

УДК 553.3

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565

Использование состава циркона и апатита при прогнозировании Cu-Mo-Au-порфирового оруденения в Пекинском и Тесемском массивах Таймыро-Североземельской складчатой области

С. В. Берзин¹, С. В. Петров¹, Д. Л. Конопелько¹, М. Ю. Курапов¹, Т. А. Головина²,
Н. Я. Черненко³, В. С. Червяковский⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, e-mail: sbersin@ya.ru

²АО “Полиметалл УК”, 198216, г. Санкт-Петербург, пр-т Народного Ополчения, 2, лит. А

³ООО “Полярная экспедиционная компания”, 660043, г. Красноярск, ул. Дмитрия Мартынова, 43

⁴Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

Поступила в редакцию 07.08.2023 г., принята к печати 02.10.2023 г.

Объект исследования. Тесемский массив гранитоидов расположен в Северо-Таймырской тектонической зоне в окружении кембрийских пород. Пекинский массив гранитоидов находится в пределах Центрально-Таймырский зоны в окружении метаморфизованных протерозойских пород. **Цель.** Разработка методики использования состава акцессорных минералов гранитоидов для определения перспектив развития связанного с ними Cu-Mo-Au-порфирового оруденения на примере Пекинского и Тесемского массивов п-ова Таймыр. **Материалы и методы исследования.** Изучены акцессорные цирконы и апатиты из двух проб гранитоидов Пекинского массива (П1, П2) и двух проб гранитоидов Тесемского массива (Т2, Т3). Состав минералов исследован с помощью EPMA Cameca SX100. Содержание элементов в минералах определено методом LA-ICP-MS при помощи NexION 300S с приставкой NWR 213. **Результаты.** Составы пород обоих массивов попадают в поля адакитов на классификационных диаграммах. Большая часть цирконов из Пекинского и Тесемского массивов сформировались при температуре <738°C в достаточно окисленной магне с $\Delta FMQ = 0.6–2.6$, что является благоприятным признаком для выявления Cu-Mo-Au-порфирового оруденения. Цирконы характеризуются повышенными отношениями $(Eu/Eu^*)/Y$ и $(Ce/Nd)_n/Y$, что также является благоприятным, хотя и не очень надежным признаком для выявления порфирового оруденения. Значения отношений Eu/Eu^* и Sr/Y в апатитах из Тесемского массива выше, чем в апатитах из Пекинского массива. Оценки фугитивности кислорода ($\log fO_2$), рассчитанные по Mn в апатитах для четырех проб, совпадают в пределах погрешности. **Выводы.** Рассмотрены особенности использования состава акцессорных минералов (циркон, апатит) для определения перспективности развития связанного с гранитоидами Cu-Mo-Au-порфирового оруденения. На основе анализа состава циркона и апатита показано, что данные минералы-индикаторы могут использоваться для ранжирования массивов гранитоидов по степени их потенциальной рудоносности. На примере изучения двух гранитных интрузий п-ова Таймыр удалось показать, что Тесемский массив является более перспективным для обнаружения связанного Cu-Mo-Au-порфирового оруденения, чем Пекинский массив.

Ключевые слова: порфировое оруденение, гранит, Таймыр, циркон, апатит

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-27-00283). <https://rscf.ru/project/23-27-00283/>

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

Stepan V. Berzin¹, Sergey V. Petrov¹, Dmitriy L. Konopelko¹, Michail Yu. Kurapov¹,
Tamara A. Golovina², Natalia Ya. Chernenko³, Vasilii S. Chervyakovskiy⁴

Для цитирования: Берзин С.В., Петров С.В., Конопелько Д.Л., Курапов М.Ю., Головина Т.А., Черненко Н.Я., Червяковский В.С. (2024) Использование состава циркона и апатита при прогнозировании Cu-Mo-Au-порфирового оруденения в Пекинском и Тесемском массивах Таймыро-Североземельской складчатой области. *Литосфера*, 24(3), 547–565. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565>

For citation: Berzin S.V., Konopelko D.L., Petrov S.V., Kurapov M.Yu., Golovina T.A., Chernenko N.Ya., Chervyakovskiy V.S. (2024) 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. *Lithosphere (Russia)*, 24(3), 547–565. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565>

© С.В. Берзин, С.В. Петров, Д.Л. Конопелько, М.Ю. Курапов, Т.А. Головина, Н.Я. Черненко, В.С. Червяковский, 2024

¹St. Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya emb., St. Petersburg 199034, Russia, e-mail: sbersin@ya.ru²AO "Polymetal UK", 2A Narodnogo Opolcheniya st., St. Petersburg 198216, Russia³LLC "Polar Forwarding Company", 43 Dmitry Martynov st., Krasnoyarsk 660043, Russia⁴A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

Received 07.08.2023, accepted 02.10.2023

Research subject. The Tessemsky granite massif is located in the North Taimyr tectonic zone, surrounded by Cambrian rocks. The Pekinsky granite massif is located within the Central Taimyr zone, surrounded by metamorphosed Proterozoic rocks. **Aim.** To develop a methodology for using the composition of accessory granitoid minerals when prospecting Cu-Mo-Au-porphyry mineralization on the example of the Pekinsky and Tessemsky granitoid massifs of the Taimyr Peninsula. **Materials and methods.** Accessory zircon and apatite contained in two granitoid samples from the Pekinsky massif (P1, P2) and two granitoid samples from the Tessemsky massif (T2, T3) were studied. Their mineral composition was examined using an EPMA Cameca SX100 instrument. The element content in minerals was determined by LA-ICP-MS using an NexION 300S instrument equipped with an NWR 213 attachment. **Results.** Most of the zircons from the Pekinsky and Tessemsky massifs were formed at $T < 738^\circ\text{C}$ in oxidized magma with ΔFMQ of 0.6–2.6, which is a favorable sign for the identification of Cu-Mo-Au-porphyry mineralization. Zircons are characterized by elevated $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{Y}}$ and $(\text{Ce}/\text{Nd})_{\text{Y}}$ ratios, which is also a favorable, though not a strongly reliable, sign for identifying porphyry mineralization. The Eu/Eu^* and Sr/Y ratios in the apatites from the Tessemsky massif are higher than those in the apatites from the Pekinsky massif. The rock compositions of both massifs fall within the fields of adakites on the classification diagrams. The estimates of oxygen fugacity ($\log f\text{O}_2$) calculated from Mn in apatites for four samples agree well within the error limits. **Conclusion.** Specific features of using the composition of accessory minerals (zircon and apatite) for prospecting the Cu-Mo-Au-porphyry mineralization associated with granitoids were considered. Accessory indicator minerals can be used to rank granitoid massifs in order to assess their ore content. The example of two granite intrusions of the Taimyr Peninsula made it was possible to show that the Tessemsky massif is more promising for the discovery of associated Cu-Mo-Au-porphyry mineralization than the Pekinsky massif.

Keywords: porphyry mineralization, granite, Taimyr, zircon, apatite**Funding information**

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 23-27-00283). <https://rscf.ru/project/23-27-00283/>

Acknowledgements

We are grateful to Dr. M.V. Chervyakovskaya, V.A. Bulatov, and N.N. Farrakhova, analysts of the "Geoanalitik" Center, IGG UB RAS.

ВВЕДЕНИЕ

Медь является одним из важнейших металлов, необходимых для развития экономики, при этом около 40% меди в мире добывается из коренных медно-порфировых месторождений (Sillitoe, 2010). Месторождения этого типа формируются в зонах активных континентальных окраин и связаны с небольшими телами магматических пород среднего состава с порфировой структурой, над которыми образуется зональный ореол измененных пород, который может содержать или не содержать медное, золотое и/или молибденовое оруденение (Seedorff et al., 2005; Hedenquist, 2014; Sun et al., 2015). Au-Cu-порфировые месторождения наиболее выгодны для добычи меди и золота с экономической точки зрения, поэтому на развитие поисковых методов, которые позволяют выявлять такие месторождения, выделяются значительные средства во всем мире (Sillitoe, 2014).

В обрамлении Восточно-Сибирской платформы и к востоку от нее имеются значительные по размеру относительно слабоизученные территории, которые считаются перспективными на обнаружение

Au-Cu-порфировых месторождений (Petrov et al., 2021). Одним из таких регионов является Таймыр, где в последние годы проводятся начальные этапы поисковых работ, в которых принимает участие целый ряд крупных добывающих компаний. Широко развитые на Таймыре позднепалеозойские-раннемезозойские гранитоиды считаются одними из наиболее перспективных объектов для обнаружения новых рудных месторождений (Проскурнин и др., 2002, 2021). Однако недостаточная геологическая изученность и отсутствие современных аналитических данных для большинства из гранитоидных массивов существенно замедляют поисковые работы.

Одними из наиболее интенсивно развивающихся в последние годы методов поисковых работ на Au-Cu-порфировые месторождения являются методы оценки и дискриминации гранитоидов с точки зрения перспективности развития в них порфировых рудно-магматических систем, основанные на использовании аксессуарных минералов-индикаторов обстановок кристаллизации и эволюции расплавов (Lu et al., 2016; Cooke et al., 2017; Cassini et al., 2022). Высокая фугитивность кисло-

рода приводит к переходу рудообразующих гидротермальных флюидов в активное состояние, что, соответственно, благоприятно для образования рудных месторождений. Это подтверждается исследованиями последних лет, которые показали, что Cu-Mo-Au-порфировые месторождения связаны с окисленными расплавами, а Mo-W- и W-Mo-минерализация формируется в связи с умеренно восстановленными магмами (Cao et al., 2012). Кристаллизация гранитоидных расплавов сопровождается процессами фракционной кристаллизации и отделения летучих компонентов, за счет чего валовый состав гранитоидов является не в полной мере информативным для определения условий кристаллизации расплавов. В то же время некоторые акцессорные минералы выступают надежными индикаторами окислительно-восстановительных условий кристаллизации магмы и насыщенности расплавов летучими компонентами. В настоящее время это направление исследований интенсивно развивается. Методы и подходы, применяемые для дискриминации гранитоидных массивов по составам индикаторных акцессорных минералов (например, (Ballard et al., 2002)), постоянно совершенствуются и дополняются новыми данными. Не до конца изучен вопрос соотношения информации, получаемой по разным минералам гранитоидов. Задачей данной работы является рассмотрение особенностей использования состава акцессорных минералов гранитоидов для определения условий кристаллизации гранитоидных расплавов и перспектив развития связанного с ними Cu-Mo-Au-порфирового оруденения на примере двух массивов северной части п-ова Таймыр с учетом современных подходов в использовании минералов-индикаторов порфирового оруденения.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТАЙМЫРО-СЕВЕРОЗЕМЕЛЬСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Таймыро-Североземельская складчатая область охватывает п-ов Таймыр и примыкающий к нему арх. Северная Земля, а также соседние шельфовые акватории Карского моря и моря Лаптевых. Рассматриваемая область подразделяется на три тектонические зоны: Южно-, Центрально- и Северо-Таймырскую (Урванцев, 1949; Погребницкий, 1971; Зоненшайн, 1990). Границами этих зон являются разломы надвигового типа: на юге – Пясино-Фадеевский разлом, на севере – Главный Таймырский и Диабазовый разломы (рис. 1).

Северо-Таймырская тектоническая зона включает в себя северную часть п-ова Таймыр и острова арх. Северная Земля. На Северном Таймыре обнажаются в различной степени метаморфизованные преимущественно терригенные толщи, в основном кембрийского возраста и моложе (Lorenz et

al., 2007; Pease, Scott, 2009; Качурина и др., 2013; Ershova et al., 2015a, б; 2017, 2020). В тектоническом плане Северо-Таймырская зона составляет южную окраину Карского микроконтинента или блока (Верниковский, 1996; Metelkin et al., 2005, 2015; Lorenz, et al., 2008; Pease, Scott, 2009; Ershova et al., 2018, 2020). На островах арх. Северная Земля отмечены проявления ордовикского магматизма (Kurapov et al., 2020b). На Таймыре широко развит карбон-пермский гранитоидный магматизм (Верниковский, 1996; Lorenz et al., 2007; Pease et al., 2014; Курапов и др., 2018; Kurapov et al., 2020a; Vernikovskiy et al., 2020), маркирующий время коллизии Карского террейна с Сибирским континентом в позднем палеозое. Менее широкое распространение имеет позднепермский постколлизийный магматизм (Верниковский и др., 1998; Vernikovskiy et al., 2020) и позднепермско-триасовый гранитоидный магматизм, вероятно связанный с трапповым магматизмом Восточной Сибири (Vernikovskiy et al., 2003; Проскурнина и др., 2019; Augland et al., 2019).

Центральный Таймыр традиционно рассматривается как позднепротерозойский – палеозойский аккреционный комплекс, формировавшийся вдоль окраины Сибирского континента (Зоненшайн, 1990; Vernikovskiy et al., 2005). Однако последние исследования указывают на то, что эта зона представляла активную континентальную окраину Сибири в неопротерозое с последующим переходом в пассивную окраину в конце позднего протерозоя – начале палеозоя (Priyatkin et al., 2017). Тектоническая зона в основном сложена средне- и позднепротерозойскими метаосадочными породами, фрагментами офиолитов и магматическими породами. Эти комплексы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой и амфиболитовой фаций и перекрыты эдиакарскими – среднесилурийскими осадочными толщами (Верниковский, 1996; Качурина и др., 2013; Khudoley et al., 2018).

В Южно-Таймырской зоне вскрыты отложения от ордовика до триаса. Все отложения в той или иной степени дислоцированы, при этом степень интенсивности дислокаций уменьшается в южном направлении. Для Южно-Таймырской зоны характерны многочисленные излияния трапповых базальтов и внедрение в терригенные отложения основных силлов, а также даек щелочных гранитов и сиенитов поздней перми-триаса (Vernikovskiy et al., 2003; Augland et al., 2019).

В пределах Таймыро-Североземельской складчатой области выделяется зона, перспективная на обнаружение Cu-Au-Mo-порфирового оруденения (Проскурнин и др., 2002; Проскурнин и др., 2021). В этой зоне находятся оба изученных в настоящей работе гранитных массива. Тесемский массив гранитоидов расположен в Северо-Таймырской тектонической зоне в окружении кембрийских пород. Массив примыкает с северо-запада к Главному тай-

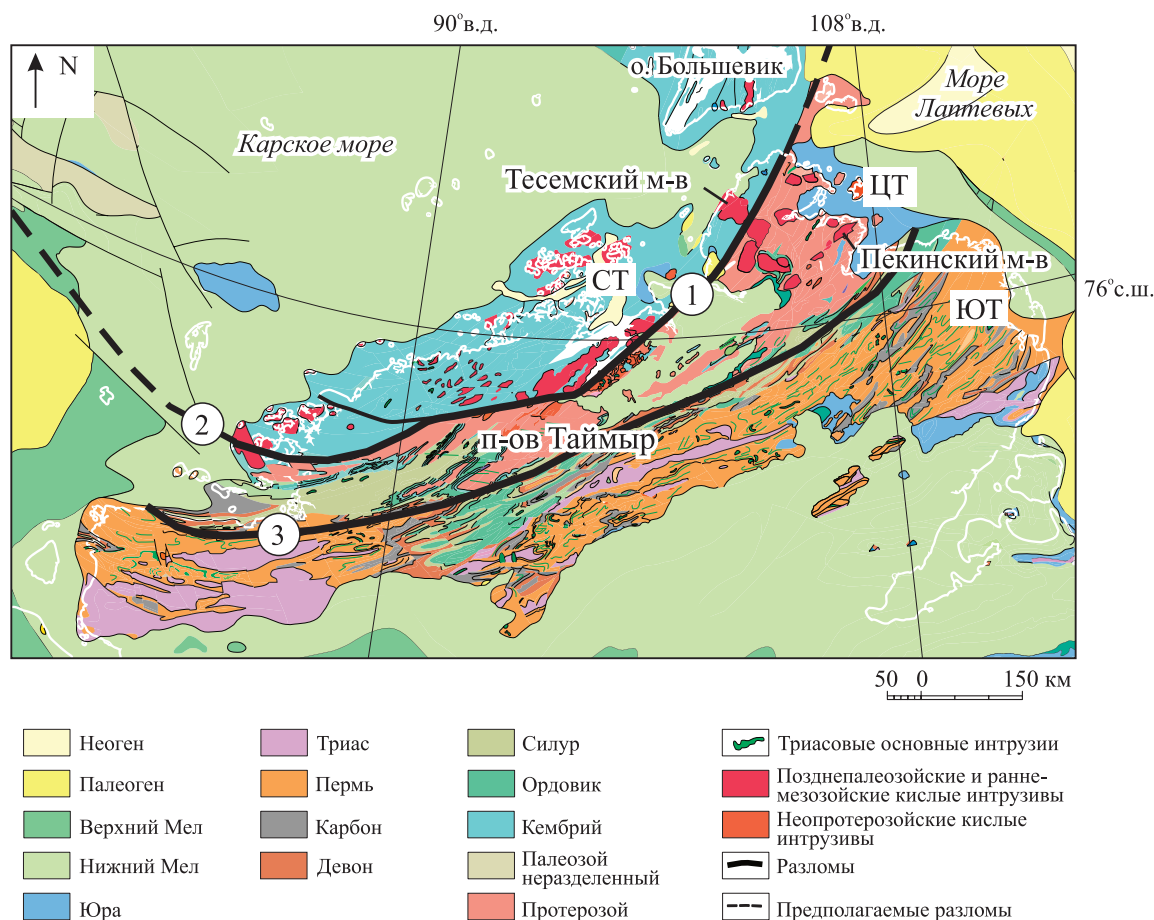


Рис. 1. Положение Тесемского и Пекинского массивов гранитоидов на геологической схеме Таймыро-Североземельской складчатой области и прилегающих территорий, по (Верниковский, 1996; Качурина и др., 2013; Ershova et al., 2018) с дополнениями и изменениями.

СТ – Северо-Таймырская зона, ЦТ – Центральнo-Таймырская зона, ЮТ – Южно-Таймырская зона. В кружочках 1–3: 1 – Главный Таймырский разлом, 2 – Диабазовый разлом, 3 – Пясино-Фадеевский разлом.

Fig. 1. Location of the Tessemskiy and Pekinskiy granite massifs on the simplified geological scheme of Taimyr and Severnaya Zemlya archipelago, after (Vernikovskiy, 1996; Kachurina et al., 2013; Ershova et al., 2018).

СТ – Northern Taimyr domain, ЦТ – Central Taimyr domain, ЮТ – Southern Taimyr domain. In circles 1–3: 1 – Main Taimyr fault, 2 – Diabasic fault, 3 – Pyasina-Faddey fault.

мырскому разлому. Пекинский массив гранитоидов расположен в пределах Центральнo-таймырской тектонической зоны и находится в окружении метаморфизованных докембрийских пород.

МАТЕРИАЛЫ И ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены циркон и апатит из двух проб гранитоидов Пекинского массива (П1 – гранит, П2 – биотитовый гранит) и из двух проб гранитоидов Тесемского массива (Т2 – катаклазированный гранодиорит, Т3 – диорит). Пробы Тесемского массива представлены неравнозернистыми, средне- и крупнокристаллическими гипидиоморфнозернистыми, слабокатаклазированными гранодио-

ритами. Средний минеральный состав, мас. %: кварц – 20–30, плагиоклаз (олигоклаз № 26–28) – 30–45, микроклин – 12–15, биотит – 10–12, роговая обманка – 5–7, прочие минералы: эпидот, серицит, хлорит, титанит, апатит, циркон, магнетит. Пробы пород Пекинской интрузии более кислые, равномернозернистые крупнокристаллические биотитовые граниты. В их составе обнаружены, мас. %: кварц – 25–30, плагиоклаз (олигоклаз-андезин № 26–30) – 25–28, микроклин – 27–30, биотит – 7–10, роговая обманка – 2–3, прочие минералы: хлорит (до 5 мас. %), серицит (до 2 мас. %), эпидот, карбонаты, титанит, апатит, циркон, магнетит. Гранитоиды относятся к известково-щелочной и щелочной серии с высоким содержанием K_2O , характерным для шошонитовой серии. Породы в це-

лом близки к островодужным и коллизионным гранитам, по (Pearce et al., 1984). Высокие значения Sr/Y-отношений и другие геохимические характеристики позволяют отнести эти гранитоиды к адakitам, которые являются специфическими надсубдукционными магматическими породами, обогащенными водой и летучими, и часто ассоциируют с порфировой минерализацией (Richards, Kerrich, 2007; Richards, 2011; Konopelko et al., 2021).

Состав минералов изучался с помощью электронно-зондового микроанализатора (EPMA) Cameca SX100. Содержания редких и редкоземельных элементов в минералах определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) при помощи NexION 300S с приставкой NWR 213 в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН по методике (Зайцева и др., 2016) (диаметр кратера 25 мкм).

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИРКОНА И АПАТИТА В КАЧЕСТВЕ МИНЕРАЛОВ-ИНДИКАТОРОВ

Циркон. Один из типичных акцессорных минералов гранитоидных пород, который уже довольно давно является объектом исследований, помогающих в решении разнообразных петрологических и металлогенических задач. Многочисленными работами показана возможность использования циркона не только для изучения возраста кристаллизации гранитоидов, но для оценки ряда важнейших характеристик условий формирования магматических расплавов, потенциально рудоносных в отношении медно-порфировых систем (Belousova et al., 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003).

Циркон является достаточно устойчивым минералом в магматических, метаморфических, гидротермально-метасоматических процессах, а также сохраняется при гипергенезе и накапливается в россыпях. Структура циркона практически не допускает диффузию элементов после кристаллизации, что позволяет использовать данный минерал для U-Th-Pb определения возраста и реконструкций условий в момент кристаллизации. За счет присутствия радиогенных элементов U и Th со временем кристалл или отдельные зоны кристалла циркона могут подвергаться метамиктизации, т. е. разупорядочению кристаллической решетки в результате радиоактивного распада. По трещинам в кристаллах циркона и зонам метамиктизации за счет их повышенной флюидной проницаемости может проходить рекристаллизация (т. е. регенерация исходного кристалла циркона) и перекристаллизация (образование новых вторичных кристаллов циркона) (рис. 2). В обоих случаях кристаллизация происходит не из расплава, а из раствора, что отражается на химическом составе цирконов. Одним из геохимических признаков цирконов, кристаллизую-

щихся при метаморфизме или метасоматозе, так называемых “гидротермальных” (hydrothermal) цирконов, считается повышение концентрации легких РЗЭ. В своей работе Хоскин выделил поля “магматических” и “гидротермальных” цирконов на диаграммах $La-(Sm/La)_n$ и $Ce/Ce^*-(Sm/La)_n$ (Hoskin, 2005) (рис. 3). Позднее С. Жонг и соавторы (Zhong et al., 2018) показали, что причиной повышения уровня легких РЗЭ и попадания анализов в поле так называемых “гидротермальных” цирконов может быть механическая примесь в кратере абляции апатита (<0.5%), титанита или монацита (см. рис. 3). Подобная примесь фактически не влияет на U-Pb возраст (Zhong et al., 2018), однако не позволяет использовать результаты анализа для определения окислительно-восстановительных параметров магмы и прогнозирования порфирового оруденения.

С учетом этих особенностей при выборе зерен цирконов для анализа методом LA-ICP-MS в настоящей работе выбирались участки кристаллов с тонкой ритмичной “осцилляторной” зональностью (см. рис. 2), на удалении от видимых включений, залеченных трещин (“шторок” с газово-жидкими включениями) (см. рис. 2ж, з), участков с рекристаллизацией и перекристаллизацией (см. рис. 2ж-и), различимых на BSE и CL-изображениях. Из результатов LA-ICP-MS отбраковывались анализы с аномально высокими содержаниями примесей Mg, Al, Fe, Ca, Ti, свидетельствующими о захвате кратером лазерной абляции механической примеси другого минерала. Отбраковано 4 анализа. Затем выбраны анализы, соответствующие “магматическим” цирконам по геохимическим признакам на диаграмме $La-(Sm/La)_n$ (Hoskin, 2005), без заметного количества механических включений других минералов (Zhong et al., 2018) (см. рис. 3). Поскольку не существует точно определенных значений La и $(Sm/La)_n$, по которым можно разделить “магматические” и условно “гидротермальные” цирконы, то мы использовали условные пороговые значения для “магматических” цирконов $La < 5$ г/т и $(Sm/La)_n > 5$ (см. рис. 3). Пределы обнаружения La в цирконе методом LA-ICP-MS 0.01–0.38 г/т гораздо ниже порогового значения 5 г/т, что позволяет достоверно выделить анализы “магматических” цирконов. На рис. 3 видно, что точки составов цирконов образуют практически непрерывный разброс между “магматическим” и условно “гидротермальным” полем цирконов. Скорее всего, это связано со смешением, т. е. попаданием в кратер абляции циркона, росшего из расплава, а также зон, претерпевших перекристаллизацию под действием гидротермальных растворов, или мелких включений других минералов. В цирконах на срезе наблюдаются регенерированные трещины, зоны перекристаллизации и включения апатита. В результате нами отбраковано более половины анализов цирконов LA-ICP-MS и для

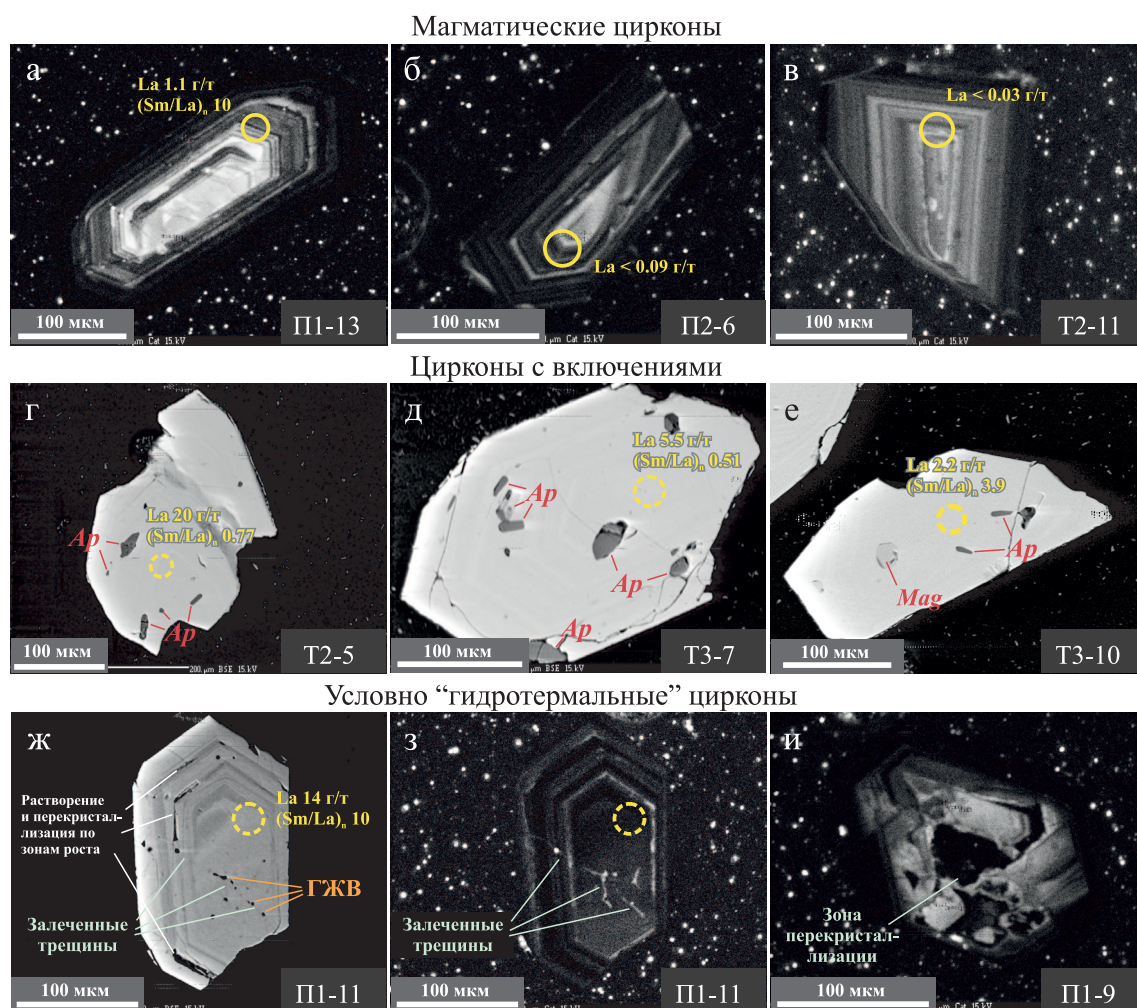


Рис. 2. Изображения цирконов в режиме отраженных электронов (BSE) (а–в, з, и) и катодолуминесцентные изображения (CL) (г–ж).

а–в – магматические цирконы с тонкой ритмичной “осцилляторной” зональностью; г–е – магматические цирконы с многочисленными включениями апатита, анализы которых попадают в поле условно “гидротермальных” цирконов; ж–и – магматические цирконы с зонами растворения, рекристаллизации (залеченные трещины) и перекристаллизации. Желтые кружки – кратеры LA-ICP-MS: сплошная линия – магматические цирконы, пунктирная линия – условно “гидротермальные” цирконы.

Fig. 2. Back-scattered electron (BSE) (а–в, з, и) and cathodoluminescence (CL) (г–ж) images of zircons.

а–в – magmatic zircons with fine rhythmic “oscillatory” zoning, г–е – magmatic zircons with apatite inclusions and “hydrothermal” composition signature, ж–и – magmatic zircons with zones of “hydrothermal” zircon (dissolution and recrystallization). Yellow circles is LA-ICP-MS craters: solid line – magmatic zircons, dotted line – “hydrothermal” zircons.

дальнейшего анализа использованы только зерна “магматических” цирконов.

Мы намеренно не использовали для выделения “магматических” цирконов вторую диаграмму $Ce/Ce^*-(Sm/La)_n$, предложенную (Hoskin, 2005), по двум причинам. Во-первых, содержания $Ce^* = (La_N \cdot Pr_N)^{0.5}$ в ряде анализов невозможно оценить, поскольку концентрации La в цирконе часто оказываются ниже пределов обнаружения или измеряются с большей погрешностью, чем другие РЗЭ. В этой связи М. Лоадером и соавторами (Loader et

al., 2017) предложена эмпирическая формула для расчета Ce/Ce^* в цирконе без использования лантана $Ce^* = (Nd_N)^2/Sm_N$. По этой же причине для оценки степени окисления магм и рудоносности вместо отношения Ce/Ce^* чаще используется более точно определяемое отношение $(Ce/Nd)_n$ (Lu et al., 2016; Pizarro et al., 2020). Во-вторых, поскольку величина цериевой аномалии (а точнее, отношение $(Ce/Nd)_n$) в дальнейшем будет использовано для выводов относительно рудоносности гранитоидов, то, отсеивая анализы с низким отношением Ce/Ce^* и остав-

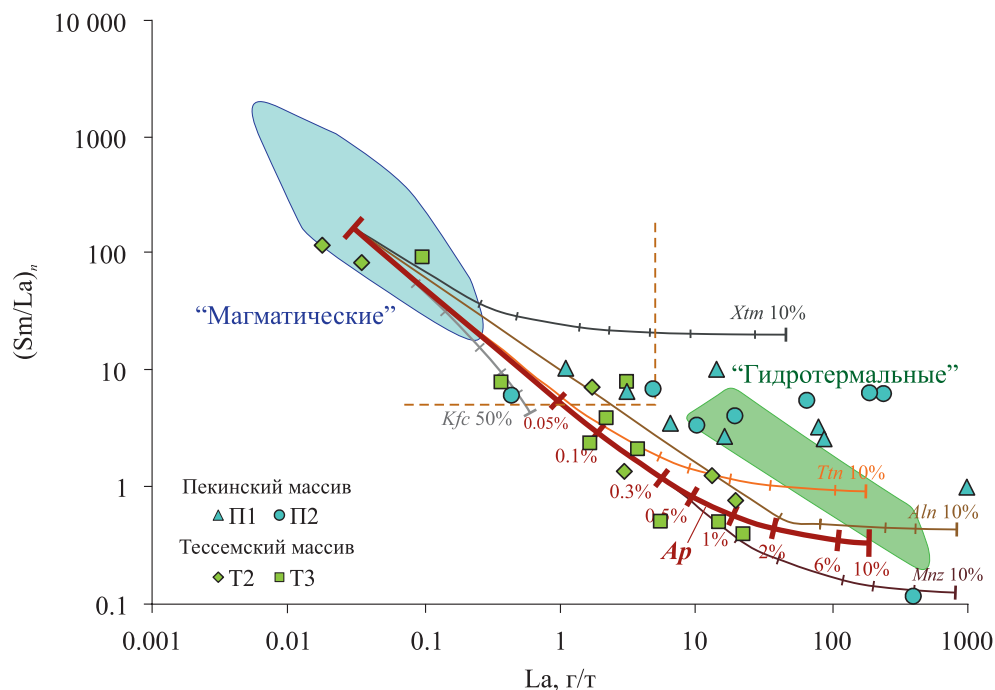


Рис. 3. Диаграмма $(\text{Sm/La})_n$ -La с полями составов “магматических” и “гидротермальных” цирконов по (Hoskin, 2005) и линиями смешения между цирконом и включениями минералов по (Zhong et al., 2018).

Ap – апатит, Ttn – титанит, Xtm – ксенотим, Aln – алланит, Mnz – монацит, Kfc – калиевый полевой шпат.

Fig. 3. $(\text{Sm/La})_n$ -La diagram in zircon in the granite with areas for hydrothermal and magmatic zircon by (Hoskin, 2005) and with mixing curves between zircon and mineral inclusions by (Zhong et al., 2018).

Ap – apatite, Ttn – titanite, Xtm – xenotime, Aln – allanite, Mnz – monazite, Kfc – K-feldspar.

для только анализы с высоким Ce/Ce^* , мы можем сделать ложный вывод о потенциальной рудоносности тех или иных массивов гранитоидов.

Цериевая и европиевая аномалии на спектрах распределения РЗЭ в цирконах традиционно рассматриваются как индикаторы окислительно-восстановительного состояния расплавов (например, (Ballard et al., 2002; Lu et al., 2016)). Повышенное отношение Ce/Ce^* в цирконе связывается с лучшим входением в структуру циркона Ce^{4+} , чем Ce^{3+} , и рассматривается как индикатор повышенного отношения $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ в расплаве, что, в свою очередь, является следствием большей окисленности магмы. Повышение отношения Eu/Eu^* и уменьшение в абсолютном выражении отрицательной Eu-аномалии в цирконе связываются с увеличением содержания в расплаве Eu^{3+} , который лучшего входит в структуру циркона по сравнению с Eu^{2+} . Повышение содержания в расплаве Eu^{3+} связывается не только с повышением значения отношения $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$, но и с повышением содержания Eu в расплаве. Повышенное содержание Eu и дефицит Y в надсубдукционных магмах могут достигаться за счет отсутствия фракционирования плагиоклаза и прохождения фракционирования амфибола и граната на больших глубинах вследствие высокой до-

ли воды в расплаве (Müntener et al., 2001; Richards, 2011; и др.). По этой причине повышенное отношение $(\text{Eu/Eu}^*)/\text{Y}$ в расплаве и в цирконах рассматривают как индикатор насыщения магмы водой (Lu et al., 2016; Pizarro et al., 2020).

При этом некоторые авторы скептически относятся к возможности использования цериевой и европиевой аномалий в цирконе для прогнозирования Cu-Mo-Au-порфирового оруденения. Так, Д. Конг (Kong, 2022) по достаточно большому массиву данных не выявил разницу по цериевой и европиевой аномалиям в цирконе между рудоносными и безрудными гранитоидами. По данным М. Лоадера и соавторов (Loader et al., 2017), совместная кристаллизация циркона и титанита приводит к изменению отношения Eu/Eu^* в цирконе и отчасти изменению Ce/Ce^* . Этими авторами предлагается использование для определения окислительно-восстановительного состояния магмы только цирконы с содержанием Ta > 0.2 г/т (Loader et al., 2017). Стоит заметить, что данное граничное значение содержания Ta в цирконе 0.2 г/т определено не очень точно и, возможно, в будущем будет уточняться. Однако сама идея учета влияния кристаллизации других минералов-концентраторов РЗЭ при анализе отношений РЗЭ в цирконах выглядит убе-

дительно. Все изученные нами цирконы содержат $Ta > 0.2$ г/т. В более поздней работе М. Лоадер и соавторы (Loader et al., 2022) на основании экспериментальных данных показывают, что увеличение цериевой аномалии в цирконе может быть связано с рядом факторов (повышенное содержание воды, низкая температура, совместная кристаллизация циркона с титанитом) и предостерегают от определения степени окисления магмы по величине Се-аномалии. Поэтому данные об окислительно-восстановительном состоянии расплавов по содержанию Се и Eu в цирконе стоит использовать с осторожностью и в совокупности с данными по другим минералам-индикаторам.

Температура кристаллизации циркона оценена по содержанию Ti в цирконе по геотермометру (Watson et al., 2006). Погрешность данного геотермометра складывается из погрешности коэффициентов формулы и погрешности определения Ti методом LA-ICP-MS. Авторы геотермометра отмечают, что погрешность, связанная с определением Ti, значительно выше, чем погрешность коэффициентов формулы геотермометра, а также что обе погрешности нелинейно увеличиваются по мере уменьшения содержания Ti в цирконе и, соответственно, уменьшения расчетной температуры кристаллизации (Watson et al., 2006). По данным Г. Пизарро и соавторов (Pizarro et al., 2020), большая часть массивов гранитоидов, с которыми связано порфиоровое оруденение, сформировались при температуре $< 738^\circ\text{C}$.

Окислительно-восстановительные условия в мантии в момент кристаллизации циркона в форме разности со значением буфера фаялит-магнетит-кварц (ΔFMQ) оценены по оксидометру (Loucks et al., 2020). Данный оксидометр основан на вхождении в структуру циркона гетеровалентных катионов Се и U при температуре, рассчитанной по содержанию Ti в цирконе. Погрешность данного оксидометра складывается из погрешности коэффициентов формулы и погрешности определения Се, U, Ti методом LA-ICP-MS и оценивается авторами оксидометра в пределах 0.6 ед. $\log fO_2$ (Loucks et al., 2020). Расчет начального содержания урана в цирконе U_i производился на условный возраст 280 млн лет исходя из данных о времени прохождения гранитоидного надсубдукционного и коллизионного магматизма в Таймыро-Североземельской складчатой области (Верниковский, 1996; Kurarov et al., 2020a; Vernikovskiy et al., 2020). Возможные вариации возраста гранитоидов в несколько десятков миллионов лет не вносят сколько-либо существенную погрешность в расчет величины ΔFMQ . При использовании данного термометра необходимо принимать во внимание тот факт, что, несмотря на заявленную небольшую погрешность в определении фугитивности кислорода (Loucks et al., 2020), расчет $\log fO_2$ опирается, в

частности, на содержание Се в цирконе, что, в свою очередь, зависит не только от фугитивности кислорода, но и от многих других факторов (Loader et al., 2022). Поэтому реальная неопределенность при расчете ΔFMQ по цирконам в природных объектах может превышать заявленную погрешность расчетов и есть смысл обращать внимание на вариации ΔFMQ в пределах одной пробы.

Апатит. Распространенный аксессуарный минерал магматических пород, рассматривается в качестве важного индикатора для оценки петрогенезиса горных пород и оруденения (Mao et al., 2016). Это связано с тем, что содержания галогенов и некоторых микроэлементов (таких как Mn, Sr, легкие РЗЭ, Th, Y, Eu и Ce) в апатите определяются составом расплава, а также окислительно-восстановительными условиями кристаллизации исходной магмы (Belousova et al., 2002; Imai, 2004; Harlov, 2015; Sun et al., 2019). Апатит начинает кристаллизоваться на ранних этапах кристаллизации гранитных магм и повсеместно встречается в виде включений в цирконах, плагиоклазе и других минералах. Апатит устойчив при низкотемпературном метаморфизме и гипергенезе (Harlov, 2015).

При разбраковке результатов LA-ICP-MS проведена проверка анализов на наличие возможных твердых включений, которые могли попасть в кратер абляции, по повышенным содержаниям примесей Fe, Si, Al, Ti, K, не характерных для апатитов магматических пород (по данным (Belousova et al., 2002)). Анализы с очевидными аномалиями составов апатита не выявлены, при изучении на SEM и EPMA на срезе зерен апатита также не были отмечены минеральные включения.

В гранитоидах апатит является минералом концентратором летучих компонентов (F^- , Cl^- , SO_3^{2-}), которые играют важную роль в процессах рудогенеза, в том числе фактически единственным минералом концентратором Cl. На дискриминационной диаграмме $Cl-SO_3$, предложенной Л. Паном (Pan et al., 2016, 2020), в апатитах выделяются поля составов апатита из гранитных интрузивов, связанных с медно-порфировым оруденением (fertile) и поля составов безрудных (barren) интрузивов.

Повышенные значения отношений Sr/Y и Eu/Eu^* в расплавах традиционно связываются с увеличением содержанием воды в надсубдукционных магмах и повышением потенциальной рудоносности рудно-магматических систем, поскольку предполагается, что это является следствием фракционирования амфибола и, возможно, граната в глубинных магматических очагах над зоной субдукции (Müntener et al., 2001; Richards, 2011; и др.). Данные отношения использованы в основе некоторых дискриминационных диаграмм для апатита (Cao et al., 2012; Pan et al., 2016, 2020; Zafar et al., 2020), которые применены нами при

определении окислительно-восстановительных условий магмы.

Однако существует и критическое мнение на этот счет. Так, по экспериментальным данным Ч. Натвани и соавторов (Nathwani et al., 2020), наблюдается несоответствие между модельными составами магм и содержаниями Sr, Y, Mg и Eu в апатите, что объясняется влиянием процессов эволюции магматического расплава на верхнекоровом уровне.

Фугитивность кислорода в момент кристаллизации апатита рассчитана по содержанию Mn в структуре апатита по оксибарометру (Miles et al., 2014). Марганец в магматическом расплаве присутствует в виде катионов Mn^{2+} и Mn^{3+} , соотношение которых определяется окислительно-восстановительными условиями. Данный оксибарометр (Miles et al., 2014) основан на более эффективном вхождении Mn^{2+} в структуру апатита в позицию Ca^{2+} , по сравнению с Mn^{3+} , за счет их более близких ионных радиусов.

Однако оксибарометр (Miles et al., 2014) без данных о температуре кристаллизации апатита позволяет рассчитать фугитивность кислорода ($\log fO_2$) в абсолютных значениях, а не относительно известных минеральных буферов (FMQ, NNO, MH и др.), значения которых уменьшаются при понижении температуры кристаллизующегося расплава. Поэтому значения фугитивности кислорода $\log fO_2$, полученные по содержанию Mn в апатите по (Miles et al., 2014), невозможно сопоставить со значениями ΔFMQ , полученными по цирконам по (Loucks et al., 2020).

Погрешность расчета $\log fO_2$ складывается из погрешности коэффициентов формулы, которые приведены в статье (Miles et al., 2014), и погрешности измерения содержания Mn в апатите. Погрешность средних значений $\log fO_2$ в пробе (Δ) рассчитана путем геометрического суммирования стандартного отклонения в пределах пробы и средней погрешности расчета $\log fO_2$.

Кроме того, существует и скептическое мнение некоторых ученых (Bromiley, 2021; Wang et al., 2022), согласно которому содержания Mn в апатите могут быть связаны не с окислительно-восстановительными условиями, а с фракционной кристаллизацией магмы, на что, по мнению этих исследователей, указывают зависимость между содержанием Mn в апатите и содержанием ряда петрогенных элементов во вмещающей породе. Также существуют и экспериментальные данные, ставящие под сомнение связь между фугитивностью кислорода и содержанием Mn в апатите (Stokes et al., 2019). Поэтому данные о фугитивности кислорода, полученные по указанному оксибарометру, стоит использовать только в совокупности с другими признаками, принимая во внимание погрешность расчета $\log fO_2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав цирконов. Цирконы Пекинского и Тесемского массивов характеризуются сходными спектрами распределения РЗЭ (рис. 4а, б). На диаграммах $10\,000(Eu/Eu^*)Y-(Ce/Nd)_n/Y$ и $(Eu/Eu^*)_n-(Dy/Nd)_n$ с полями составов по (Lu et al., 2016; Pizarro et al., 2020) цирконы Пекинского и Тесемского массивов располагаются в поле составов интрузивов, с которыми связано порфировое оруденение.

По содержанию Ti в цирконе рассчитаны температуры кристаллизации по геотермометру (Watson et al., 2006) (рис. 5а). В ряде зерен цирконов содержания Ti оказались ниже пределов обнаружения, который в наших анализах в среднем составляет 3.0 ± 1.3 г/т. Минимальная определяемая температура кристаллизации циркона с учетом данного предела обнаружения в наших анализах составляет $640 \pm 33^\circ C$. Таким образом, данный предел обнаружения Ti в цирконе оказывается достаточным для того, чтобы определить температуру образования цирконов: $T < 738^\circ C$, которая указывает на перспективы выявления порфирового оруденения, согласно (Pizarro et al., 2020). Погрешность измерения Ti в цирконе в среднем составляет $\pm 27-58\%$ (1σ), что приводит к средней погрешности расчета температуры $\pm 32-48^\circ C$ (1σ), что в целом сопоставимо с погрешностями, приводимыми авторами данного геотермометра (Watson et al., 2006). В пределах отдельных проб наблюдаются значительные вариации температуры кристаллизации цирконов, существенно превышающие погрешности расчета температуры (см. рис. 5а). Вероятно, это связано с кристаллизацией цирконов на различных стадиях кристаллизации магматического расплава. Вариации температуры кристаллизации цирконов и наличие значительной доли цирконов с содержаниями Ti ниже пределов обнаружения не позволяют корректно оценить среднюю температуру кристаллизации для отдельных проб или массивов гранитоидов по имеющейся выборке анализов. Однако можно сделать вывод, что большая часть цирконов из Пекинского и Тесемского массивов сформировались при $T < 738^\circ C$ (см. рис. 5а), что является благоприятным признаком для выявления порфирового оруденения по (Pizarro et al., 2020).

Для Пекинского и Тесемского массивов рассчитаны значения ΔFMQ по оксибарометру (Loucks et al., 2020) (см. рис. 5б). Стоит отметить, что значения ΔFMQ рассчитаны только для цирконов, в которых содержания Ti (а также Ce и U) выше предела обнаружения, т. е. в нашем случае для 1–3 цирконов из каждой пробы. В пределах одной пробы наблюдаются вариации по параметру ΔFMQ , в 2–3 раза превышающие погрешность определения ± 0.6 по (Loucks et al., 2020). Значения ΔFMQ для цирконов Пекинского и Тесемского массивов составляют 0.6–2.6, что в целом можно рассматривать как

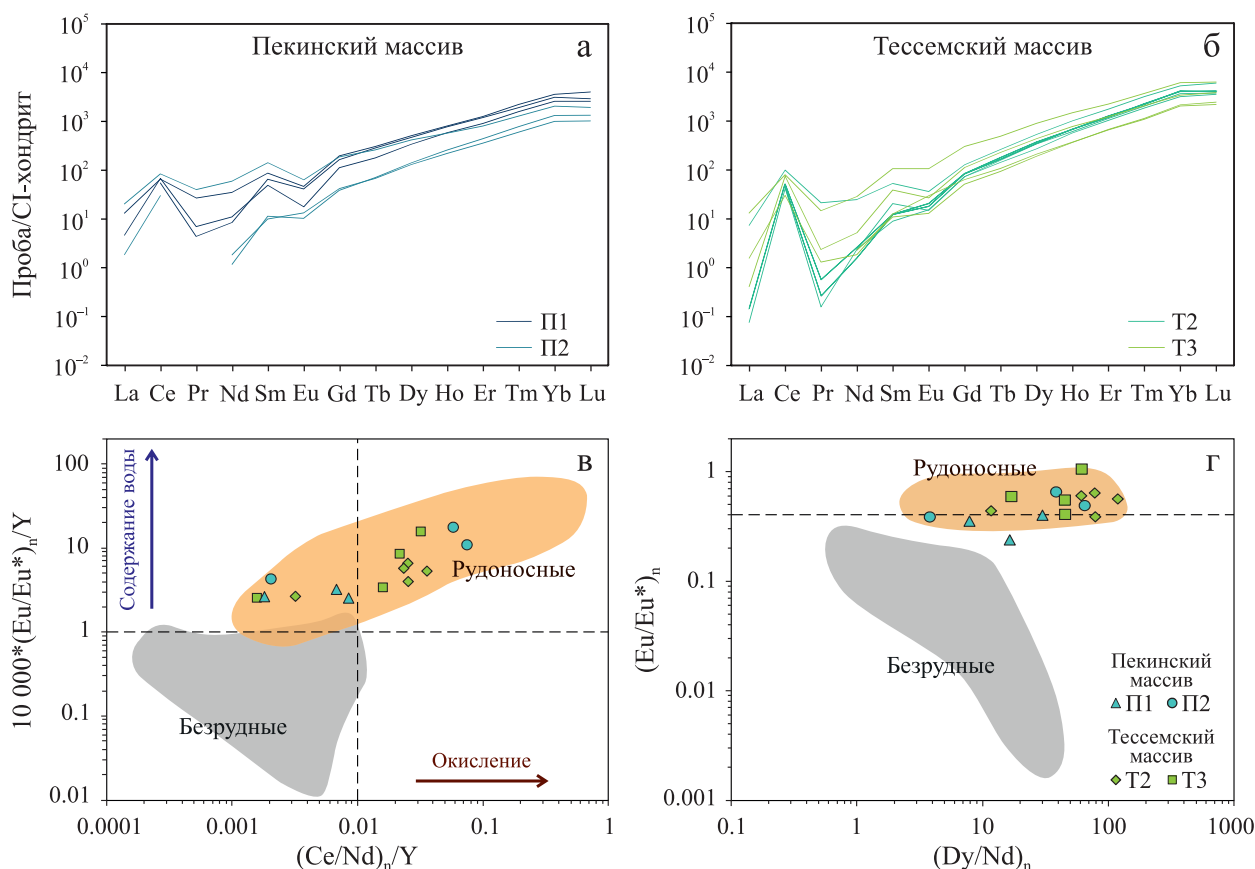


Рис. 4. Спектры распределения РЗЭ в цирконе из Пекинского (а) и Тесемского (б) массивов гранитоидов, нормированные по CI-хондриту (Sun, McDonough, 1989), и диаграммы соотношения РЗЭ в цирконе из гранитоидов с полями составов рудоносных и безрудных гранитоидов по (Lu et al., 2016; Pizarro et al., 2020) (в – $10\,000(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_n/\text{Y}-(\text{Ce}/\text{Nd})_n/\text{Y}$, г – $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_n-(\text{Dy}/\text{Nd})_n$).

Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns of zircon in Pekinsky (a) and Tessemkiy (b) granite massifs, normalizing values from (Sun, McDonough, 1989) and trace elements ratios in zircon in Pekinsky and Tessemkiy granite massifs on the diagram after (Lu et al., 2016; Pizarro et al., 2020) (в – $10\,000(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_n/\text{Y}-(\text{Ce}/\text{Nd})_n/\text{Y}$, г – $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_n-(\text{Dy}/\text{Nd})_n$).

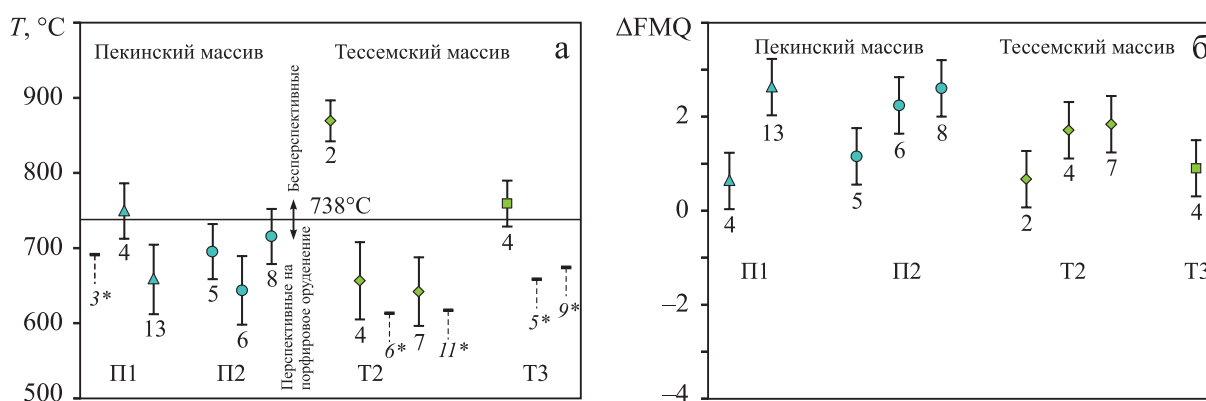


Рис. 5. Температура формирования по содержанию Ti в цирконах по (Watson et al., 2006) (а) и ΔFMQ по содержанию Ce, U, Ti в цирконах по (Loucks et al., 2020) (б) из гранитоидов Пекинского и Тесемского массивов.

Снизу подписаны номера проб и номера зерен цирконов в каждой пробе. $\Delta\text{FMQ} = \log/\text{O}_2(\text{циркон}) - \log/\text{O}_2(\text{FMQ})$. *Содержания Ti в цирконе ниже пределов обнаружения, верхняя планка – температура, рассчитанная для предела обнаружения Ti в каждом анализе. 738°C – температура, ниже которой формируется большая часть гранитоидов, с которыми связано Cu-Mo-Au-порфировое оруденение, по данным (Pizarro et al., 2020).

Fig. 5. Temperature by Ti in zircons after (Watson et al., 2006) (a) and ΔFMQ by Ce, U and Ti in zircons after (Loucks et al., 2020) (b) from Pekinsky and Tessemsky massif.

Sample and numbers of zircon grains in each sample are signed below. $\Delta FMQ = \log/O_2(\text{циркон}) - \log/O_2(FMQ)$. *Ti content in zircon is below the detection limits, the upper bar is the temperature calculated for the detection limit of Ti in each individual analysis. 738°C is temperature value, below which most of the fertile granitoids are formed after (Pizarro et al., 2020).

благоприятный фактор для перспектив поиска порфирового оруденения. Значения ΔFMQ для цирконов из двух массивов перекрываются в пределах вариаций и в пределах погрешности определения (см. рис. 5б), что фактически не позволяет использовать в нашем случае данный параметр для ранжирования массивов гранитоидов между собой. Ранжирование было бы возможно при увеличении выборки цирконов и повышении точности измерения U, Ce и Ti в цирконах.

Состав апатитов. В апатите из Пекинского и Тесемского массивов (рис. 6) содержание SO_3 0.10–0.22 мас. %, содержание Cl от <0.03 (ниже пределов обнаружения) до 0.07 мас. % (рис. 7а), что соответствует апатиту из гранитных интрузивов, связанных с медно-порфировой минерализацией по (Pan et al., 2016, 2020). Предел обнаружения SO_3 методом ЕРМА составил 0.07–0.08 мас. %, что примерно соответствует границе между массивами с медной минерализацией и безрудными интрузивами по (Pan et al., 2016, 2020). В пробах с обоих массивов апатиты с содержанием SO_3 ниже пределов обнаружения не выявлены. На диаграммах $Eu/Eu^*-(La/Yb)_n$, $Sr/Y-Eu/Eu^*$, $Sr/Y-(La/Yb)_n$ в апатите практически все анализы из Пекинского и Тесемского массивов попадают в поле составов адакитов по (Pan et al., 2020). Отношения Eu/Eu^* и

Sr/Y в апатитах из Тесемского массива выше, чем в апатитах из Пекинского массива.

На диаграмме $(Eu/Eu^*)_n-Sr$ с полями составов (Cao et al., 2012; Zafar et al., 2020) в пробах апатитов из обоих массивов наблюдаются значительные вариации по содержанию Sr при относительно небольших вариациях Eu/Eu^* . За счет этого точки анализов апатитов из Пекинского массива (Sr 187–728 г/т) попали в поля Cu-Mo-порфирового и Mo-W-оруденения. Точки анализов апатитов из Тесемского массива (Sr 436–898 г/т) преимущественно находятся в поле Cu-Mo-порфирового и частично в поле Pb-Zn оруденения. Наблюдаемые вариации содержания Sr в апатите могут свидетельствовать о кристаллизации различных зерен апатита на разных этапах эволюции магматического расплава. Факторами изменения состава расплава могли стать фракционирование роговой обманки, плагиоклаза, изменение глубины или содержания воды в магме. Низкие содержания в апатитах Mg (10–55 г/т в Тесемском и 23–220 г/т в Пекинском массиве), по результатам моделирования (Nathwani et al., 2020), могут свидетельствовать о кристаллизации апатита из существенно фракционированных магм в условиях верхней земной коры.

Окислительно-восстановительные условия кристаллизации магм по содержанию Mn в апатите по

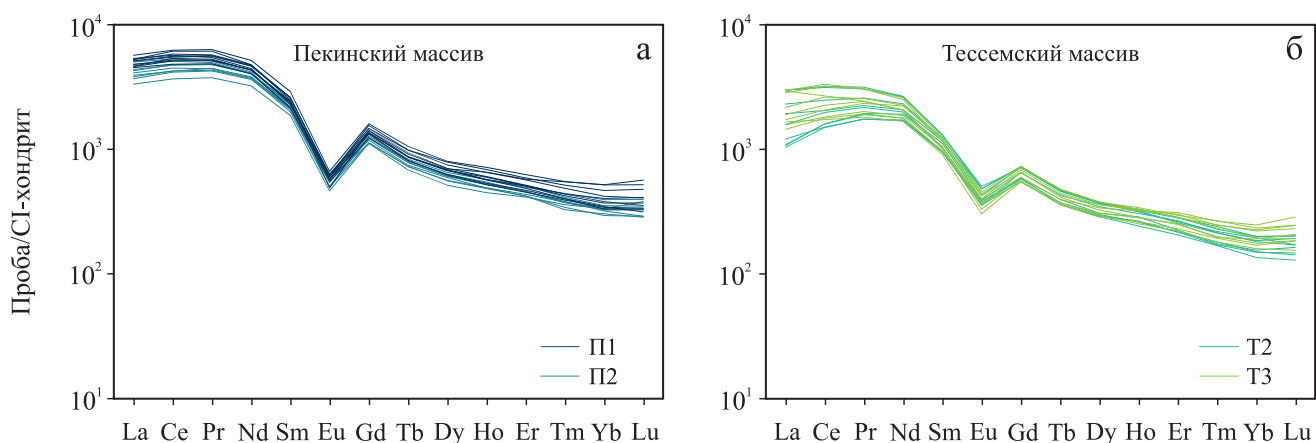


Рис. 6. Спектры распределения РЗЭ в апатите из гранитоидов, нормированные по CI-хондриту (Sun, McDonough, 1989).

а – Пекинский массив, б – Тесемский массив.

Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns of apatite in the granite, normalizing values from (Sun, McDonough, 1989).

а – Pekinskiy massif, б – Tessemskiy massif.

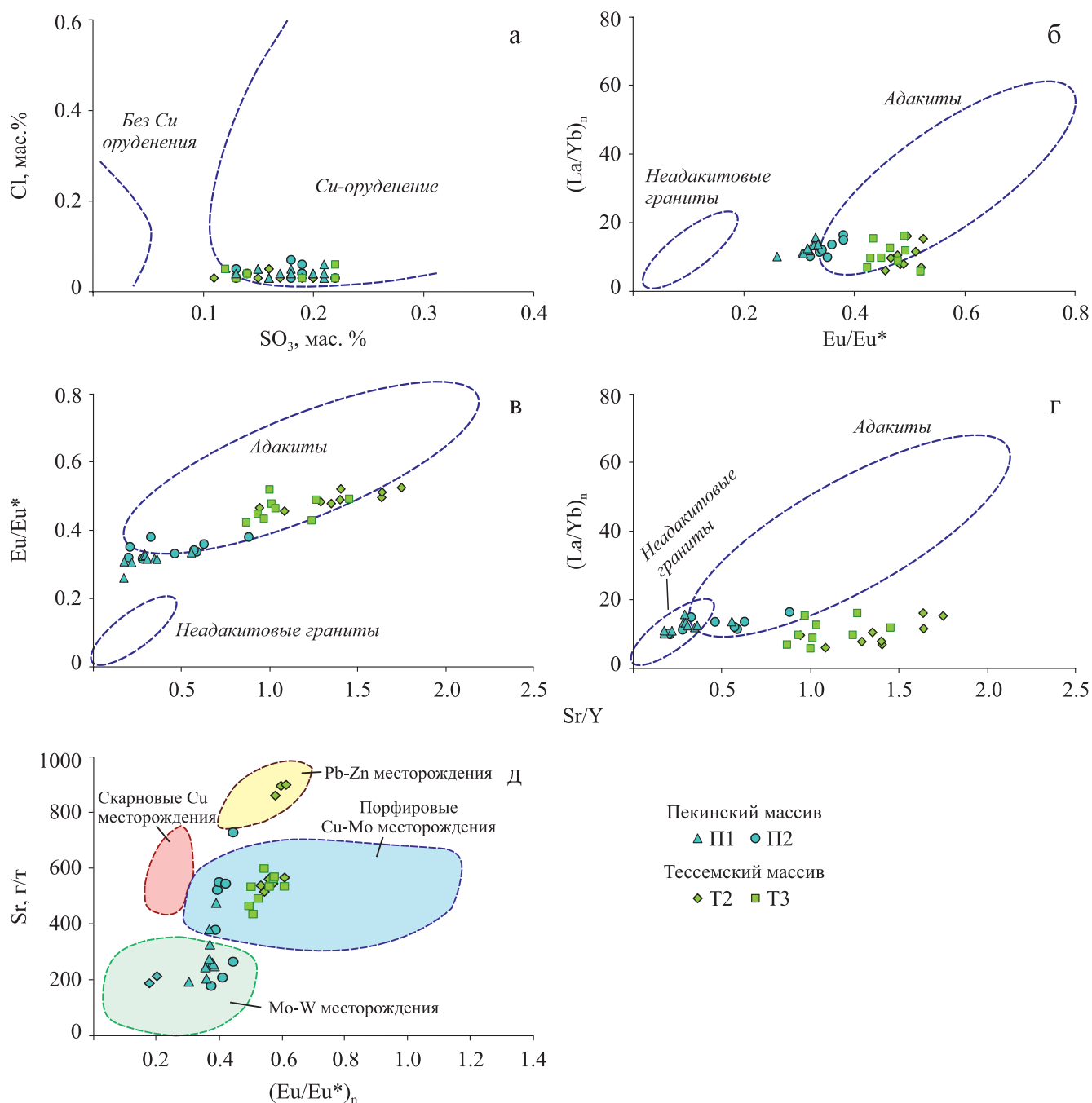


Рис 7. Диаграммы соотношения редких элементов в апатите из гранитоидов.

а – Cl–SO₃, б – (La/Yb)_n–Eu/Eu*, в – Eu/Eu*–Sr/Y, г – (La/Yb)_n–Sr/Y с полями составов по (Pan et al., 2016, 2020), д – Sr–(Eu/Eu*)_n с полями составов по (Cao et al., 2012; Zafar et al., 2020).

Fig. 7. Apatite major and trace element ratios in the granites.

а – Cl–SO₃, б – (La/Yb)_n–Eu/Eu*, в – Eu/Eu*–Sr/Y, г – (La/Yb)_n–Sr/Y with field by (Pan et al., 2020), д – Sr–(Eu/Eu*)_n with field by (Cao et al., 2012; Zafar et al., 2020).

оксибарометру (Miles et al., 2014) в изученных пробах гранитоидов оценены в диапазоне $\log fO_2$ – fO_2 10.6–11.6 (рис. 8). Погрешность измерения содержания Mn в апатите методом LA-ICP-MS составля-

ет ± 5 –10% (1σ). Таким образом, погрешность расчета $\log fO_2$ составляет ± 2.7 –3.0 (1σ), что в несколько раз превышает разницу по показателю $\log fO_2$ между разными пробами из изучаемых нами мас-

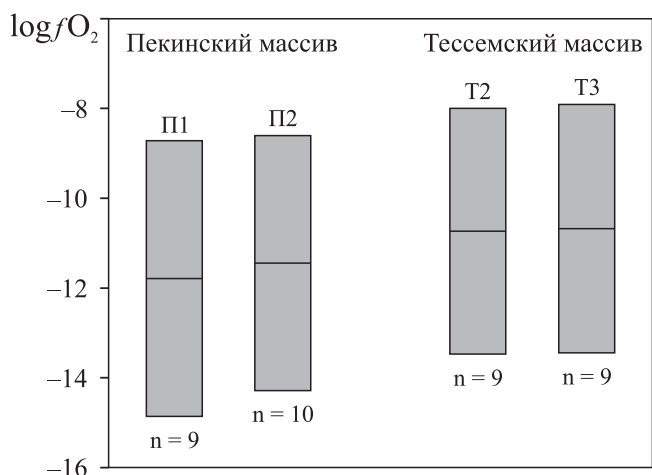


Рис. 8. Средние значения фугитивности кислорода ($\log fO_2$) по содержанию Mn в апатите по оксибарометру (Miles et al., 2014) в пробах Пекинского и Тессемского массивов.

Сверху подписаны номера проб; n – количество анализов апатита в одной пробе.

Fig. 8. Average values of oxygen fugacity ($\log fO_2$) based on the content of Mn in apatite by oxybarometer (Miles et al., 2014) in samples from the Pekinskiy and Tessemkiy massifs.

Numbers of samples are signed above; “n” is the number of analyzes of apatite from each sample.

сивов. Причем бóльшая часть погрешности ± 1.9 – 2.0 обуславливается погрешностью коэффициентов формулы (Miles et al., 2014), а не погрешностью измерения Mn в апатите. Для каждой пробы рассчитано среднее значение $\log fO_2$, стандартное отклонение в пределах пробы составило 0.1 – 0.4 ед. $\log fO_2$. Погрешность средних значений (Δ) составила ± 2.7 – 3.1 . Как видно на рис. 8, при близких средних значениях $\log fO_2$ в изученных нами пробах существенная погрешность фактически не позволяет сопоставить их между собой или с данными по другим массивам. А с учетом того, что погрешность охватывает бóльшую часть диапазона $\log fO_2$ эндогенных процессов, и при отсутствии привязки к минеральным буферам (FMQ, NNO, MH и др.), полученные данные по оксибарометру (Miles et al., 2014) не могут быть использованы для ранжирования массивов по перспективам рудоносности.

ВЫВОДЫ

Таким образом, нами на примере гранитоидов Пекинского и Тессемского массива Таймыра рассмотрены особенности использования состава акцессорных минералов-индикаторов (циркон и апатит) для определения перспективности

развития связанного с гранитоидами Cu-Mo-Au-порфирового оруденения.

Показано, что возможность применения составов апатита и циркона в качестве одного из признаков для определения рудоносности гранитоидов зависит от ряда факторов. В первую очередь необходима отбраковка зерен по морфологическим признакам. Нами предложены критерии оценки надежности первичных аналитических данных. Кроме того, показаны ограничения применяемых составов минералов по ряду геохимическим параметрам. Отмечено, что достоверность некоторых расчетных величин ($\log fO_2$ по Mn в апатите, T по Ti в цирконе) зависит от пределов обнаружения и погрешности измерения содержаний элементов на конкретном приборе. Исходя из полученных нами данных, можно сделать вывод, что Тессемский массив является более перспективным для обнаружения Cu-Mo-Au-порфирового оруденения, чем Пекинский массив.

Вариации содержания Sr и Sr/Y в апатите, температуры по Ti в цирконе, ΔFMQ по Ce, U, Ti в цирконе в пределах одной пробы могут быть связаны с кристаллизацией различных кристаллов на разных этапах эволюции магматического расплава.

Данные, полученные для гранитоидов Пекинского и Тессемского массивов Таймыра по разным минералам-индикаторам, как это часто бывает в природных объектах, не в полной мере согласуются между собой. Поэтому важно рассматривать совокупность данных по нескольким минералам-индикаторам (в том числе титаниту, магнетиту и др.).

По нашему мнению, особенности состава минералов-индикаторов в гранитоидах не могут выступать в качестве прямого признака, указывающего на наличие (или отсутствие) Cu-Mo-Au-порфирового оруденения, но могут быть использованы для разделения массивов по степени потенциальной продуктивности. Критическое рассмотрение аналитических данных, корректность использования морфологических признаков, точность и достоверность расчетных параметров способствуют выявлению объектов, наиболее перспективных на Cu-Mo-Au-порфировое оруденение.

Благодарности

Авторы выражают благодарность аналитикам ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН: к.х.н. М.В. Червяковской, В.А. Булатову, Н.Н. Фарраховой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верниковский В.А. (1996) Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 202 с.
Верниковский В.А. Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Пономарчук В.А., Ковач В.П., Травин А.В., Яковлева С.З.,

- Березная Н.Г. (1998) Возраст постколлизийных гранитоидов Северного Таймыра: U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr- и Ar-Ar-данные. *Докл. АН*, **363**(3), 375-378.
- Зайцева М.В., Пупышев А.А., Шапова Ю.В., Вотяков С.Л. (2016) U-Pb-датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой NexION300S и приставки для лазерной абляции NWR213. *Аналитика и контроль*, **20**(4), 294-306. <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>
- Зоненшайн Л.П. (1990) Тектоника литосферных плит территории СССР. Ч. II. М.: Недра, 344 с.
- Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Гавриш А.В., Орлов В.В., Дымов В.А. (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист Т-45-48 – Мыс Челюскин. Объяснит. записка. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 562 с.
- Курапов М.Ю., Ершова В.Б., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Худoley А.К., Луцицкая М.В., Прокопьев А.В. (2018) Каменноугольный магматизм Северного Таймыра: результаты изотопно-геохимических исследований и геодинамические следствия. *Геотектоника*, (2), 76-90.
- Погребницкий Ю.Э. (1971) Палеотектонический анализ Таймырской складчатой системы. М.: Недра, 284 с.
- Проскурнин В.Ф., Листков А.Г., Гавриш А.В., Ванюнин Н.В. (2002) Металлогенетический анализ и перспективы промышленного освоения Таймыро-Североземельской золотоносной провинции. *Недра Таймыра*. Вып. 5. СПб.: ВСЕГЕИ, 10-42.
- Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П., Курбатов И.И., Гавриш А.В., Проскурнина М.А. (2021) Центрально-Арктический золотосодержащий медно-молибден-порфировый пояс. *Региональная геология и металлогения*, **85**, 31-49.
- Проскурнина М.А., Проскурнин В.Ф., Ремизов Д.Н., Ларионов А.Н. (2019) Кольцевые интрузивы Беспамятинского ареала: проявления шошонит-латитового магматизма на Северном Таймыре. *Регион. геол. и металлогения*, **79**, 5-22.
- Урванцев Н.Н. (1949) Таймырская складчатая зона. *Бюлл. Норильского комбината*, 4-12.
- Augland L.E., Ryabov V.V., Vernikovskiy V.A., Planke S., Polozov A.G., Callegaro S., Jerram D.A., Svensen H.H. (2019) The main pulse of the Siberian Traps expanded in size and composition. *Sci. Rep.*, **9**(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54023-2>
- Ballard J.R., Palin J.M., Campbell I.H. (2002) Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **144**, 347-364
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type. *J. Geochem. Explor.*, **76**(1), 45-69. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00204-2)
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Bromiley G.D. (2021) Do concentrations of Mn, Eu and Ce in apatite reliably record oxygen fugacity in magmas? *Lithos*, **384-385**, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105900>
- Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. (2012) Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from C. Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization. *Resour. Geol.*, **62**, 63-83.
- Cassini V., Moyon J.-F., Cellier G., de Freitas B., Juliani C., Laurent O. (2022) Towards the fertility trend: Unraveling the economic potential of igneous suites through whole-rock and zircon geochemistry (example from the Tapajós mineral Province, Northern Brazil). *Ore Geol. Rev.*, **142**, 104643.
- Cooke D.R., Agnew P., Hollings P., Baker M., Chang Z., Wilkinson J.J., White N.C., Zhang L., Thompson J., Gemmell J.B., Fox N., Chen H., Wilkinson C.C. (2017) Porphyry Indicator Minerals (PIMS) and Porphyry Vectoring and Fertility Tools (PVFTS) – Indicators of Mineralization Styles and Records of Hypogene Geochemical Dispersion Halos. *Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 457-470.
- Ershova V.B., Anfinson O., Prokopyev A.V., Khudoley A.K., Stockli D.F., Faleide J.I., Gaina C., Malyshev N.A. (2018) Detrital zircon (U-Th)/He ages from Paleozoic strata of the Severnaya Zemlya Archipelago: Deciphering multiple episodes of Paleozoic tectonic evolution within the Russian High Arctic. *J. Geodynam.*, **119**, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.007>
- Ershova V.B., Prokopyev A.V., Khudoley A.K., Andersen T., Kullerud K., Kolchanov D.A. (2020) U-Pb age and Hf isotope geochemistry of detrital zircons from cambrian sandstones of the severnaya Zemlya archipelago and Northern Taimyr (Russian high arctic). *Minerals*, **10**(1), 36. <https://doi.org/10.3390/min10010036>
- Ershova V.B., Prokopyev A.V., Khudoley A.K., Proskurnin V.F., Andersen T., Kullerud K., Stepunina M.A., Kolchanov D.A. (2017) New U-Pb isotopic data for detrital zircons from metasedimentary sequences of north-western Taimyr. *Dokl. Earth Sci.*, **474**, 613-616. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17060022>
- Ershova V.B., Prokopyev A.V., Khudoley A.K., Sobolev N.N., Petrov E.O. (2015a) Detrital zircon ages and provenance of the Upper Paleozoic successions of Kotel'ny Island (New Siberian Islands archipelago). *Lithosphere*, **7**(1), 40-45. <https://doi.org/10.1130/L387.1>
- Ershova V.B., Prokopyev A.V., Nikishin V.A., Khudoley A.K., Malyshev N.A., Nikishin A.M. (2015b) New data on Upper Carboniferous-Lower Permian deposits of Bol'shevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago. *Polar Res.*, **34**, 1-8. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.24558>
- Harlov D.E. (2015) Apatite: A fingerprint for metasomatic processes. *Elements*, **11**(3), 171-176. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.3.171>
- Hedenquist J.W. (2014) Variable Characteristics of Ore Deposits in the Epithermal Environment: Causes, and Exploration Implications. *Acta Geol. Sinica*, **88**(s2), 736-737.
- Hoskin P.W.O. (2005) Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 637-648.
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composi-

- tion of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.*, **53**(1), 27-62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Imai A. (2004) Variation of Cl and SO₃ contents of microphenocrystic apatite in intermediate to silicic igneous rocks of Cenozoic Japanese island arcs: Implications for porphyry Cu metallogenesis in the Western Pacific Island arcs. *Resour. Geol.*, **54**, 357-372.
- Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., O'Sullivan P., Ershova V.B., Proskurnin V.F., Tchkova M.I., Rogov M.A., Kyser T.K., Malyshev S.V., Schneider G.V. (2018) Late Paleozoic – Mesozoic tectonic evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and adjoining Yenisey-Khatanga Depression. *J. Geodynam.*, **119**, 221-241. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.002>
- Kong D.X. (2022) Tracing the effects of fO₂, pressure and H₂O on the ore-forming magmas: Perspective from zircon REE composition. *J. Asian Earth Sci.*, **237**, 105354. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2022.105354>
- Konopelko D., Seltnann R., Dolgoplova A., Safonova I., Glorie S., De Grave J., Sun M. (2021) Adakite-like granitoids of Songkultau: A relic of juvenile Cambrian arc in Kyrgyz Tien Shan. *Geosci. Front.*, **12**, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.006>
- Kurapov M.Y., Ershova V.B., Khudoley A.K., Luchitskaya M.V., Makariev A.A., Makarieva E.M., Vishnevskaya I.A. (2020a) Late Palaeozoic magmatism of Northern Taimyr: New insights into the tectonic evolution of the Russian High Arctic. *Int. Geol. Rev.*, (9), 1-23. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1818300>
- Kurapov M.Y., Ershova V.B., Khudoley A.K., Makariev A.A., Makarieva E.M. (2020b) The first evidence of Late Ordovician magmatism of the October Revolution Island (Severnaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic): Geochronology, geochemistry and geodynamic settings. *Norweg. J. Geol.*, **100**(1). <https://doi.org/10.17850/njg100-3-4>
- Loader M.A., Nathwani Ch.L., Wilkinson J.J., Armstrong R.N. (2022) Controls on the magnitude of Ce anomalies in zircon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **328**, 242-257. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.03.024>
- Loader M.A., Wilkinson J.J., Armstrong R.N. (2017) The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **472**, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.010>
- Lorenz H., Gee D.G., Whitehouse M.J. (2007) New geochronological data on Palaeozoic igneous activity and deformation in the Severnaya Zemlya Archipelago, Russia, and implications for the development of the Eurasian Arctic margin. *Geol. Mag.*, **144**(1), 105-125. <https://doi.org/10.1017/S001675680600272X>
- Lorenz H., Männik P., Gee D.G., Proskurnin V.F. (2008) Geology of the Severnaya Zemlya Archipelago and the North Kara Terrane in the Russian high Arctic. *Int. J. Earth Sci.*, **97**(3), 519-547. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0182-2>
- Loucks R.R., Fiorentini M.L., Henríquez G.J. (2020) New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. *J. Petrol.*, **61**(3), egaa034.
- Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., McCuaig T.C., Evans N.J., Yang Z.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. (2016) Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. *Soc. Econom. Geol. Spec. Publ.*, **19**, 329-347.
- Mao M., Rukhlov A.S., Rowins S.M., Spence J., Coogan L.A. (2016) Apatite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration. *Econom. Geol.*, **111**, 1187-1222. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1187>
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Y., Bogolepova O.K., Gubanov A.P. (2005) Paleozoic history of the Kara microcontinent and its relation to Siberia and Baltica: Paleomagnetism, paleogeography and tectonics. *Tectonophysics*, **398**(3-4), 225-243. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.008>
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y. (2015) Arctida between Rodinia and Pangea. *Precamb. Res.*, **259**, 114-129. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.013>
- Miles A.J., Graham C.M., Hawkesworth C.J., Gillespie M.R., Hinton R.W., Bromiley G.D. (2014) Apatite: A new redox proxy for silicic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **132**, 101-119.
- Müntener O., Kelemen P.B., Grove T.L. (2001) The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **141**, 643-658. <https://doi.org/10.1007/s004100100266>
- Nathwani C.L., Loader M.A., Wilkinson J.J., Buret Y., Sievwright R.H., Hollings P. (2020) Multi-stage arc magma evolution recorded by apatite in volcanic rocks. *Geology*, **48**(4), 323-327. <https://doi.org/10.1130/G46998.1>
- Pan L.C., Hu R.Z., Bi X.W., Wang Y., Yan J. (2020) Evaluating magmatic fertility of Paleo-Tethyan granitoids in eastern Tibet using apatite chemical composition and Nd isotope. *Ore Geol. Rev.*, **127**, 103757.
- Pan L.C., Hu R.Z., Wang X.S., Bi X.W., Zhu J.J., Li C. (2016) Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region, SW China. *Lithos*, **254**, 118-130.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, **25**, 956-983. <https://doi.org/10.2113/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pease V.L., Kuzmichev A.B., Danukalova M.K. (2014) The new Siberian Islands and evidence for the continuation of the Uralides, Arctic Russia. *J. Geol. Soc.*, **172**, 1-4. <https://doi.org/10.1144/jgs2014-064>
- Pease V.L., Scott R.A. (2009) Crustal affinities in the Arctic Uralides, northern Russia: Significance of detrital zircon ages from Neoproterozoic and Palaeozoic sediments in Novaya Zemlya and Taimyr. *J. Geol. Soc.*, **166**(3), 517-527. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-093>
- Petrov O.V., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Shatov V.V., Seltnann R., Dolgoplova A.V., Alenicheva A.A., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Leontev V.I., Belyatsky B.V., Rodionov N.V., Sergeev S.A. (2021) Porphyry indicator zircons (PIZ) and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East). *Ore Geol. Rev.*, **139**, 104491.
- Pizarro H., Campos E., Bouzari F., Rousse S., Bissig T., Gregoire M., Riquelme R. (2020) Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry cop-

- per deposits. *Ore Geol. Rev.*, **126**, 1-18.
- Priyatkinina N., Collins W.J., Khudoley A.K., Zastrozhnov D.A., Ershova V. B., Chamberlain K., Shatsillo A., Proskurnin V.F. (2017) The Proterozoic evolution of northern Siberian Craton margin: A comparison of U–Pb–Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform. *Int. Geol. Rev.*, **13**(59), 1632-1656.
- Richards J.P. (2011) High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits: Just add water. *Econom. Geol. Bull. Soc. Econom. Geol.*, **106**, 1075-1081. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.7.1075>
- Richards J., Kerrich R. (2007) Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Econom. Geol.*, **102**(4), 537-576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Seedorff E., Dilles J.H., Proffett Jr.J.M., Einaudi M.T., Zurcher L., Stavast W.J.A., Johnson D.A., Barton M.D. (2005) Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Econom. Geol.*, **100**, 251-298.
- Sillitoe R.H. (2014) Geological Criteria for Porphyry Copper Exploration. *Acta Geol. Sinica*, **88**(supp. 2), 597-598.
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Econom. Geol.*, **105**, 3-41.
- Stokes T.N., Bromiley G.D., Potts N.J., Saunders K.E., Miles A.J., EIMF (2019) The effect of melt composition and oxygen fugacity on manganese partitioning between apatite and silicate melt. *Chem. Geol.*, **506**, 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.015>
- Sun S.J., Yang X.Y., Wang G.J., Sun W.D., Zhang H., Li C.Y., Ding X. (2019) In situ elemental and Sr-O isotopic studies on apatite from the Xu-Huai intrusion at the southern margin of the North China Craton: Implications for petrogenesis and metallogeny. *Chem. Geol.*, **510**, 200-214.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes, in *Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.2113/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun W., Huang R., Li H., Hu Y., Zhang C., Sun S., Zhang L., Ding X., Li C., Zartman R.E., Ling M. (2015) Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geol. Rev.*, **65**(1), 97-131.
- Vernikovskiy V.A., Pease V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. (2003). First report of early Triassic A-type granite and syenite intrusions from Taimyr: Product of the northern Eurasian superplume? *Lithos*, **66**(1-2), 23-36. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00192-5)
- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Pease V.L., Gee D.G. (2005) Neoproterozoic Orogeny along the margins of Siberia. *Geol. Soc. Lond. Mem.*, **30**, 233-248. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.18>
- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Y., Proskurnina M.A., Kadilnikov P., Laktionov A.N., Travin A.V. (2020). Late paleozoic–early mesozoic granite magmatism on the arctic margin of the siberian craton during the kara-siberia oblique collision and plume events. *Minerals*, **10**(6), 571. <https://doi.org/10.3390/min10060571>
- Wang H., Cai K., Sun M., Xia X.-P., Lai C.-K., Li P., Wan B., Zhang Zh. (2022) Apatite as a magma redox indicator and its application in metallogenic research. *Lithos*, **422-423**, 106749. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106749>
- Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. (2006) Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **151**, 413-433.
- Zafar T., Rehman H.U., Mahar M.A., Alam M., Oyebamiji A., Rehman S.U., Leng C.B. (2020) A critical review on petrogenetic, metallogenic and geodynamic implications of granitic rocks exposed in north and east China: New insights from apatite geochemistry. *J. Geodynam.*, **136**, 101723.
- Zhong S., Feng C., Seltmann R., Li D., Qu H. (2018) Can magmatic zircon be distinguished from hydrothermal zircon by trace element composition? The effect of mineral inclusions on zircon trace element composition. *Lithos*, **314-315**, 646-657.

REFERENCES

- Augland L.E., Ryabov V.V., Vernikovskiy V.A., Planke S., Polozov A.G., Callegaro S., Jerram D.A., Svensen H.H. (2019) The main pulse of the Siberian Traps expanded in size and composition. *Sci. Rep.*, **9**(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54023-2>
- Ballard J.R., Palin J.M., Campbell I.H. (2002) Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **144**, 347-364.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type. *J. Geochem. Explor.*, **76**(1), 45-69. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00204-2)
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Bromiley G.D. (2021) Do concentrations of Mn, Eu and Ce in apatite reliably record oxygen fugacity in magmas? *Lithos*, **384-385**, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105900>
- Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. (2012) Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from C. Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization. *Resour. Geol.*, **62**, 63-83.
- Cassini V., Moyen J.-F., Cellier G., de Freitas B., Juliani C., Laurent O. (2022) Towards the fertility trend: Unraveling the economic potential of igneous suites through whole-rock and zircon geochemistry (example from the Tapajós mineral Province, Northern Brazil). *Ore Geol. Rev.*, **142**, 104643.
- Cooke D.R., Agnew P., Hollings P., Baker M., Chang Z., Wilkinson J.J., White N.C., Zhang L., Thompson J., Gemmell J.B., Fox N., Chen H., Wilkinson C.C. (2017) Porphyry Indicator Minerals (PIMS) and Porphyry Vectoring and Fertility Tools (PVFTS) – Indicators of Mineralization Styles and Recorders of Hypogene Geochemical Dispersion Halos. *Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 457-470.
- Ershova V.B., Anfinson O., Prokopiev A.V., Khudoley A.K., Stockli D.F., Faleide J.I., Gaina C., Malyshchev N.A. (2018) Detrital zircon (U-Th)/He ages from

- Paleozoic strata of the Severnaya Zemlya Archipelago: Deciphering multiple episodes of Paleozoic tectonic evolution within the Russian High Arctic. *J. Geodynam.*, **119**, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.007>
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Khudoley A.K., Andersen T., Kullerud K., Kolchanov D.A. (2020) U-Pb age and Hf isotope geochemistry of detrital zircons from cambrian sandstones of the severnaya Zemlya archipelago and Northern Taimyr (Russian high arctic). *Minerals*, **10**(1), 36. <https://doi.org/10.3390/min10010036>
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Khudoley A.K., Proskurnin V.F., Andersen T., Kullerud K., Stepunina M.A., Kolchanov D.A. (2017) New U-Pb isotopic data for detrital zircons from metasedimentary sequences of northwestern Taimyr. *Dokl. Earth Sci.*, **474**, 613-616. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17060022>
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Khudoley A.K., Sobolev N.N., Petrov E.O. (2015a) Detrital zircon ages and provenance of the Upper Paleozoic successions of Kotel'ny Island (New Siberian Islands archipelago). *Lithosphere*, **7**(1), 40-45. <https://doi.org/10.1130/L387.1>
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Nikishin V.A., Khudoley A.K., Malyshev N.A., Nikishin A.M. (2015b) New data on Upper Carboniferous-Lower Permian deposits of Bol'shevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago. *Polar Res.*, **34**, 1-8. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.24558>
- Harlov D.E. (2015) Apatite: A fingerprint for metasomatic processes. *Elements*, **11**(3), 171-176. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.3.171>
- Hedenquist J.W. (2014) Variable Characteristics of Ore Deposits in the Epithermal Environment: Causes, and Exploration Implications. *Acta Geol. Sinica*, **88**(s2), 736-737.
- Hoskin P.W.O. (2005) Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 637-648.
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.*, **53**(1), 27-62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Imai A. (2004) Variation of Cl and SO₃ contents of microphenocrystic apatite in intermediate to silicic igneous rocks of Cenozoic Japanese island arcs: Implications for porphyry Cu metallogenesis in the Western Pacific Island arcs. *Resour. Geol.*, **54**, 357-372.
- Kachurina N.V., Makar'ev A.A., Makar'eva E.M., Gavrish A.V., Orlov V.V., Dymov V.A. (2013) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Sheet T-45-48 – Cape Chelyuskin. Explanatory letter. St.Petersburg, VSEGEI Mapping Factory, 562 p. (In Russ.)
- Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., O'Sullivan P., Ershova V.B., Proskurnin V.F., Tchkova M.I., Rogov M.A., Kyser T.K., Malyshev S.V., Schneider G.V. (2018) Late Paleozoic – Mesozoic tectonic evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and adjoining Yenisey-Khatanga Depression. *J. Geodynam.*, **119**, 221-241. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.002>
- Kong D.X. (2022) Tracing the effects of fO₂, pressure and H₂O on the ore-forming magmas: Perspective from zircon REE composition. *J. Asian Earth Sci.*, **237**, 105354. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2022.105354>
- Konopelko D., Seltmann R., Dolgoplova A., Safonova I., Glorie S., De Grave J., Sun M. (2021) Adakite-like granitoids of Songkultau: A relic of juvenile Cambrian arc in Kyrgyz Tien Shan. *Geosci. Front.*, **12**, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.006>
- Kurapov M.Y., Ershova V.B., Khudoley A.K., Luchitskaya M.V., Makarieva E.M., Vishnevskaya I.A. (2020a) Late Palaeozoic magmatism of Northern Taimyr: New insights into the tectonic evolution of the Russian High Arctic. *Int. Geol. Rev.*, (9), 1-23. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1818300>
- Kurapov M.Y., Ershova V.B., Khudoley A.K., Makarieva A.A., Makarieva E.M. (2020b) The first evidence of Late Ordovician magmatism of the October Revolution Island (Severnaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic): Geochronology, geochemistry and geodynamic settings. *Norweg. J. Geol.*, **100**(1). <https://doi.org/10.17850/njg100-3-4>
- Kurapov M.Y., Ershova V.B., Makarieva A.A., Makarieva E.V., Khudoley A.K., Luchitskaya M.V., Prokopiev A.V. (2018) Carboniferous granitoid magmatism of Northern Taimyr: Results of isotopic-geochemical study and geodynamic interpretation. *Geotectonics*, **52**(2), 225-239. <https://doi.org/10.1134/S001685211802004>
- Loader M.A., Nathwani Ch.L., Wilkinson J.J., Armstrong R.N. (2022) Controls on the magnitude of Ce anomalies in zircon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **328**, 242-257. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.03.024>
- Loader M.A., Wilkinson J.J., Armstrong R.N. (2017) The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **472**, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.010>
- Lorenz H., Gee D.G., Whitehouse M.J. (2007) New geochronological data on Palaeozoic igneous activity and deformation in the Severnaya Zemlya Archipelago, Russia, and implications for the development of the Eurasian Arctic margin. *Geol. Mag.*, **144**(1), 105-125. <https://doi.org/10.1017/S001675680600272X>
- Lorenz H., Männik P., Gee D.G., Proskurnin V.F. (2008) Geology of the Severnaya Zemlya Archipelago and the North Kara Terrane in the Russian high Arctic. *Int. J. Earth Sci.*, **97**(3), 519-547. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0182-2>
- Loucks R.R., Fiorentini M.L., Henríquez G.J. (2020) New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. *J. Petrol.*, **61**(3), ega034.
- Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., McCuaig T.C., Evans N.J., Yang Z.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. (2016) Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. *Soc. Econom. Geol. Spec. Publ.*, **19**, 329-347.
- Mao M., Rukhlov A.S., Rowins S.M., Spence J., Cooogan L.A. (2016) Apatite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration. *Econom. Geol.*, **111**, 1187-1222. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1187>
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Y., Bogolepova O.K., Gubanov A.P. (2005) Paleozoic history of the Kara microcontinent and its relation to Siberia and Baltica: Paleomagnetism, paleogeography and tectonics. *Tectonophysics*, **398**(3-4), 225-243. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.008>

- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y. (2015) Arctida between Rodinia and Pangea. *Precamb. Res.*, **259**, 114-129. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.013>
- Miles A.J., Graham C.M., Hawkesworth C.J., Gillespie M.R., Hinton R.W., Bromiley G.D. (2014) Apatite: A new redox proxy for silicic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **132**, 101-119.
- Müntener O., Kelemen P.B., Grove T.L. (2001) The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **141**, 643-658. <https://doi.org/10.1007/s004100100266>
- Nathwani C.L., Loader M.A., Wilkinson J.J., Buret Y., Sievwright R.H., Hollings P. (2020) Multi-stage arc magma evolution recorded by apatite in volcanic rocks. *Geology*, **48**(4), 323-327. <https://doi.org/10.1130/G46998.1>
- Pan L.C., Hu R.Z., Bi X.W., Wang Y., Yan J. (2020) Evaluating magmatic fertility of Paleo-Tethyan granitoids in eastern Tibet using apatite chemical composition and Nd isotope. *Ore Geol. Rev.*, **127**, 103757.
- Pan L.C., Hu R.Z., Wang X.S., Bi X.W., Zhu J.J., Li C. (2016) Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region, SW China. *Lithos*, **254**, 118-130.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, **25**, 956-983. <https://doi.org/10.2113/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pease V.L., Kuzmichev A.B., Danukalova M.K. (2014) The new Siberian Islands and evidence for the continuation of the Uralides, Arctic Russia. *J. Geol. Soc.*, **172**, 1-4. <https://doi.org/10.1144/jgs2014-064>
- Pease V.L., Scott R.A. (2009) Crustal affinities in the Arctic Uralides, northern Russia: Significance of detrital zircon ages from Neoproterozoic and Palaeozoic sediments in Novaya Zemlya and Taimyr. *J. Geol. Soc.*, **166**(3), 517-527. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-093>
- Petrov O.V., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Shatov V.V., Seltmann R., Dolgoplova A.V., Alenicheva A.A., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Leontev V.I., Belyatsky B.V., Rodionov N.V., Sergeev S.A. (2021) Porphyry indicator zircons (PIZ) and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East). *Ore Geol. Rev.*, **139**, 104491.
- Pizarro H., Campos E., Bouzari F., Rousse S., Bissig T., Gregoire M., Riquelme R. (2020) Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits. *Ore Geol. Rev.*, **126**, 1-18.
- Pogrebetskii Yu.E. (1971) Paleotectonic analysis of the Taimyr fold system. Moscow, Nedra Publ., 284 p. (In Russ.)
- Priyatkin N., Collins W.J., Khudoley A.K., Zastrozhnov D.A., Ershova V.B., Chamberlain K., Shatsillo A., Proskurnin V.F. (2017) The Proterozoic evolution of northern Siberian Craton margin: A comparison of U-Pb-Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform. *Int. Geol. Rev.*, **13**(59), 1632-1656.
- Proskurnin V.F., Listkov A.G., Gavrish A.V., Vanyunin N.V. (2002) Metallogenic analysis and prospects for industrial development of the Taimyr-Severozemelskaya gold-bearing province. *Nedra Taimyra. Iss. 5*. St.Petersburg, VSEGEI Publishing House, 10-42. (In Russ.)
- Proskurnin V.F., Petrov O.V., Romanov A.P., Kurbatov I.I., Gavrish A.V., Proskurnina M.A. (2021) Central Arctic gold-bearing copper-molybdenum-porphyry belt. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*, **85**, 31-49. (In Russ.)
- Proskurnina M.A., Proskurnin V.F., Remizov D.N., Lariov A.N. (2019) Ring intrusions of the Bespamyatnaya areal: Manifestations of shoshonite-latitude magmatism in Northern Taimyr. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*, **79**, 5-22. (In Russ.)
- Richards J.P. (2011) High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits: Just add water. *Econom. Geol. Bull. Soc. Econom. Geol.*, **106**, 1075-1081. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.7.1075>
- Richards J., Kerrich R. (2007) Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Econom. Geol.*, **102**(4), 537-576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Seedorff E., Dilles J.H., Proffett Jr.J.M., Einaudi M.T., Zurcher L., Stavast W.J.A., Johnson D.A., Barton M.D. (2005) Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Econom. Geol.*, **100**, 251-298.
- Sillitoe R.H. (2014) Geological Criteria for Porphyry Copper Exploration. *Acta Geol. Sinica*, **88**(suppl. 2), 597-598.
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Econom. Geol.*, **105**, 3-41.
- Stokes T.N., Bromiley G.D., Potts N.J., Saunders K.E., Miles A.J., EIMF (2019) The effect of melt composition and oxygen fugacity on manganese partitioning between apatite and silicate melt. *Chem. Geol.*, **506**, 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.015>
- Sun S.J., Yang X.Y., Wang G.J., Sun W.D., Zhang H., Li C.Y., Ding X. (2019) In situ elemental and Sr-O isotopic studies on apatite from the Xu-Huai intrusion at the southern margin of the North China Craton: Implications for petrogenesis and metallogeny. *Chem. Geol.*, **510**, 200-214.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes, in Magmatism in the Ocean Basins. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.2113/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun W., Huang R., Li H., Hu Y., Zhang C., Sun S., Zhang L., Ding X., Li C., Zartman R.E., Ling M. (2015) Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geol. Rev.*, **65**(1), 97-131.
- Urvantsev N.N. (1949) Taimyr fold zone. *Beulletin' Noril'skogo Kombinata*, 4-12. (In Russ.)
- Vernikovskii V.A. (1996) Geodynamic evolution of the Taimyr folded region. Novosibirsk, SO RAS NIC OIGGM Publ., 202 p. (In Russ.)
- Vernikovskii V.A., Sal'nikova E., Kotov A.B., Ponomarchuk V.A., Kovach V.P., Travin A.V., Yakovleva S.Z., Berezina N.G. (1998) Age of post-collisional granitoids of Northern Taimyr: U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, and Ar-Ar data. *Dokl. Akad. Nauk*, **363**(3), 375-378.
- Vernikovskiy V.A., Pease V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. (2003) First report of early Triassic A-type granite and syenite intrusions from Taimyr: Product of the northern Eurasian superplume? *Lithos*, **66**(1-2), 23-36. <https://doi.org/10.1016/>

S0024-4937(02)00192-5

- Vernikovsky V.A., Vernikovskaya A.E., Pease V.L., Gee D.G. (2005) Neoproterozoic Orogeny along the margins of Siberia. *Geol. Soc. Lond. Mem.*, **30**, 233-248. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.18>
- Vernikovsky V.A., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Y., Proskurnina M.A., Kadilnikov P., Larrisonov A.N., Travin A.V. (2020) Late paleozoic–early mesozoic granite magmatism on the arctic margin of the siberian craton during the kara-siberia oblique collision and plume events. *Minerals*, **10**(6), 571. <https://doi.org/10.3390/min10060571>
- Wang H., Cai K., Sun M., Xia X.-P., Lai C.-K., Li P., Wan B., Zhang Zh. (2022) Apatite as a magma redox indicator and its application in metallogenic research. *Lithos*, **422-423**, 106749. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106749>
- Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. (2006) Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **151**, 413-433.
- Zafar T., Rehman H.U., Mahar M.A., Alam M., Oyebamiji A., Rehman S.U., Leng C.B. (2020) A critical review on petrogenetic, metallogenic and geodynamic implications of granitic rocks exposed in north and east China: New insights from apatite geochemistry. *J. Geodynam.*, **136**, 101723.
- Zaitseva M.V., Pupyshev A.A., Shchapova Ju.V., Votyakov S.L. (2016) Dating of zircons using NexION 300S quadrupole mass spectrometer with inductively coupled plasma and NWR 213 attachment for laser ablation. *Analitika i Kontrol'*, **20**(4), 294-306. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>
- Zhong S., Feng C., Seltmann R., Li D., Qu H. (2018) Can magmatic zircon be distinguished from hydrothermal zircon by trace element composition? The effect of mineral inclusions on zircon trace element composition. *Lithos*, **314-315**, 646-657.
- Zonenshain L.P. (1990) Tectonics of lithospheric plates in the territory of the USSR. Pt II. Moscow, Nedra Publ., 344 p. (In Russ.)