, Покровский массив, 2-я фаза	86,8 ± 0,7		
22	Нижнеамурский комплекс, Яанский массив, 2-я фаза	79,5 ± 0,7		
		Дальневосточная		

№ п/п	Интрузивный комплекс, массив, фаза внедрения	Серия листов ГК-1000/3	Возраст, млн лет	Номенклатура
23	Нижнеамурский комплекс, массив Огнедо, 3-я фаза	Дальневосточная	76,4 ± 0,6	N-54-XXXI
24	Нижнеамурский комплекс, Балахойский массив, 2-я фаза		76,3 ± 1,2	N-54-XXXI
25	Пылгинский комплекс	Корякско-Курильская	29,27 ± 0,48	P-59-XXII
26	Парамуширский комплекс, Прозраченский массив		5,24 ± 0,14	M-56-XVIII
27	Магаданский комплекс, Малойринский массив	Охотоморская	100,0 ± 1,0	O-55-IV
28	Широкинский массив		226,0 ± 2,0	T-48-XXXI–XXXIII
29	Оленьинский комплекс		248,8 ± 3,3	S-47-I-II
30	Пекинский комплекс, массив Порфиновый	Таймырско-Североземельская	240,0 ± 1,0	
31	Пекинский комплекс, р. Пека		242,2 ± 2,0	T-48-XXVII-XXIX
32	Верхнетарейский комплекс		233,0 ± 1,0	S-46-XV-XVI

Таблица 8

Категории объектов, показавших наивысшую и высокую перспективность на порфировое оруденение по данным изучения PIZsTable 8. Object categories with the *highest* and *high* prospects for porphyry mineralization (from the PIZs data)

№ п/п	Категория перспективных объектов (ПО)	Количество	Название ПО	Предлагаемые виды ГРП
1	Нелицензированные и поставленные на учет	6	Медьгорский РУ, Каменный ПРУ, Хавинский ПРУ, Первомайский РУ, Гионская ПП, Мотыклейский РУ	ГМК-50 и работы поисковой стадии на локализованных участках
2	Лицензированные и поставленные на учет	11	Билибинская, Чайдахская и Сеймджакская ПП, Широкинский ПРУ, Урадан-Рассошинский ПРУ, Верхнетарейский ПРУ, Кристифенсенский ПРУ, Покровско-Троицкий РРУ, Янская и Балахойская ПП, ПРП Огнедо	Работы поисковой стадии на локализованных участках по договорам с компаниями-недропользователями
3	Лицензированные и не поставленные на учет	10	Эвотинский ПРУ, Витимканский ПРУ, Участок Яук-2, Участок Удунин-3 и -4, Оленьинский ПРУ, Пекинский ПРУ, Порфиновый ПРУ, Убойнинский ПРУ, Прозраченская ПП	
4	Нелицензированные и для которых наивысшая оценка их продуктивности на порфировое оруденение по данным PIZs оказалась недостаточной для постановки паспортов ПО на учет	8	Васильевский ПРУ, Айненэнский ПРУ, Шахский ПРУ, ПРП Нарзан и Кобзарь, Пылгинская ПП, Ара-Сайлагская ПП, Сурунтахская ПП	Ревизионно-заверочные работы
5	Нелицензированные и для которых Паспорта учета ПО находятся в стадии подготовки	1	Лучистый ПРУ, Начальное-2 ПРП	ГМК-50 и работы поисковой стадии на локализованных участках

ПРУ, Первомайскому РУ, Гионской перспективной площади (далее — ПП) и Мотыклейскому РУ. В пределах этих перспективных объектов необходима постановка ГМК масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000 и крупнее), включающего комплекс современных геофизических, литогеохимических и дистанционных методов, а также петрографо-геохимическое изучение и картирование гидротермально-измененных пород, нацеленных на выделение в пределах определенных площадей более локальных участков под проведение геологоразведочных работ поисковой стадии.

По Васильевскому РУ и Айненэнскому ПРУ подготовленные Паспорта учета ПО были отклонены из-за недостаточной изученности этих ПО. Оказалось, что *наивысшую оценку их продуктивности на порфировое оруденение по данным PIZs* можно рассматривать только в качестве необходимого, но недостаточного признака прогнозирования порфирового оруденения. Здесь наряду с данными по PIZs также желательно использовать и другие поисковые признаки, такие как геохимические, геофизические, дистанционные, минералого-петрографические, гидротермально-метасоматические, структурно-тектонические и т. д.

Для окончательного решения вопроса о перспективности этих недоизученных в геологическом отношении ПО на порфировое оруденение необходима постановка в их пределах *внемасштабных ревизионно-заверочных работ*, предусматривающих сбор дополнительного каменного материала на участках гидротермально-измененных и минерализованных пород с целью проведения дополнительных лабораторных исследований. Близкая ситуация сложилась также для Шахского потенциально рудного поля и потенциальных рудных полей Нарзан и Кобзарь.

Полученные результаты исследований позволили из более чем 200 выявленных перспективных участков недр обосновать по изотопно-геохимическим признакам 15 высокоперспективных площадей на золото-медно-порфировое оруденение, что, как ожидается, привлечет внимание потенциальных инвесторов и будет способствовать развитию заявительного принципа лицензирования в нашей стране.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе изучения закономерностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Ti, Hf, U, Th, Pb) в цирконах гранитоидов установлено, что рудовмещающие магматические породы таких известных порфировых месторождений России, как Малмыж, Песчанка, Михеевское, Томинское, Медьгорское, Рябиновое, Морозкинское, Самолазовское и Тарутинское показали, 100-процентное совпадение с референтными значениями PIZs: 1) Ce/Nd; 2) Eu/Eu*; 3) (Ce/Nd)/Y; 4) Dy/Yb; 5) (10000xEu/Eu*)/Y; 6) Th/U и 7) T° C (*Ti-in-zircon thermometer*), предложенными Х. Пизарро с соавторами [29] по материалам

обработки большого фактического материала по ведущим порфировым месторождениям мира.

2. За весь период исследований на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe было изучено 317 образцов, принадлежащих 255 объектам исследования. Это либо интрузивные комплексы, либо отдельные гранитоидные массивы (или их отдельные фазы внедрения), перспективные на порфировое оруденение. Основной объем изученных объектов и положительных результатов по ним пришелся на серии листов ГК-1000/3, принадлежащих восточным регионам России: Верхне-Колымской, Дальневосточной, Охотоморской и Алдано-Забайкальской сериям листов, где и сосредоточены основные перспективные объекты на золото-медно-порфировое оруденение.

3. Почти половина (48 %) из изученных комплексов гранитоидов показала отрицательный результат по данным PIZs. Около одной трети (35 %) приходится на высокую и умеренную продуктивность. Тогда как наивысшей степени продуктивности соответствуют только 17 % из общего числа изученных объектов. Однако, если из этого количества исключить девять гранитоидных комплексов, изученных при тестировании методики в пределах конкретных порфировых месторождений России, перечисленных выше, то наивысшая степень продуктивности останется только у 33 объектов из 255 изученных, что соответствует 13 %. То есть можно сделать вывод, что только каждый **восьмой** из изученных объектов на территории России показал максимальную степень продуктивности на порфировое оруденение.

По мнению авторов статьи, особенности состава элементов-примесей в аксессуарных цирконах гранитоидов не могут напрямую указывать на наличие или отсутствие порфирового оруденения. При проведении разномасштабных прогнозно-минералогических исследований по данным PIZs можно осуществлять только разбраковку разновозрастных гранитоидных комплексов на потенциально рудносные и «безрудные», что должно способствовать локализации перспективных участков недр.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Медно-порфировые месторождения. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов / А. И. Кривцов [и др.]. М. : Изд-во ЦНИГРИ, 2001. 232 с.
2. Porphyry copper deposit model / D. A. John [et al.] // Scientific Investigations Report 2010-5070-B, U. S. Geological Survey: Reston, Virginia, 2010. 169 p.
3. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // Economic Geology. 2010. Vol. 105, no. 1. P. 3–41. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
4. Sinclair W. D. Porphyry deposits // Mineral deposits of Canada: Geological Association of Canada Special Publication 5. 2007. P. 223–243.
5. Медно-порфировое месторождение Песчанка / И. Ф. Мигачев [и др.] // Руды и металлы. 1995. № 3. С. 48–58.
6. Porphyry-epithermal Cu-Mo-Au-Ag mineralization in the Nakhodka ore field, Baimka Trend, Chukotka, Russia: a geological, mineralogical, and geochemical perspective /

A. F. Chitalin [et al.] // *Mineralium Deposita*. 2023. Vol. 58. P. 287–306. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01122-2>.

7. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics / S. G. Soloviev [et al.] // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 113. P. 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103112>.

8. Yakubchuk A. S. Porphyry deposits of Northern Eurasia: Practical aspects of tectonic control, structural features and estimates of depth of erosion from the Urals to the Pacific // *Geology of Ore Deposits*. 2024. Vol. 66, no. 1. P. 3–20. <https://doi.org/10.1134/S1075701524010094>.

9. Карта закономерностей размещения золото-медно-порфировых месторождений России масштаба 1 : 2 500 000 (на основе обобщения результатов работ по составлению комплектов государственных геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения) / О. В. Петров [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 20206. № 84. С. 5–24.

10. Выявление новых объектов, перспективных на молибден-медно-порфировое оруденение при создании Госгеокарты-1000/3 на примере листов О-55, О-56 (Северное Приохотье, Магаданская область) / А. А. Аленичева [и др.] // *Руды и металлы*. 2024. № 2. С. 5–27. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2024-10006>.

11. Использование состава циркона и апатита при прогнозировании Cu-Mo-Au-порфирового оруденения в Пекинском и Тессемском массивах Таймыро-Североземельской складчатой области / С. В. Берзин [и др.] // *Литосфера*. 2024. Т. 24, № 3. С. 547–565. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565>.

12. Геохимия цирконов анатектической и диатектической стадий формирования мигматитов Северо-Западного Приладожья / В. А. Глебовицкий [и др.] // *Докл. РАН*. 2008. Т. 420, № 6. С. 813–817.

13. Светлицкая Т. В., Неволько П. А. Оценка перспектив Култуминского месторождения на порфировое оруденение на основе анализа геохимических характеристик цирконов (Восточное Забайкалье, Россия) // *Разведка и охрана недр*. 2023. № 3. С. 11–19.

14. Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии / С. Г. Скублов [и др.] // *Геохимия*. 2009. № 9. С. 958–971.

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

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. P. 347–364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>.

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

18. Carrasco-Godoy C., Campbell I. H., Cajal Y. Quantifying the criteria used to identify zircons from ore-bearing and barren systems in porphyry copper exploration // *Econ. Geology*. 2024. Vol. 119. P. 1035–1058. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5086>.

19. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations / B. Fu [et al.] // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. Vol. 156. P. 197–215. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0281-5>.

20. 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. P. 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.010>.

21. Loucks R. R., Fiorentini M. L., Henri'quez G. J. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon //

Journal of Petrology. 2020. Vol. 61, no. 3. P. 1–30. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa034>.

22. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits / Y-J. Lu [et al.] // *Society Econ. Geology Special Publication*. 2016. No. 19. P. 329–347. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22790.1696>.

23. Uranium-Pb zircon ages, whole-rock and zircon mineral geochemistry as indicators for magmatic fertility and porphyry Cu-Mo-Au mineralization at the Bystrinsky and Shaktama deposits, Eastern Transbaikalia, Russia / P. A. Nevolko [et al.] // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 139, no. B. P. 104532. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104532>.

24. Porphyry indicator zircons and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East) / O. V. Petrov [et al.] // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 139. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104491>.

25. Revealing prospects of new gold-copper-porphyry deposits of the Malmyzh type in the Lower-Amur Region (Russian Far East) / O. V. Petrov [et al.] // *Geology of Ore Deposits*. 2023. Vol. 65, no. 1. P. S85–S123. <https://doi.org/10.1134/S107570152307019X>.

26. Richards J. P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. P. 537–576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>.

27. Svetlitskaya T. V., Nevolko P. A. New whole-rock skarn and porphyry fertility indicators: Insights from Cu-Au-Fe skarn and Cu-Mo-Au porphyry deposits in Eastern Transbaikalia, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 149. P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105108>.

28. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006. Vol. 151. P. 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>.

29. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits / H. Pizarro [et al.] // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 126. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103771>.

30. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO₄) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques // *Journal of Trace and Microprobe Techniques*. 1998. Vol. 16, no. 3. P. 301–326. <https://doi.org/10.1007/BF02719033>.

31. Further characterization of the 91500 zircon crystal / M. Wiedenbeck [et al.] // *Geostandards Newsletter*. 2004. Vol. 28. P. 9–39. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x>.

32. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* / [Eds.] M. A. McKibben, W. C. Shanks III and W. I. Ridley). *Rev. Econ. Geol.* 1998. Vol. 7. P. 1–35.

REFERENCES

1. Copper-porphyry deposits. Series: Models of precious and base metal deposits / A. I. Krivtsov [et al.]. Moscow: TSNIIGRI; 2001. 232 p. (In Russ.).

2. Porphyry copper deposit model / D. A. John [et al.]. *Scientific Investigations Report 2010-5070-B*, U. S. Geological Survey: Reston, Virginia; 2010. 169 p. (In Russ.).

3. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 2010; 105 (1): 3–41. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

4. Sinclair W. D. Porphyry deposits. *Mineral deposits of Canada: Geological Association of Canada Special Publication 5*. 2007. P. 223–243. (In Russ.).

5. Migachev I. F., Girfanov M. M., Shishakov V. B. Copper-porphyry deposit of Peschanka. *Ores and metals*. 1995; (3): 48–58 (In Russ.).

6. Porphyry-epithermal Cu-Mo-Au-Ag mineralization in the Nakhodka ore field, Baimka Trend, Chukotka, Russia: a geological, mineralogical, and geochemical perspective / A. F. Chitalin [et al.]. *Mineralium Deposita*. 2023; 58: 287–306. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01122-2>.
7. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics / S. G. Soloviev [et al.]. *Ore Geology Reviews*. 2019; 113: 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103112>.
8. Yakubchuk A. S. Porphyry deposits of Northern Eurasia: Practical aspects of tectonic control, structural features and estimates of depth of erosion from the Urals to the Pacific. *Geology of Ore Deposits*. 2024; 66 (1): 3–20. <https://doi.org/10.1134/S1075701524010094>.
9. Map of distribution patterns of copper-gold-porphyry deposits of the Russian territory at 1 : 2 500 000 scale (based on synthetics results of state geological mapping at 1M scale of 3rd generation) / O. V. Petrov [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2020; (84): 5–24. (In Russ.)
10. Identification of new objects promising for porphyry molybdenum-copper mineralization when creating the State geological map 1000/3: Sheets O-55, O-56 (Northern Priokhotye, Magadan region) as an example / A. A. Alenicheva [et al.]. *Ores and metals*. 2024; (2): 5–27. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2024-10006>. (In Russ.)
11. Utilizing compositions of zircon and apatite for prospecting of Cu-Mo-Au porphyry mineralization in the Pekinsky and Tessemsky granitoid massifs of the Taimyr-Severozemelskaya folded area / S. V. Berzin [et al.]. *Lithosphere*. 2024; 24 (3): 547–565. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565>. (In Russ.)
12. Zircon geochemistry of anatexic and diatexis stages migmatite formation (NW Ladoga Region) / Glebovitsky V. A. [et al.]. *Dokl. RAN*. 2008; 420 (6): 813–817. (In Russ.)
13. Svetlitskaya T. V., Nevolko P. A. Porphyry potential of the Kultuma deposit based on zircon trace element compositions (Eastern Transbaikalia, Russia). *Razvedka i okhrana nedr*. 2023; (3): 11–19. (In Russ.)
14. Rare earth and trace elements distribution in zircons from miaskite lamproites of the Panozero Complex, Central Karelia / S. G. Skublov [et al.]. *Geokhimiya*. 2009; (9): 958–971. (In Russ.)
15. Fedotova A. A., Bibikova E. V., Simakin S. G. Zircon microprobe geochemistry as an indicator of mineral genesis in geochronological investigations. *Geokhimiya*. 2008; (9): 980–997. (In Russ.)
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; 144 (3): 347–364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>.
17. Burnham A. D., Berry A. J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012; 95: 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.07.034>.
18. Carrasco-Godoy C., Campbell I. H., Cajal Y. Quantifying the criteria used to identify zircons from ore-bearing and barren systems in porphyry copper exploration. *Econ. Geology*. 2024; 119: 1035–1058. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5086.19>.
19. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations / B. Fu [et al.]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008; 156: 197–215. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0281-5>.
20. 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; 472: 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.010>.
21. Loucks R. R., Fiorentini M. L., Henriques G. J. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. *Journal of Petrology*. 2020; 61 (3): 1–30. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa034>.
22. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits / Y.-J. Lu [et al.]. *Society Econ. Geology Special Publication*. 2016; (19): 329–347. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22790.1696>.
23. Uranium-Pb zircon ages, whole-rock and zircon mineral geochemistry as indicators for magmatic fertility and porphyry Cu-Mo-Au mineralization at the Bystrinsky and Shakhnama deposits, Eastern Transbaikalia, Russia / P. A. Nevolko [et al.]. *Ore Geology Reviews*. 2021; 139 (B): 104532, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104532>.
24. Porphyry indicator zircons and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East) / O. V. Petrov [et al.]. *Ore Geology Reviews*. 2021; 139: 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104491>.
25. Revealing prospects of new gold-copper-porphyry deposits of the Malmyzh type in the Lower-Amur Region (Russian Far East) / O. V. Petrov [et al.]. *Geology of Ore Deposits*. 2023; 65 (1): S85–S123. <https://doi.org/10.1134/S107570152307019X>.
26. Richards J. P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*. 2007; 102: 537–576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>.
27. Svetlitskaya T. V., Nevolko P. A. New whole-rock skarn and porphyry fertility indicators: Insights from Cu-Au-Fe skarn and Cu-Mo-Au porphyry deposits in Eastern Transbaikalia, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2022; 149: 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105108>.
28. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006; 151: 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>.
29. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits / H. Pizarro [et al.]. *Ore Geology Reviews*. 2020; 126: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103771>.
30. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO₄) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*. 1998; 16 (3): 301–326. <https://doi.org/10.1007/BF02719033>.
31. Further characterization of the 91500 zircon crystal / M. Wiedenbeck [et al.]. *Geostandards Newsletter*. 2004; 28: 9–39. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x>.
32. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes / [Eds.] M. A. McKibben, W. C. Shanks III and W. I. Ridley. *Rev. Econ. Geol.* 1998; 7: 1–35.

Виталий Витальевич Шатов

Кандидат геолого-минералогических наук,
директор Центра прогнозно-металлогенических
исследований

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-6096-8871>
Scopus Author ID 6602617938
РИНЦ Author ID 98687
SPIN-код РИНЦ 8786-7881
vitaly_shatov@karpinskyinstitute.ru

Максим Александрович Ткаченко

Кандидат геолого-минералогических наук,
первый заместитель генерального директора

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-1524-617X>
ResearcherID P-9333-2017
SPIN-код РИНЦ 8128-5490
maksim_tkachenko@karpinskyinstitute.ru

Татьяна Николаевна Зубова

Заместитель генерального директора
по геологоразведочным работам

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0004-2188-4017>
SPIN-код РИНЦ 7260-4280
tatiana_zubova@karpinskyinstitute.ru

Сергей Семенович Шевченко

Заместитель генерального директора —
руководитель лабораторно-аналитической службой

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0000-3039-4133>
sergey_shevchenko@karpinskyinstitute.ru

Василий Иванович Леонтьев

Заместитель директора
Центра прогнозно-металлогенических исследований

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-7183-4772>
Scopus Author ID 57195316170
ResearcherID P-3351-2017
SPIN-код РИНЦ 4563-2326
vasily_leontiev@karpinskyinstitute.ru

Vitaly V. Shatov

PhD (Geology and Mineralogy),
Head, Centre of Predictive Metallogenic Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-6096-8871>
Scopus Author ID 6602617938
RSCI Author ID ID 98687
RSCI SPIN-code 8786-7881
vitaly_shatov@karpinskyinstitute.ru

Maksim A. Tkachenko

PhD (Geology and Mineralogy),
First Deputy Director General

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-1524-617X>
ResearcherID P-9333-2017
RSCI SPIN-code 8128-5490
maksim_tkachenko@karpinskyinstitute.ru

Tatiana N. Zubova

Deputy Director General
in geological exploration

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0004-2188-4017>
RSCI SPIN-code 7260-4280
tatiana_zubova@karpinskyinstitute.ru

Sergey S. Shevchenko

Deputy Director General —
Head of Laboratory and Analytical Service

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0000-3039-4133>
sergey_shevchenko@karpinskyinstitute.ru

Vasilii I. Leontev

Deputy Head,
Centre of Predictive Metallogenic Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-7183-4772>
Scopus Author ID 57195316170
ResearcherID P-3351-2017
RSCI SPIN-code 4563-2326
vasily_leontiev@karpinskyinstitute.ru

Борис Владимирович Беляцкий

Ведущий инженер Центра изотопных исследований

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-4022-9366>
Scopus Author ID 8977408200
ResearcherID V-6644-2019
SPIN-код РИНЦ 6163-0820
bbelyatsky@mail.ru

Николай Викторович Родионов

Кандидат физико-математических наук,
заведующий масс-спектрометрическим
сектором Центра изотопных исследований

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-5201-1922>
Scopus Author ID 12789575500
ResearcherID T-8826-2017
SPIN-код РИНЦ 6500-4125
nickolay_rodionov@karpinskyinstitute.ru

Сергей Андреевич Сергеев

Кандидат геолого-минералогических наук,
директор Центра изотопных исследований

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-8460-8715>
Scopus Author ID 35467278500
ResearcherID N-4385-2013
SPIN-код РИНЦ 6353-0561
sergey_sergeev@karpinskyinstitute.ru

Алексей Всеволодович Тарасов

Заместитель начальника Управления геологических основ,
науки и информатики

Федеральное агентство по недропользованию,
Москва, Россия

<https://orcid.org/0009-0002-1826-0655>
atarasov@rosnedra.gov.ru

Сергей Иванович Трушин

Заместитель генерального директора

АО «Полиметалл», Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0002-7422-9396>
strushin@polymetal.ru

Boris V. Belyatsky

Leading Engineer, Centre of Isotopic Research

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-4022-9366>
Scopus Author ID 8977408200
ResearcherID V-6644-2019
RSCI SPIN-code 6163-0820
bbelyatsky@mail.ru

Nikolay V. Rodionov

PhD (Physics and Mathematics),
Head, Sector of Mass-Spectrometric Analysis,
Centre of Isotopic Research

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-5201-1922>
Scopus Author ID 12789575500
ResearcherID T-8826-2017
RSCI SPIN-code 6500-4125
nickolay_rodionov@karpinskyinstitute.ru

Sergey A. Sergeev

PhD (Geology and Mineralogy),
Head, Centre of Isotopic Research

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-8460-8715>
Scopus Author ID 35467278500
ResearcherID N-4385-2013
RSCI SPIN-code 6353-0561
sergey_sergeev@karpinskyinstitute.ru

Aleksey V. Tarasov

Deputy Head, Management of Geological Bases,
Science, and Information Technology

Federal Subsoil Resources Management Agency,
Moscow, Russia

<https://orcid.org/0009-0002-1826-0655>
atarasov@rosnedra.gov.ru

Sergey I. Trushin

Deputy Director General

Polymetal, Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0002-7422-9396>
strushin@polymetal.ru

Александр Владимирович Козлов

Доктор геолого-минералогических наук,
доцент, заведующий кафедрой геологии
и разведки месторождений полезных ископаемых

Санкт-Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/000-0002-8759-4088>
Scopus Author ID 10042352300
ResearcherID AAC-8847-2020
SPIN-код РИНЦ 2298-4976
akozlov@spmi.ru

Aleksandr V. Kozlov

DSc (Geology and Mineralogy),
Associate Professor, Head, Department of Geology
and Exploration of Mineral Deposits

Saint-Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-8759-4088>
Scopus Author ID 10042352300
ResearcherID AAC-8847-2020
RSCI SPIN-code 2298-4976
akozlov@spmi.ru

Вклад авторов: *Шатов В. В.* — концепция исследования и написание исходного текста.
Ткаченко М. А., Зубова Т. Н., Леонтьев В. И., Тарасов А. В., Трушин С. И. — концепция исследования.
Шевченко С. С., Беляцкий Б. В., Родионов Н. В., Сергеев С. А., Козлов А. В. — развитие методологии.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: *Shatov V. V.* — research concept, writing the draft.
Tkachenko M. A., Zubova T. N., Leontev V. I., Tarasov A. V., Trushin S. I. — research concept.
Shevchenko S. S., Belyatsky B. V., Rodionov N. V., Sergeev S. A., Kozlov A. V. — methodology development.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 07.11.2024
Одобрена после рецензирования 12.12.2024
Принята к публикации 28.12.2024

Submitted 07.11.2024
Approved after reviewing 12.12.2024
Accepted for publication 28.12.2024