

(U,Th)-Не возраст пирита из золоторудного проявления Карьерное (фланг Новогодненского рудного поля, Полярный Урал)*

Е. С. Иванова¹, И. Д. Соболев², И. В. Викентьев², М. О. Аносова³,
М. М. Подольская³, Е. Э. Тюкова^{2,4}, Б. М. Гороховский¹, О. В. Якубович^{1,5}

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

³ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19

⁴ Научный геоинформационный центр РАН,
Российская Федерация, 119019, Москва, ул. Новый Арбат, 11

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Иванова, Е. С., Соболев, И. Д., Викентьев, И. В., Аносова, М. О., Подольская, М. М., Тюкова, Е. Э., Гороховский, Б. М., Якубович, О. В. (2024). (U,Th)-Не возраст пирита из золоторудного проявления Карьерное (фланг Новогодненского рудного поля, Полярный Урал). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (1), 142–165.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.108>

В отличие от освоенных районов Среднего и Южного Урала труднодоступные и эродированные северные территории Уральской складчатой системы остаются малоизученными, что обуславливает большое количество неоцененных золоторудных проявлений и наличие лишь единичных промышленных объектов. Золоторудное проявление Карьерное расположено среди среднепалеозойских вулканогенно-обломочных пород Тоупугол-Ханмейшорского золоторудного района на восточном склоне Полярного Урала. В вулканитах устанавливаются признаки ранней колчеданоподобной стратиформной минерализации, которая сетется жилами и дайками собского (D_{1-2}) и мусюрского комплексов (S_{1-2}). Для определения времени формирования сульфидной минерализации рудопроявления Карьерное, расположенного на фланге Новогодненского рудного поля, был применен новый подход — (U,Th)-Не датирование пирита. (U,Th)-Не методом по пириту ($n = 7$) получен широкий диапазон возрастов от 402 до 425 млн лет. Полученные данные в совокупности с петрографическими и минералого-геохимическими наблюдениями позволяют предположить наличие как минимум двух этапов минерализации пород: венлокско-лудловский колчеданный — 424 ± 6 млн лет и более поздний — раннедевонский 402 ± 6 млн лет, вероятно, связанный с внедрением в породы тоупугольской толщи гранитоидов собского комплекса. Полученные значения возраста сульфидной минерализации рудопроявления Карьерное существенно древнее значений возраста, установленных для крупных золоторудных объектов района: месторождений Петро-

* Оптическая и сканирующая электронная микроскопия пирита, его (U,Th)-Не датирование (масс-спектрометрические измерения, расчеты) выполнены при финансовой поддержке проекта РФФ № 22-77-10088. Работа М. О. Аносовой (химический анализ) выполнялась в рамках госзадания ГЕОХИ РАН.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

павловское и Новогоднее-Монто (~382 млн лет). Учитывая положение рудопроявления Карьерное на фланге Новогодненского рудного поля, можно предположить, что рассеянная и послойная сульфидная вкрапленность вулканитов тоупугольской толщи могла выступать в качестве одного из источников серы и рудных металлов для более поздних этапов сульфидной минерализации Тоупугол-Ханмейшорского района.

Ключевые слова: геохронология, пирит, (U,Th)-He, Полярный Урал, колчеданная и скарново-порфировая минерализация, золоторудные месторождения, силур, девон, островная дуга.

1. Введение

Тоупугол-Ханмейшорский рудный район Полярного Урала относится к числу сравнительно малоизученных регионов. В настоящее время в его пределах установлено два крупных месторождения — золото-железо-скарновое Новогоднее-Монто (7 т Au) и золото-порфировое Петропавловское (26 т Au), а также ряд рудопроявлений (Карьерное, Амфиболитовое, Караченцева и др.) (Мансуров, 2009; Soloviev et al. 2012; Викентьев и др., 2017). Регион считается перспективным на обнаружение новых золоторудных объектов (Трофимов и др., 2006). Для их эффективного поиска требуется проведение геодинамических и рудно-магматических реконструкций. Для разработки соответствующих моделей, а также для развития представлений об эволюции палеозойских островодужных систем, к которым относится объект исследования, необходимы надежные геохронологические данные.

Определение возраста рудной минерализации является сложной изотопно-геохимической задачей. Для прямого датирования сульфидов часто используют Re-Os метод (Stein et al., 2000; Hnatyshin et al., 2020). Однако анализ Re-Os системы зачастую не позволяет получить надежных возрастных оценок в силу изотопной неоднородности захваченного Os или нарушения данной изотопной системы под влиянием наложенных процессов. Сложность оценки поведения Os при перекристаллизации сульфидов в условиях вторичных изменений затрудняет выделение этапов формирования рудной минерализации. В ряде случаев для прямого датирования сульфидной минерализации применяются Ar-Ar, Rb-Sr и Sm-Nd методы (Smith et al., 2001; Ivanov et al., 2015; Christensen et al., 1995; Yang and Zhou 2002). Основным ограничением применения этих систем является низкое содержание материнских изотопов в сульфидных минералах. А также не всегда можно доказать, что минеральные включения, являющиеся основными концентраторами изотопов, генетически связаны с сульфидной минерализацией. Поэтому часто датирование рудных парагенезисов проводится ^{40}Ar - ^{39}Ar методом по K-содержащим минералам (серцит, полевой шпат и др.).

Пирит является одним из самых распространенных рудных минералов, который образуется на разных этапах гидротермальной активности (Пшеничный, 1975; Пшеничкин и др., 1976; Бетехтин, 2007; Reich et al., 2013; Викентьев и др., 2016). Недавние исследования показали перспективность использования этого минерала как (U,Th)-He геохронометра (Yakubovich et al., 2019b; Yakubovich et al., 2020; Yakubovich et al., 2021). Таким образом, на основании результатов (U,Th)-He датирования стала возможной оценка возраста процессов кристаллизации рудного вещества.

В настоящей работе мы применили метод (U,Th)-He датирования пирита для определения возраста рудной минерализации в поздневенлокско-лудловских

островодужных вулканогенных породах рудопроявления Карьерное в Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе с целью выявления генетических и временных связей между рудной минерализацией, проявлениями магматизма и флюидно-гидротермальной активности в регионе.

2. Объект исследования

2.1. Геологическая позиция Тоупугол-Ханмейшорского района

Тоупугол-Ханмейшорский золоторудный район расположен в северной части Войкарской зоны на восточном склоне Полярного Урала (рис. 1). Входящая в со-

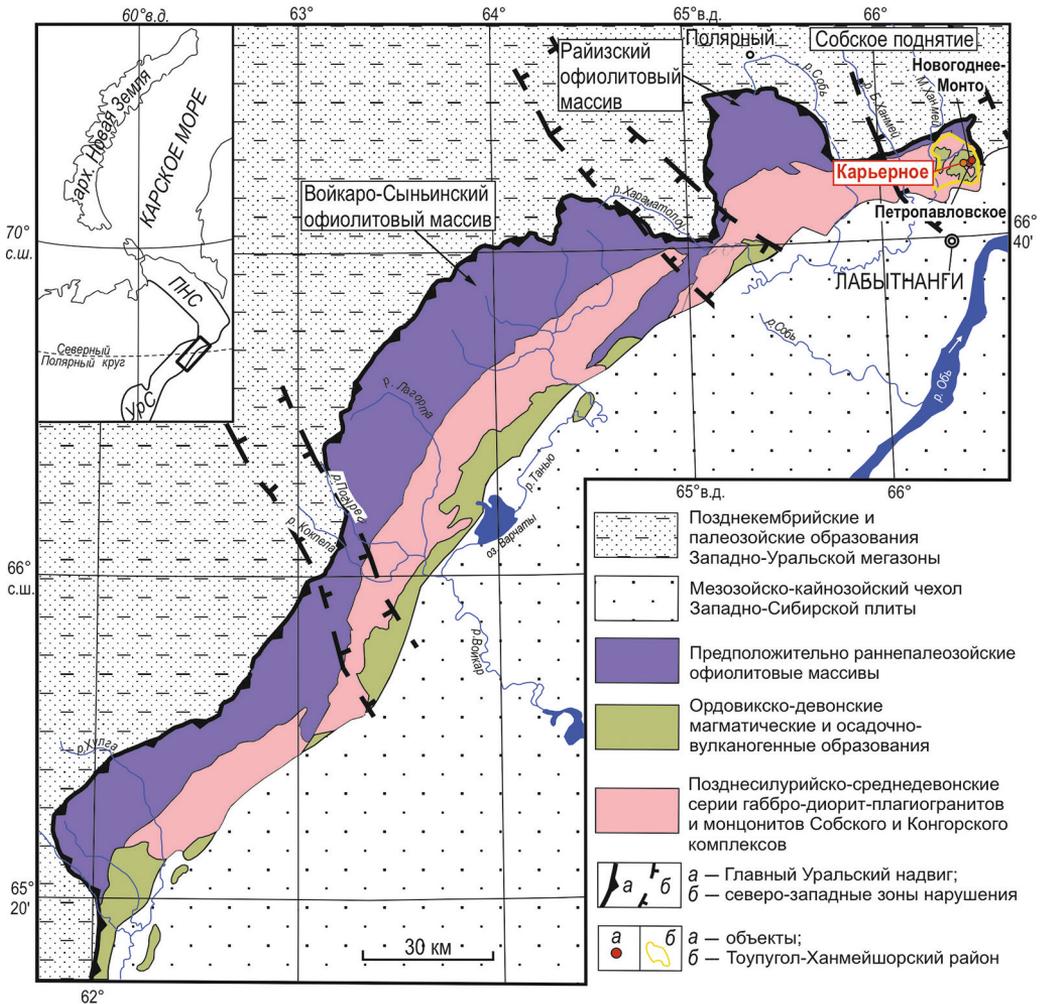


Рис. 1. Геологическая позиция Тоупугол-Ханмейшорского золоторудного района в структурах восточного склона Полярного Урала с использованием данных (Язева и Бочкарев, 1984; Черняев и др., 2005; Соболев и др., 2017). На врезке — положение Войкарской зоны на севере Уральского складчатого пояса (УрС) вблизи его сочленения с Пайхойско-Новоземельским складчатым сооружением (ПНС)

став Полярно-Уральской островодужной системы Войкарская зона простирается в северо-восточном направлении более чем на 250 км в виде узкой полосы шириной 10–40 км. Северо-западная часть Войкарской зоны сложена преимущественно позднеордовикскими океаническими образованиями офиолитовой ассоциации и граничит по Главному Уральскому разлому с палеозойскими-позднепротерозойскими образованиями Западно-Уральской мегазоны. В юго-восточной части зоны преобладают позднеордовикско-среднедевонские островодужные породы Малоуральского вулканоплутонического пояса, перекрытые мощным мезозойско-кайнозойским осадочным чехлом Западно-Сибирской плиты (Язева и Бочкарев, 1984; и др.). Считается, что образование Тоупугол-Ханмейшорского рудного района происходило последовательно в несколько этапов, связанных с эволюцией палеозойской островодужной системы: 1) вулканогенно-осадочный (S_2 - D_1); 2) скарново-порфировый (D_{1-2}); 3) березитовый (D_3) (Викентьев и др., 2017).

2.2. Геологическое строение рудопоявления Карьерное

Рудопоявление Карьерное расположено в двух километрах к юго-западу от золоторудного месторождения Новогоднее-Монто, на южном фланге Новогодненского рудного поля (Черняев и др., 2005; Soloviev et al., 2012). Прогнозные ресурсы золоторудного проявления Карьерное оцениваются в 5 т Au (категория P_2 , Волчков и др., 2008). Вмещающие породы представлены верхневенлокско-лудловскими (Прямоносков и др., 1994; Душин и др., 2014) вулканогенно-осадочными (флишоидами, полимиктовые брекчии с обломками вулканогенных, интрузивных и карбонатных пород) и вулканогенными породами тоупугольской толщи базальт-андезитовой формации (рис. 2). Стратифицированные образования локализованы в кровле ранне-среднедевонского габбро-диорит-плагиигранитного многофазного Собского батолита (Соболев и др., 2018б). Все среднепалеозойские островодужные образования этого района прорваны дайками долеритов, лампрофиров и монцодиорит-порфиров мусюрского комплекса (Волчков и др., 2008), датированных ранним карбоном (Соболев и др., 2020). Участок рудопоявления располагается в пределах зоны интенсивного расланцевания и брекчирования, ограниченной Тоупугольским и Евъеганским разломами (рис. 2). Прослой тонкообломочных вулканогенно-осадочных, терригенных и терригенно-карбонатных пород вмещают стратиформную колчеданоподобную, существенно пиритовую минерализацию. В пределах рудопоявления преобладает послойная вкрапленность пирита стратиформного генезиса, но также встречаются гнезда, тонкие прожилки и неравномерная вкрапленность пирита, образование которых связывают с наложенными процессами. Для такого пирита характерны более высокие концентрации золота (Зылева и др., 2014).

3. Основы (U,Th)-He метода датирования пирита

На протяжении последних десятилетий система (U,Th)-He широко применяется в области низкотемпературной термохронологии (Farley, 2002; Flowers et al. 2022). Последние данные по сохранности гелия в кристаллической структуре самородных металлов, пирита и оксидах железа подтверждают пригодность метода для

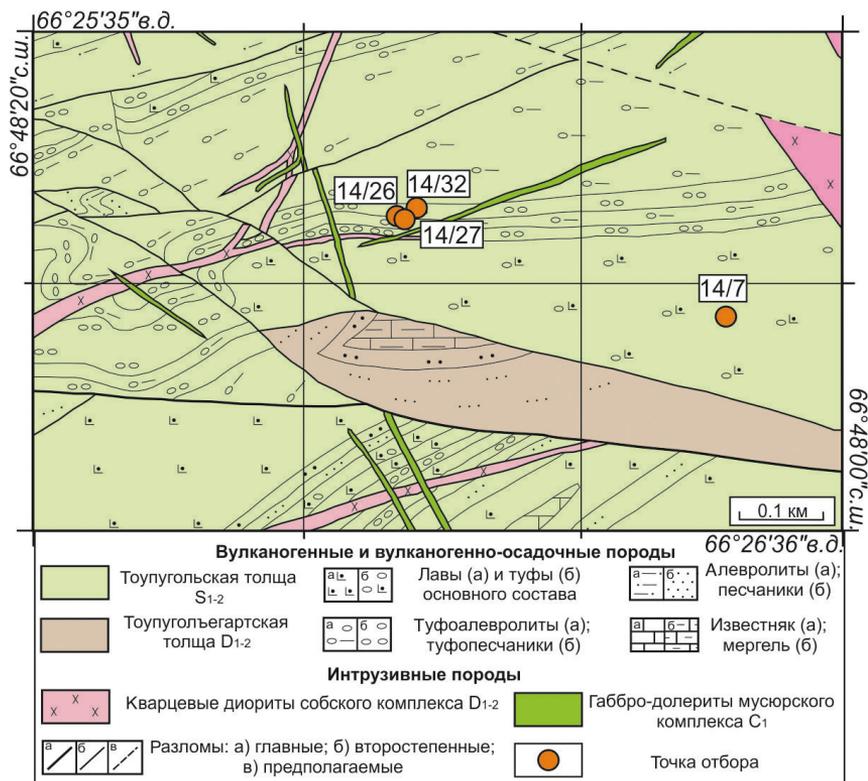


Рис. 2. Схема геологического строения рудопроявления Карьерное с точками отбора проб, составлена с использованием данных (Прямоносов и Степанов, 2004)

решения задач изотопного датирования рудообразующих процессов (Shukolyukov et al., 2012; Farley, 2018; Yakubovich et al., 2019b). Высокая термическая сохранность радиогенного гелия в пирите подтверждается экспериментами по ступенчатому нагреву (Yakubovich et al., 2019b).

Успешное применение (U,Th)-He системы для датирования пирита продемонстрировано на примере колчеданного месторождения (Узельга, Южный Урал) (Yakubovich et al., 2019a) и пирита из околорудных метасоматитов месторождения Новогоднее-Монто, Полярный Урал (Yakubovich et al., 2021).

3.1. Ядерно-физические основы

Источником радиогенного гелия в пирите является альфа-распад изотопов урана ^{235}U , ^{238}U и тория ^{232}Th . В общем виде уравнение накопления радиогенного гелия из урана и тория выглядит следующим образом:

$$\text{He}^4 = 8 \cdot \frac{137.88}{(137.88 + 1)} C_{\text{U}} \cdot (e^{\lambda_{238}t} - 1) + 7 \cdot \frac{1}{(137.88 + 1)} C_{\text{U}} \cdot (e^{\lambda_{235}t} - 1) + 6 \cdot C_{\text{Th}} \cdot (e^{\lambda_{232}t} - 1), \quad (1)$$

где He^4 , C_{U} , C_{Th} — концентрации гелия, урана, тория (атомы); λ_{238} ($1.55125 \times 10^{-10} \text{ г}^{-1}$), λ_{235} ($9.8485 \times 10^{-10} \text{ г}^{-1}$), λ_{232} ($4.94775 \times 10^{-10} \text{ г}^{-1}$) — соответствующие кон-

станты распада. Коэффициенты 8, 7, 6 соответствуют количеству атомов гелия, образующихся при распаде определенного атома, величина 137.88 — современное изотопное отношение ^{238}U к ^{235}U .

Уран в пирите может содержаться в виде минеральных включений микронных размеров (уранинит, апатит, монацит, рутил) и/или в виде относительно однородной примеси (Баранов и Вертепов, 1966; Yakubovich et al., 2019b). Концентрация урана в пирите в среднем колеблется от 0.2 до 11 мкг/г (Melekestseva et al., 2014; Yakubovich et al., 2020 и ссылки в ней).

3.2. Имплантированный и эджектированный гелий

Особенностью (U,Th)-He системы является эффект ядер отдачи (α -recoil). Во время радиоактивного распада материнского изотопа происходит выделение энергии порядка 5–6 МэВ (Farley et al., 1996). В таком случае расстояние, необходимое для полной остановки ядра альфа-частицы в минерале, составляет первые десятки микрон (11–34 мкм) (Zeigler et al., 2010). Таким образом, радиогенный гелий имплантируется в кристаллическую структуру пирита, а накопления гелия в минеральных включениях размером меньше 10 мкм не происходит. Если микронные включения урансодержащих минералов были образованы раньше пирита, то они также не могли накапливать радиогенный гелий. Соответственно, полученный (U,Th)-He возраст отражает время накопления гелия в пирите, то есть время его кристаллизации. Наличие альфа-рекойл эффекта накладывает ограничения на размер зерен, пригодных для (U,Th)-He датирования, а именно зерна менее 20 мкм являются непригодными для датирования, поскольку такие параметры в принципе исключают возможность накопления гелия в связи с вероятностью вылета радиогенного изотопа из зерна в окружающую среду. Оптимальными являются зерна размером не менее 200 мкм, чтобы вкладом этого процесса можно было пренебречь (Farley et al., 1996).

Помимо возможности потери гелия, существует вероятность имплантации альфа-частицы (α -ejection) из окружающего пространства (Farley, 2000). Захваченный гелий может привести к завышенным результатам значения возраста. Решение данной проблемы заключается во введении специальной математической поправки, исходя из размеров зерна и содержания урана, тория во вмещающей породе. Также существует вариант решения вопроса вклада имплантированной и инжектированной компоненты путем абразивного стачивания краевой части зерен (Farley, 2000; Farley, 2002). В большинстве случаев для зерен размером свыше 200 мкм вкладом имплантированной и эджектированной компонент можно пренебречь (Farley et al., 1996).

3.3. Газово-жидкие включения в пирите

Газово-жидкие включения содержат гелий, захваченный минералом вместе с рудообразующим флюидом. Изучение изотопного состава гелия в таких включениях используется для реконструкции источников флюида (Stuart et al., 1995; Kendrick et al., 2001; Burnard and Polya, 2004). Как правило, концентрация гелия в таких включениях не превышает 10^{-8} – 10^{-10} см³/г (Бортников и др., 2000; Luders and Nie-

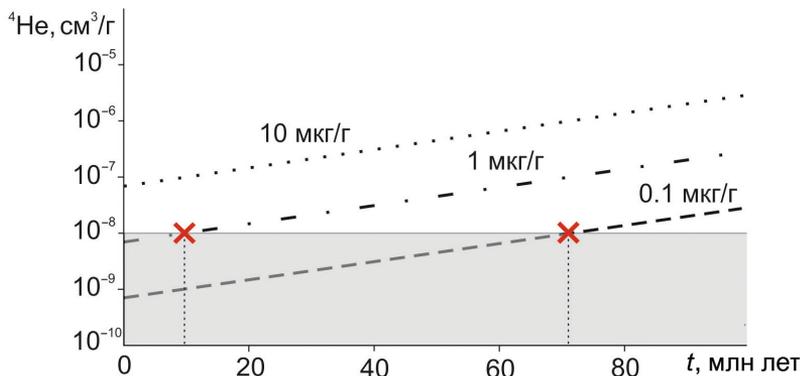


Рис. 3. Зависимость концентрации ^4He от возраста и содержаний урана в пирите, где серым обозначен диапазон концентраций гелия, характерный для флюидных включений, крестиком — пороговые значения возраста, пригодного для датирования, исходя из содержаний урана

dermann, 2010; Yakubovich et al, 2019b). Таким образом, для определения (U,Th)-He возраста подходят зерна пирита, концентрация радиогенного гелия в которых более 10^{-8} см³/г. На рис. 3 приведена зависимость концентрации радиогенного гелия в пирите от возраста и содержания урана в нем. Видно, что для среднего диапазона концентраций урана в пирите возраст минерала, пригодного для датирования, должен быть не менее 10 млн лет.

4. Методика исследования

4.1. Отбор образцов

Образцы 14–7, 14–26, 14–27, 14–32 и 14–40 были получены в 2018 г. в ходе полевых работ отряда ИГЕМ РАН в Тоупугол-Ханмейшорском районе (рис. 2). При отборе образцов авторы старались выбирать первичную стратиформную сульфидную минерализацию из вулканогенно-осадочных пород без явного проявления гидротермальных изменений и обращали внимание на характер распределения сульфидной минерализации вблизи тектонических нарушений и контактов мощных даек. В ходе полевых маршрутов была проведена макроскопическая диагностика и отмечены структурно-текстурные особенности пород, определена размерность их обломочного материала и параметры их залегания. При макроскопической диагностике образцов определялся минеральный состав и текстура породы, особое внимание уделялось степени и характеру наложенных изменений. Отбор представительных образцов в стенках карьера (обр. 14–7, 14–26, 14–27 и 14–32) (рис. 4) производился с соответствующей привязкой по GPS-навигатору. Точка отбора 14–40 находится в стороне ($66^{\circ}37'36''$ с. ш., $66^{\circ}36'06''$ в. д.) от трех прочих пунктов наблюдения и приурочена к участку развития кварц-карбонатных жил в тектонически нарушенной зоне.



Рис. 4. Выходы ритмично-слоистых пачек вулканогенно-осадочных пород рудопроявления Карьерное

4.2. Петрографические исследования

Для определения минерального состава вулканогенно-осадочных пород тоугольской толщи, вмещающих рудную минерализацию рудопроявления Карьерное, использованы методы оптической микроскопии. Изучение прозрачно-полированных шлифов (5 шт.) проводилось в проходящем свете с применением поляризационного микроскопа Leica DM750P в Санкт-Петербургском Горном университете на кафедре минералогии, кристаллографии и петрографии.

4.3. Сканирующая электронная микроскопия

Монофракции пирита для (U,Th)-He датирования выделялись из пяти проб минерализованных пород с использованием разделения в тяжелых жидкостях (CH_3Br) в ИГЕМ РАН (г. Москва). Для выявления формы нахождения урана и тория в пирите было отобрано 25 зерен для микроанализа на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный детектором для энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа AzTec Energy 350 в ресурсном центре «Геомодель», СПбГУ (г. Санкт-Петербург). Параметры измерения следующие: $U = 20$ кВ, $I = 1.7$ нА, рабочее расстояние 10 мм, диаметр пучка 5 мкм, длительность накопления 30 с.

При микроанализе акцент был сделан на составе и размерах урансодержащих минеральных включений, непосредственно влияющих на результаты (U,Th)-He датирования. Также во внимание принимался парагенезис рудных минералов и характер распределения химических элементов в минерале для диагностики принадлежности пирита к определенной генерации. Отмечалось присутствие силикатных включений.

4.4. Подготовка проб

Для (U,Th)-He датирования кристаллы пирита размером более 250 мкм без видимых включений были отобраны с использованием стереомикроскопа (увеличение до $\times 5$, ИГГД РАН). Каждая проба представляла навеску 1.5–2.5 мг вещества, состоящую из 4–5 зерен пирита. Для последовательного определения содержаний He, U и Th в каждом образце проба помещалась в кварцевую ампулу и запаивалась в условиях форвакуума (10^{-3} торр). Благодаря особым кристаллохимическим свойствам кварца выделяющийся при нагреве гелий свободно диффундирует сквозь стенки ампулы, в то время как продукты термического разложения пирита (пирротин, сера), содержащие примеси урана и тория, остаются внутри ампулы (Yakubovich et al., 2019a).

4.5. Измерение концентрации ^4He

Содержание микроколичеств радиогенного гелия измерялось на высокочувствительном масс-спектрометре МСУ-Г-01-М в ИГГД РАН. С помощью специального устройства кювета из тугоплавкого материала с подготовленной пробой внутри поступает в рениевый цилиндр. Здесь в условиях высокого статического вакуума (2×10^{-7} торр) осуществляется постепенный нагрев образца. Геттерные насосы (SAES NP 10) сорбируют выделяющиеся активные газы (H_2 , N_2 , O_2 и др.) и поддерживают высокий уровень вакуума (10^{-8} торр) в течение эксперимента (Shukolyukov et al., 2012). Для выделения низкотемпературного атмосферного гелия образцы подвергаются нагреву при температуре 200 °С в течение 30 мин. Затем осуществляется постепенный нагрев по 10 мин до температуры в 1100 °С, обеспечивающий полное выделение гелия из кварцевой ампулы за время эксперимента. Резкое «взрывообразное» выделение радиогенного гелия происходит при температуре, близкой к термическому разложению пирита на пирротин и серу (450–500 °С) (Yakubovich et al., 2019b). Значение бланка (холостого измерения) пустой кварцевой ампулы составляло 10^{-10} см³, при чувствительности прибора 10^{-13} см³ ^4He на импульс (время счета 300 мс).

4.6. Определение содержаний U и Th

Определение урана и тория производилось методом изотопного разбавления. Полное разложение дегазированной кварцевой ампулы, с заключенными в ней продуктами термического разложения пирита, которые содержат примеси урана и тория, проводилось в смеси кислот (царская водка (0.4 мл), HF конц. (0.5 мл) и HClO_4 (0.05 мл)) с добавлением 1 капли смешанного трассера ^{230}Th - ^{235}U в закрытых

тефлоновых бюксах при температуре 180 °С в течение 24 ч. Затем пробы высушивались на горячей плитке при температуре 200 °С и переводились в раствор 5 % HNO₃ (1.5 мл) для дальнейших измерений U и Th. Измерение изотопных отношений ²³⁵U/²³⁸U и ²³⁰Th/²³²Th выполнялось на магнито-секторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELEMENT XR в ГЕОХИ РАН (г. Москва). Для оценки точности аналитической процедуры проводились одновременные эксперименты с апатитом Durango, признанным международным стандартом для (U,Th)-He метода. Полный химический бланк процедуры (фоновые концентрации U и Th) определялся по пустым кварцевым ампулам.

4.7. Расчет (U,Th)-He возраста

Полученные значения содержаний He, U и Th были поправлены на содержание этих элементов в холостом опыте. В случае если содержание одного из этих элементов в пробе было сопоставимо с уровнем фона (в пределах трех уровней фона), образец считался непригодным для (U,Th)-He датирования. Значения (U,Th)-He возраста минерала были рассчитаны с использованием программы IsoplotR (Vermeesch, 2018). Поправка на ядра-отдачи не вводилась ввиду относительно крупного размера зерен (>250 мкм).

5. Результаты

5.1. Минералого-петрографическая характеристика рудовмещающих вулканогенных пород тоунугольской толщи

Породы рудопроявления Карьерное представлены средне-мелкообломочными кристаллокластическими туфами и туффитами с обильной рассеянной и послойной вкрапленностью пирита (рис. 5). Волнисто-слоистая текстура пород определяет последовательное чередование туфов и туффитов (рис. 5, а). Туфогенные прослои сгруппированы в градационные серии с постепенным уменьшением размерности пирокластического материала вверх по разрезу. Мощность градационных литоциклов достигает первых десятков сантиметров. Разноориентированные несортированные угловатые обломки представлены плагиоклазом, кварцем и рудным минералом (рис. 5, а). По углу погасания полисинтетических двойников плагиоклаз по составу соответствует олигоклазу. Крупность обломков варьирует от алевритовой до псаммитовой размерности (0.05–0.25 мм). Основная масса породы преимущественно представлена тонкообломочным вулканогенным материалом. В туффитах отмечается содержание обломков карбонатного состава (рис. 5, б), кроме того, карбонат (кальцит) совместно с серицитом встречается в качестве вторичных минералов, замещающих полевые шпаты, о чем свидетельствуют рваные очертания кальцита, развитого на фоне фельшпатоидного матрикса.

Рудная минерализация представлена стратиформными отложениями субпластовой и линзовидной морфологии на разных уровнях литологических серий — в основном в виде рассеянной или послойной пиритовой вкрапленности. В шлифах она представлена мелкими (0.005 × 0.005 мм) сечениями кубических зерен и их сростков, реже встречаются более крупные кристаллы (до 0.4 × 0.4 мм) (рис. 5, в).

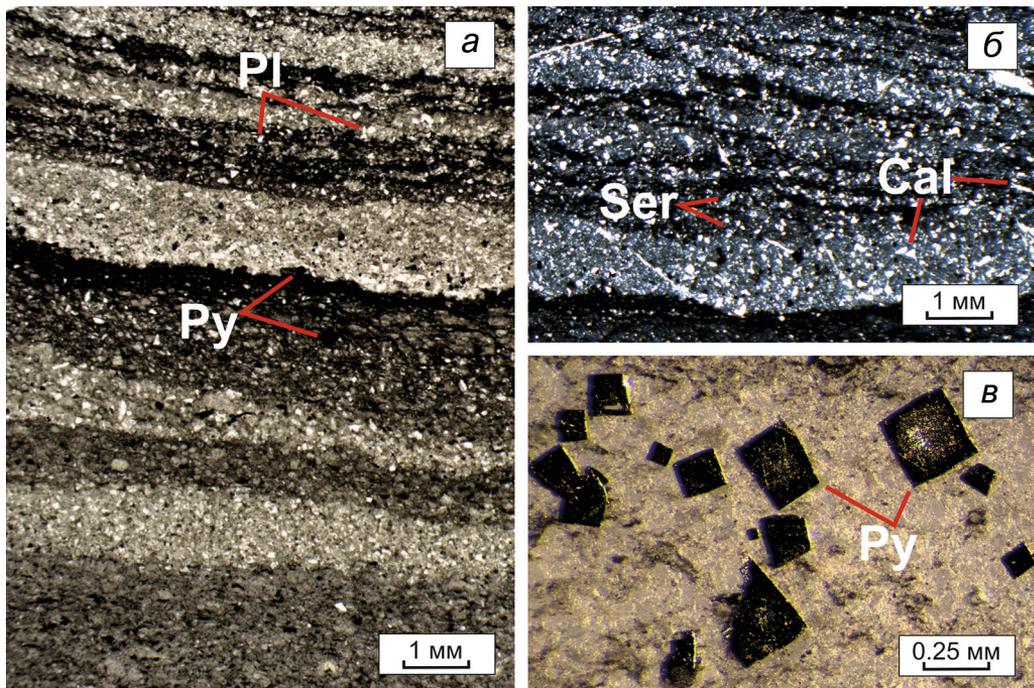


Рис. 5. Петрографические особенности туффитов рудопроявления Карьрное (обр. 14–32): а, б — волнисто-слоистая текстура туффитов (а — без анализатора, б — с анализатором); в — идиоморфные кубические кристаллы пирита, рассеянного в породе

Пирит образует эллипсоидные выделения, достигающие размера 0.04×0.4 мм, и скопления до 0.12×0.2 мм. Породы рассечены прожилками кварц-карбонатного и карбонатного составов (мощностью 0.5–2 мм).

5.2. Минералого-геохимические особенности пирита

Пирит представлен идиоморфными кристаллами кубического, пентагон-додекаэдрического габитуса и их сростками, реже зернами неправильной формы (рис. 6). Размер зерен варьирует от 250 до 500 мкм. В 9 из 25 исследованных зерен пирита (из четырех проб) была установлена химическая неоднородность, обусловленная примесью мышьяка (до 3 мас. %) (рис. 6, б). Она в основном подчеркивает правильную («концентрическую») ростовую зональность, реже наблюдается пятнистое распределение максимумов мышьяка. Среди включений преобладают галенит и халькопирит, реже встречаются пирротин и сфалерит, в единичных случаях — арсенопирит. Прочие минералы, включая потенциально содержащие уран — титанит, рутил и более редкий апатит, образуют мелкие выделения (менее 10 мкм) (рис. 6, а). Ассоциация минеральных фаз в зернах повторяется, однако в мышьяковистом пирите отмечается их повышенное количество, а также для него характерен менее изометричный габитус. В одной из проб (проба 14–40) в пирите наблюдаются трещины, и в его брекчированных зернах отмечены выделения халькопирита и кальцита, а по трещинам развиваются оксиды/гидроксиды железа.

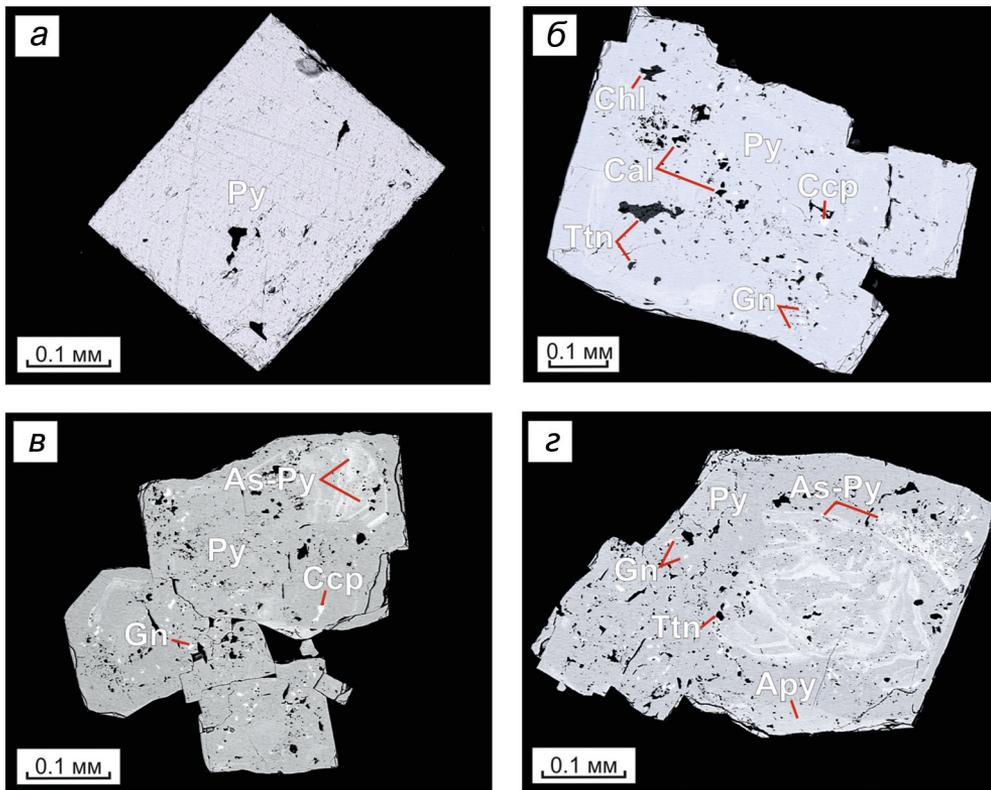


Рис. 6. BSE-изображения пирита рудопоявления Карьерное: (обр. 14–27):

a — идиоморфное зерно пирита (обр. 14–32); *б* — минеральные включения в пирите; *в* — сросток зерен пирита; *г* — зональное распределение мышьяка в пирите. Условные обозначения минералов: Apy — арсенопирит; As-Py — мышьяковистый пирит; Cal — кальцит; Ccp — халькопирит; Chl — хлорит; Gn — галенит; Py — пирит; Ttn — титанит

5.3. Результаты (U,Th)-He датирования пирита

В общей сложности было проанализировано одиннадцать навесок пирита из рудопоявления Карьерное, выделенных из четырех проб (табл.). В пробах 14–26 и 14–7 в пирите отмечались труднорастворимые включения рутила и циркона. В виду того, что полное разложение подобных включений при условиях эксперимента не происходит (требуются температуры выше 180° С и давление) и по причине аномального отклонения от средневзвешенного значения возраста, которое, вероятно, как раз и указывает на потерю урана, эти пробы были исключены из дальнейшего обсуждения результатов. Проба 14–40, для которой были характерна брекчированность пирита и наличие пленок окисления на его поверхности тоже была исключена из дальнейшего рассмотрения, так как оксиды и гидроксиды железа содержат уран, и их развитие могло исказить значения (U,Th)-He возраста.

Для остальных проб концентрация гелия в пирите из рудопоявления Карьерное лежит в диапазоне 2.0–4.7 10^{-5} см³/г. Содержание урана варьирует от 0.23 до 1.68 мкг/г (Th/U = 0.4–2.7). Для всех образцов измеренные содержания He,

Таблица. Результаты (U,Th)-Не датирования пирита рудопроявления Карьерное

Образец	№ пробы	вес, мг	U, мкг/г	σ , %	U, 10^{10} ат.	σ , %	Th, 10^{10} ат.	σ , %	Th/U	^4He , 10^{10} ат.	σ , %	T, млн лет	\pm
14-32	892	2.0	0.8	5.1	424.0	1.0	189.4	1.0	0.4	249.6	0.4	402	7
	902	1.7	0.3	6.0	136.9	1.1	65.0	0.9	0.5	85.9	1.0	425	11
	903	2.4	0.4	4.4	240.0	1.3	113.2	0.9	0.5	149.6	0.7	423	11
	904	2.8	0.4	3.7	287.2	1.1	133.5	0.8	0.5	180.1	0.7	425	10
	905	2.0	0.4	5.9	212.6	3.1	93.6	2.7	0.4	127.5	0.7	409	22
	1095	1.9	0.4	5.4	172.0	1.1	80.8	1.0	0.5	99.9	0.8	395	9
14-27	1075	1.5	0.2	7.5	58.8	3.4	157.0	2.6	2.7	52.1	0.8	416	18
*14-7	1078	1.4	0.1	7.4	19.4	1.9	26.5	2.6	1.4	16.7	2.6	492	27
*14-26	1079	1.9	0.4	5.4	154.7	1.2	59.6	1.3	0.4	122.8	0.8	541	13
	1083	2.4	0.4	4.4	278.6	1.5	108.3	2.3	0.4	183.0	2.6	451	7
**14-40	1062	-	-	-	-	-	-	-	-	8.1	4.5	-	-
Qu бланк	-	-	-	-	1.3	97	6	74	-	1.1	37	-	-

*Исключены по причине аномального отклонения от средневзвешенного значения.

**Низкие изотопные содержания.

U и Th были существенно выше фоновых значений. Средневзвешенное значение возраста 411 ± 8 млн лет.

6. Обсуждение результатов

Средневзвешенное значение (U,Th)-Не возраста пирита (411 ± 8 млн лет) из силурийских вулканогенных пород рудопроявления Карьерное соответствует геологическим оценкам возраста образования пород и рудной минерализации в регионе (Прямоносов и др., 1994; Душин и др., 2014; Викентьев и др., 2017). При этом наблюдается большой разброс значений (U,Th)-Не возраста пирита в диапазоне 402–425 млн лет, что может быть вызвано: 1) потерей или избытком ^4He , U или Th; 2) многостадийным формированием пирита и/или его частичной перекристаллизацией/новообразованием в ходе наложенных процессов.

6.1. Избыточный и потерянный Не

Удельный объем выделенного ^4He из пирита ($2.0\text{--}4.7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$) значительно превышает известные значения по содержанию гелия в гидротермальных флюидах ($10^8\text{--}10^{10} \text{ см}^3/\text{г}$) (Бортников и др., 2000; Luders and Niedermann, 2010; Yakubovich et al., 2019b), соответственно вклад захваченного гелия в данном случае, вероятно, незначительный. Для имплантированной компоненты характерна четкая зависи-

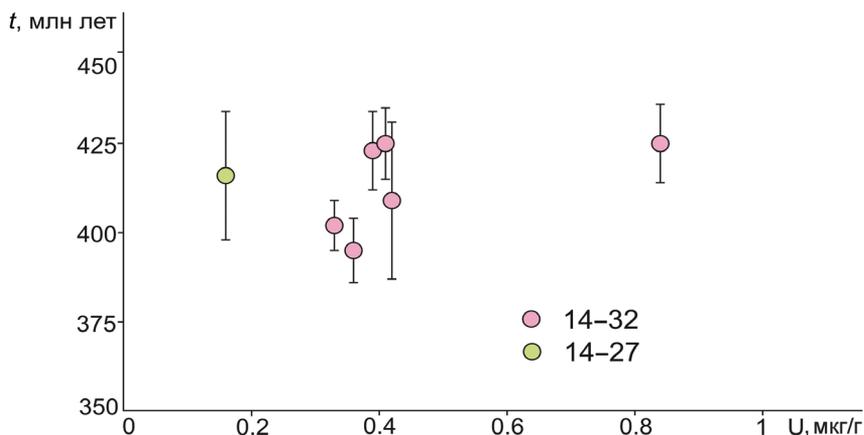


Рис. 7. Вариации значений (U,Th)-He возраста пирита от содержания урана в нем

мость от размера зерен и содержания/концентрации радиогенного гелия в образце: чем меньше размер зерна (чем ниже концентрация материнских изотопов в нем), тем существеннее ее вклад. Учитывая, что все проанализированные зерна были близкого размера, отсутствие корреляции между содержанием U, Th и He с распределением возрастов (рис. 7) снижает вероятность существенного вклада имплантированной и эджектированной компоненты.

Пирит обладает высокой сохранностью радиогенного гелия в температурном диапазоне его устойчивости ($\sim 450^\circ\text{C}$) (Yakubovich et al., 2019b). Учитывая, что породы тоупугольской толщи не претерпели существенного метаморфизма, диффузионные потери гелия кажутся маловероятными. Концепция температуры закрытия в случае ее гипотетического применения к поведению (U,Th)-He изотопной системы в пирите также не может объяснить разброс значений возраста в зернах близкого размера в пределах небольшой площади.

6.2. Потери и привнос U и Th

Микроанализ зерен пирита показал, что в ряде зерен встречаются включения труднорастворимых урансодержащих минеральных включений (циркон, рутил). Используемая в данной работе методика химического разложения не позволяет провести их полное растворение, таким образом, существует вероятность получения ошибочно завышенных значений возраста. В виду того, что включения распределены неоднородно, их вклад должен приводить к невоспроизводимым значениям возраста, как в случае проб 14-7 и 14-26, которые были исключены из последующих расчетов.

Оксиды и гидроксиды железа, которые могут развиваться в зоне окисления сульфидных руд по пириту являются концентраторами урана (Moses et al., 1987; Scott et al., 2007). Наличие таких фаз могло бы привести к омоложению (U,Th)-He возраста. Образцы были отобраны со свежих стенок карьера, в шлифах и при микроанализе пирита вторичные изменения не наблюдались (за исключением пробы 14-40, которая была исключена). Таким образом, вклад этого процесса кажется маловероятным.

6.3. Многостадийное образование пирита

Пириту — наиболее распространенному сульфидному минералу золоторудных месторождений — свойственно наличие от одной до нескольких его генераций, отвечающих определенным стадиям отложения минералов (Пшеничный, 1975; Пшеничкин и др., 1976). Мы полагаем, что это наиболее вероятная причина существенного разброса значений (U,Th)-He возраста.

По результатам сканирующей микроскопии видно (см. рис. 6), что часть зерен пирита характеризуется зональной структурой, подчеркнутой распределением мышьяка. Для этих зерен также характерны повышенное содержание минеральных сульфидных включений и менее идиоморфный габитус кристаллов. Мышьякови́стый пирит является одним из важных индикаторов гидротермальных процессов, особенно тех, что участвуют в образовании золоторудных тел (Kesler et al., 2010). Таким образом, можно предположить, что образование кайм мышьяковистого пирита отражает более позднее наложенное воздействие магматогенных флюидов на более ранний пирит вулканогенно-осадочных пород, характеризующийся меньшим количеством минеральных включений и более идиоморфным габитусом.

Предполагая вероятность попадания в выборку нескольких генераций пирита, по результатам датирования можно выделить два кластера возрастов (рис. 8). Возраст 424 ± 6 млн лет (2σ , СКВО = 0.6, $n = 4$) совпадает с возрастом осадконакопления тоупугольской толщи, который, по данным биостратиграфии, соответствует позднему венлоку — лудлову ($423\text{--}430$ млн лет по: (Прямоносов и др., 1994; Душин

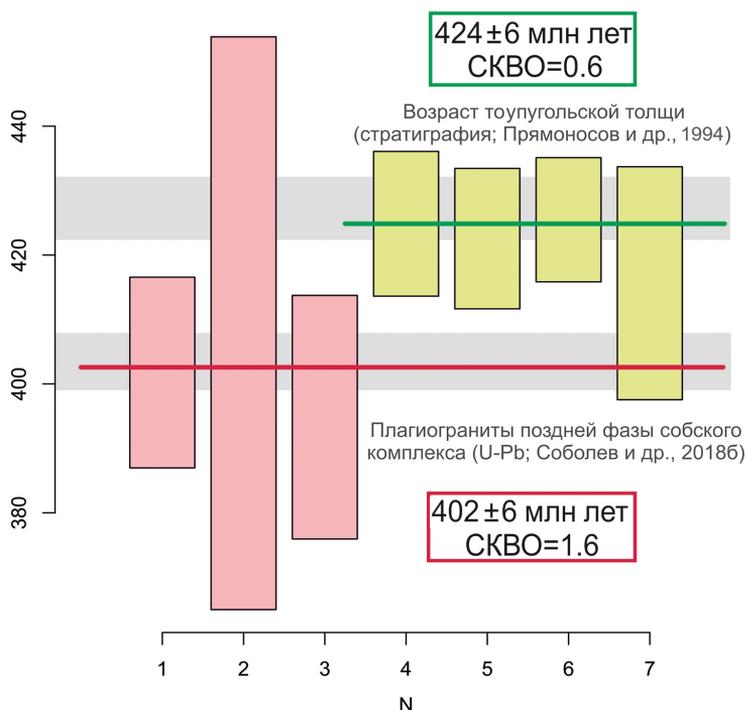


Рис. 8. График средневзвешенных значений возраста (млн лет) для пирита рудопроявления Карьерное по семи пробам, построенный в программе IsoplotR (Vermeesch, 2018)

и др., 2014; Зылева и др., 2014)). Таким образом, эта ранняя генерация отвечает начальному, синвулканическому этапу рудообразования, происходившему на фоне активного вулканизма с накоплением лав и туфов базальтового, андезибазальтового и андезитового составов (Силаев и др., 2003), периодически затухающего — с накоплением осадочных пород.

Более молодой возраст 402 ± 6 млн лет части зерен (2σ , СКВО = 1.6, $n = 3$) близок к раннедевонским возрастам цирконов из метасоматизированных диоритов главной фазы (410 ± 2 млн лет (Викентьев и др., 2017)) и дайки плагиогранитов поздней фазы (403 ± 4 млн лет (Соболев и др., 2018а)) собского комплекса в районе золоторудного месторождения Петропавловское, что может быть следствием образования и/или перекристаллизации пирита. Геологические данные не противоречат полученным выводам: гранитоиды собского комплекса развиты в пределах первых десятков метров от места отбора проб (см. рис. 2). Развитие тонкой рассеянной вкрапленности серицита в вулканитах является индикатором наложенного гидротермального воздействия, связанного с их внедрением.

6.4. Геологические следствия

Образование сульфидной минерализации рудопроявления Карьерное происходило в интервале возрастов 402–425 млн лет. Возраст ранней генерации пирита рудопроявления Карьерное — 424 ± 6 млн лет близок к возрасту формирования пород тоупугольской толщи, и, вероятно, этот этап рудной минерализации отражает образование стратиформной колчеданной минерализации.

Более позднее внедрение островодужных гранитов ранне-среднедевонского собского комплекса (Соболев и др., 2018б) привело к гидротермальным изменениям вмещающих пород вблизи интрузивов. (U,Th)-He возраст более поздней минерализации (402 ± 6 млн лет) согласуется с ранее установленным временным диапазоном развития гранитоидов собского комплекса.

(U,Th)-He возраст пирита рудопроявления Карьерное (402–425 млн лет) значительно древнее (U,Th)-He возраста пирита из околорудных метасоматитов месторождения Новогоднее-Монто (382 ± 8 млн лет, по: (Yakubovich et al., 2021)) и серицита из месторождения Петропавловское (^{40}Ar - ^{39}Ar , 382 ± 4 млн лет), являющихся самыми крупными золоторудными объектами в регионе. Учитывая положение рудопроявления Карьерное на фланге Новогодненского рудного поля, можно предположить, что рассеянная и послойная сульфидная вкрапленность вулканитов тоупугольской толщи могла выступать в качестве одного из источников серы и рудных металлов для более поздних этапов сульфидной минерализации Тоупугол-Ханмейшорского района.

7. Заключение

По результатам (U,Th)-He датирования семи образцов пирита из вулканогенно-осадочных пород рудопроявления Карьерное установлено, что формирование его сульфидной минерализации происходило в интервале времени 402–425 млн лет назад. Обработка полученных данных позволяет выделить два этапа минерализации: более ранняя (424 ± 6 млн лет), вероятно, отражает субсинхронное вулканизму

колчеданное рудообразование. Более поздняя генерация (402 ± 6 млн лет), по всей видимости, связана с внедрением гранитоидов собского комплекса в вулканогенные породы тоупугольской толщи. Полученные значения возраста сульфидной минерализации, с учетом прежних данных, отражают длительное и многостадийное развитие рудно-магматических систем в рамках единого тектоно-магматического цикла формирования Тоупугол-Ханмейшорского района Полярного Урала.

Литература

- Баранов, Э. Н. и Вертепов, Г. И. (1966). Содержание урана в сульфидах как индикатор уранового оруденения. *Атомная энергия*, 20 (2), 170–172.
- Бетехтин, А. Г. (2007). Курс минералогии: учеб. пособие. М.: КДУ.
- Бортников, Н. С., Икорский, С. В., Каменский, И. Л., Викентьев, И. В., Богданов, Ю. А., Ставрова, О. О., Аведисян, А. А. (2000). Изотопный состав гелия и углеводороды во флюидных включениях из серпентинитов и сульфидов гидротермальных полей Логачев и Рэйнбоу (Срединно-Атлантический хребет). *Доклады Академии наук*, 375 (3), 375–379.
- Викентьев, И. В., Абрамова, В. Д., Иванова, Ю. Н., Тюкова, Е. Э., Ковальчук, Е. В., Бортников, Н. С. (2016). Микропримеси в пирите золото-порфирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS. *Доклады Академии наук*, 470 (3), 326–330. <https://doi.org/10.7868/S0869565216270220>
- Викентьев, И. В., Мансуров, Р. Х., Иванова, Ю. Н., Тюкова, Е. Э., Соболев, И. Д., Абрамова, В. Д., Выхристенко, Р. И., Хубанов, В. Б., Трофимов, А. П., Грознова, Е. О., Двуреченская, С. С., Кряжев, С. Г. (2017). Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования. *Геология рудных месторождений*, 59 (6), 501–541. <https://doi.org/10.7868/S001677701706003X>
- Волчков, А. Г., Гирфанов, М. М., Кряжев, С. Г., Андреев, А. В., Черемсин, А. А., Мансуров, Р. Х., Двуреченская, С. В., Зеликсон, Б. С., Сапожников, В. Г. (2008). Положение проявлений золоторудной минерализации Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла в рудовмещающих комплексах, их минералого-геохимическая характеристика и сопоставление с эталонными объектами Новогодненского рудного поля. [отчет] М.: ФГУП ЦНИГРИ.
- Душин, В. А., Сердюкова, О. П., Малюгин, А. А., Никулина, А. А., Козьмин, В. С., Бурмако, П. Л., Абагурова, И. В., Козьмина, Л. И. (2014). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII (Обской). [объясн. записка] СПб.: ВСЕГЕИ.
- Зылева, Л. И., Коновалов, А. Л., Казак, А. П., Жданов, А. В., Коркунов, К. В., Денисов, В. А., Новикова, Л. П., Румянцева, Н. А., Черепанов, Ю. П., Черкашин, А. В., Хрякова, Л. А. (2014). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 — Салехард. [объясн. записка] СПб.: ВСЕГЕИ.
- Мансуров, Р. Х. (2009). Геологическое строение Петропавловского золоторудного месторождения, Полярный Урал. *Руды и металлы*, 5, 70–74.
- Прямоносков, А. П., Наюк, С. А., Прямоносцова, М. А. (1994). Групповая геологическая съемка и геологическое доизучение масштаба 1:50 000 на Собь-Ханмейской площади (ГТС-листы Q-41-48-B-в,г,Г-в,г, Q-42-38-A-в,В-а,б, ГДП-листы Q-41-48-B,В-а,б,Г-а,б, Q-42-37-A,В,В-а,б,Г-а,б,б, Q-42-38-A-а,б,Б-а,б). [отчет] Полярный: АООТ ПУ ГПП.
- Прямоносков, А. П. и Степанов, А. Е. (2004). Геологическое изучение и оценка минеральных ресурсов недр территории Российской Федерации и ее континентального шельфа (прогнозно-поисковые работы на золото на Харбейской площади). [отчет] Екатеринбург: ОХНИР ПАРГИ УТГА.
- Пшеничкин, А. Я., Коробейников, А. Ф., Мацюшевский, А. В. (1976). Особенности кристалломорфологии и термоэлектрических свойств пиритов золоторудных месторождений различных типов. *Известия Томского политех. ин-та*, 260, 39–48.
- Пшеничный, Г. Н. (1975). Гайское медноколчеданное месторождение Южного Урала. *Минералогия, геохимия, строение и условия формирования руд*. М.: Наука.

- Силаев, В. И., Хазов, А. Ф., Сокерин, М. Ю. (2003). Золоторудное месторождение Новогоднее-Монто на Полярном Урале. Петрология и минералогия севера Урала и Тимана. *Труды ИГ КомиНЦ УрО РАН*, 113, 159–172.
- Соболев, И. Д., Викентьев, И. В., Соболева, А. А., Травин, А. В. (2018а). Результаты U/Pb SIMS датирования цирконов и $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ возраст плаггиоклаза из пород собского комплекса (Петропавловское золоторудное месторождение, Полярный Урал). В: *Материалы VII конф. по изотоп. геохимии*. М.: ИГЕМ РАН, 398–401.
- Соболев, И. Д., Викентьев, И. В., Травин, А. В., Бортников, Н. С. (2020). Каменноугольный магматизм Полярного Урала. *Доклады Академии наук. Науки о Земле*, 494 (2), 22–28. <https://doi.org/10.31857/S2686739720100096>
- Соболев, И. Д., Соболева, А. А., Удоратина, О. В., Варламов, Д. А., Хоуриган, Дж. К., Хубанов, В. Б., Буянтуев, М. Д., Соболева, Д. А. (2018б). Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала. *Геотектоника*, 5, 39–74. <https://doi.org/10.1134/S0016853X18050065>
- Соболев, И. Д., Соболева, А. А., Удоратина, О. В., Канева, Т. А., Куликова, К. В., Викентьев, И. В., Хубанов, В. Б., Буянтуев, М. Д., Хоуриган, Дж. К. (2017). Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из палеозойских островодужных обломочных пород Полярного Урала. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*, 92 (4), 3–26.
- Трофимов, А. П., Фунтиков, Б. В., Лючкин, В. А. (2006). Прогнозно-геохимическая оценка золотоносности Новогодненской перспективной площади на Полярном Урале. *Руды и металлы*, 5, 13–18.
- Черняев, Е. В., Черняева, Е. И., Седелникова, А. Ю. (2005). Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал). В: *Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn)*. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 131–137.
- Язева, Р. Г. и Бочкарев, В. В. (1984). *Войкарский вулcano-плутонический пояс (Полярный Урал)*. Свердловск: УНЦ АН СССР.
- Burnard, P. G. and Polya, D. A. (2004). Importance of Mantle Derived Fluids during Granite Associated Hydrothermal Circulation: He and Ar Isotopes of Ore Minerals from Panasqueira. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 1607–1615. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.008>
- Christensen, J. N., Halliday, A. N., Leigh, K. E., Randell, R. N., Kesler, S. E. (1995). Direct Dating of Sulfides by Rb-Sr: A Critical Test Using the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb Deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (24), 5191–5197. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00345-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00345-2)
- Farley, K. A. (2000). Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *Journal of Geophysical Research*, 105 (2), 2903–2914. <https://doi.org/10.1029/1999JB900348>
- Farley, K. A. (2002). (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations and Applications. *Rev. Mineral. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47 (1), 819–844. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.18>
- Farley, K. A. (2018). Helium diffusion parameters of hematite from a single-diffusion-domain crystal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 231, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.04.005>
- Farley, K. A., Wolf, R. A., Silver, L. T. (1996). The Effects of Long Alpha-Stopping Distances on (U-Th)/He Ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 4223–4229. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00193-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00193-7)
- Flowers, R. M., Zeitler, P. K., Danišik, M., Reiners, P. W., Gautheron, C., Ketcham, R. A., Metcalf, J. R., Stockli, D. F., Enkelmann, E., Brown, R. W. (2022). (U-Th)/He Chronology: Part 1. Data, Uncertainty, and Reporting. *GSA Bulletin*, 135 (1–2), 104–136. <https://doi.org/10.1130/B36266.1>
- Hnatyshin, D., Creaser, R. A., Meffre, S., Stern, R. A., Wilkinson, J. J., Turner, E. C. (2020). Understanding the Microscale Spatial Distribution and Mineralogical Residency of Re in Pyrite: Examples from Carbonate-Hosted Zn-Pb Ores and Implications for Pyrite Re-Os Geochronology. *Chemical Geology*, 533, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119427>
- Ivanov, A. V., Vanin, V. A., Demonterova, E. I., Gladkochub, D. P., Donskaya, T. V., Gorovoy, V. A. (2015). Application of the 'no fool's clock' to dating the Mukodek gold field, Siberia, Russia. *Ore Geology Reviews*, 69, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.007>
- Kendrick, M. A., Burgess, R., Patrick, R. A. D., Turner, G. (2001). Fluid Inclusion Noble Gas and Halogen Evidence on the Origin of Cu-Porphyr Mineralising Fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (16), 2651–2668. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00618-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00618-4)
- Kesler, S. E., Deditius, A., Reich, M., Utsunomiya, S., Ewing, R. (2010). Role of Arsenian Pyrite in Hydrothermal Ore Deposits: A History and Update. In: *6th Geological Society of Nevada on Great Basin Evolution and Metalogeny*.

- Luders, V. and Niedermann, S. (2010). Helium isotope composition of fluid inclusions hosted in massive sulfides from modern submarine hydrothermal systems. *Economic Geology*, 105 (2), 443–449. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.2.443>
- Melekestseva, I. Y., Treťyakov, G. A., Nimis, P., Yuminov, A. M., Maslennikov, V. V., Maslennikova, S. P., Kotlyarov, V. A., Beltenev, V. E., Danyushevsky, L. V., Large, R. (2014) Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input. *Marine Geology*, 349, 37–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.013>
- Moses, C. O., Nordstrom, D. K., Herman, J. S., Mills, A. L. (1987). Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51 (6), 1561–1571. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90337-1](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(87)90337-1)
- Reich, M., Deditius, A., Chrystosoulis, S., Li, J.-W., Ma, C.-Q., Parada, M., Barra, F., Mittermayr, F. (2013). Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104, 42–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.006>
- Scott, T. B., Riba Tort, O., Allen, G. C. (2007). Aqueous uptake of uranium onto pyrite surfaces, reactivity of fresh versus weathered material. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71 (21), 5044–5053. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2007.08.017>
- Shukolyukov, Y. A., Yakubovich, O. V., Mochalov, A. G., Kotov, A. B., Saľnikova, E. B., Yakovleva, S. Z., Gorokhovskii, B. M., Korneev, S. I. (2012). New geochronometer for the direct isotopic dating of native platinum minerals (^{190}Pt - ^4He method). *Petrology*, 20 (6), 491–505.
- Smith, P. E., Evensen, N. M., York, D., Szatmari, P., Oliveira, D. C. (2001). Single-Crystal ^{39}Ar - ^{40}Ar Dating of Pyrite: No Fool's Clock. *Geology*, 29 (5), 403–406. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029%3C0403:SCAADO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029%3C0403:SCAADO%3E2.0.CO;2)
- Soloviev, S. G., Kryazhev, S. G., Dvurechenskaya, S. S. (2012). Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia. *Mineralium Deposita*, 47, 1–25. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-012-0449-9>
- Stein, H. J., Morgan, J. W., Scherstén, A. (2000). Re-Os Dating of Low-Level Highly Radiogenic (LLHR) Sulfides: The Harnäs Gold Deposit, Southwest Sweden, Records Continental-Scale Tectonic Events. *Economic Geology*, 95 (8), 1657–1671. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.95.8.1657>
- Stuart, F. M., Burnard, P. G., Taylor, R. P., Turner, G. (1995). Resolving Mantle and Crustal Contributions to Ancient Hydrothermal Fluids: He/Ar Isotopes in Fluid Inclusions from Dae Hwa WMo Mineralisation, South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (22), 4663–4673. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00300-2](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(95)00300-2)
- Vermeesch, P. (2018). Isoplot R: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Yakubovich, O. V., Gedz, A. M., Kotov, A. B., Gorokhovskii, B. M., Vikentyev, I. V. (2019b). Migration of radiogenic helium in the crystal structure of sulfides and prospects of their isotopic dating. *Petrology*, 27 (1), 59–78. <http://dx.doi.org/10.1134/S0869591118050089>
- Yakubovich, O. V., Gorokhovskii, B. M., Kotov, A. B., Vikentyev, I. V., Bortnikov, N. S., Zarubina, O. V., Bryanskiy, N. V., Dril, S. I. (2019a) U-Th-He dating of pyrite from the Uzelga copper-zinc massive sulfide deposit (South Urals, Russia): First application of a new geochronometer. *Doklady RAN. Earth Sciences*, 485 (2), 368–371. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19040263>
- Yakubovich, O., Podolskaya, M., Vikentyev, I., Fokina, E., Kotov, A. (2020). U-Th-He Geochronology of Pyrite from the Uzelga VMS Deposit (South Urals) — New Perspectives for Direct Dating of the Ore-Forming Processes. *Minerals*, 10 (629). <https://doi.org/10.3390/min10070629>
- Yakubovich, O., Vikentyev, I., Ivanova, E., Podolskaya, M., Sobolev, I., Tyukova, E., Kotov, A. (2021). U-Th-He Geochronology of Pyrite from Alteration of the Au-Fe-Skarn Novogodnee-Monto Deposit (Polar Urals, Russia) — The Next Step in the Development of a New Approach for Direct Dating of Ore-Forming Processes. *Geosciences*, 11 (408). <https://doi.org/10.3390/geosciences11100408>
- Yang, J. H. and Zhou, X. H. (2002). Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb Isotopes Systematics of Pyrite: Implications for the Age and Genesis of Lode Gold Deposits. *Geology*, 29 (8), 711–714. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029%3C0711:RSSNAP%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029%3C0711:RSSNAP%3E2.0.CO;2)

Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., Biersack, J. P. (2010). SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 268 (11–12), 1818–1823. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>

Статья поступила в редакцию 15 мая 2023 г.
Статья рекомендована к печати 10 ноября 2023 г.

Контактная информация:

Иванова Екатерина Сергеевна — ekate.s.ivanova@gmail.com
Соболев Иван Дмитриевич — sobolev_id@mail.ru
Викентьев Илья Владимирович — ilyavikentev@rambler.ru
Аносова Мария Олеговна — anosova@geokhi.ru
Подольская Мария Марковна — marypodolskaya@gmail.com
Тюкова Евгения Эрастовна — evgtyuk@mail.ru
Гороховский Борис Михайлович — bgorokh@mail.ru
Якубович Ольга Валентиновна — olya.v.yakubovich@gmail.com

(U,Th)-He age of pyrite from the Karyernoe gold ore occurrence (flank of the Novogodnenskoye ore field, Polar Urals)*

E. S. Ivanova¹, I. D. Sobolev², I. V. Vikentiev², M. O. Anosova³, M. M. Podolskaya³, E. E. Tyukova^{2,4}, B. M. Gorokhovskiy¹, O. V. Yakubovich^{1,5}

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences, 2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russian Federation

³ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical chemistry of the Russian Academy of Sciences, 19, ul. Kosygina, Moscow, 119991, Russian Federation

⁴ Geoinformation Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 11, ul. Novy Arbat, Moscow 119019, Russian Federation,

⁵ St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Ivanova, E. S., Sobolev, I. D., Vikentiev, I. V., Anosova, M. O., Podolskaya, M. M., Tyukova, E. E., Gorokhovskiy, B. M., Yakubovich, O. V. (2024). (U,Th)-He age of pyrite from the Karyernoe gold ore occurrence (flank of the Novogodnenskoye ore field, Polar Urals). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (1), 142–165. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.108> (In Russian)

In contrast to the developed areas of the Middle and Southern Urals, the hard-to-reach and eroded northern territories of the Ural folded system remain poorly studied, which determines a large number of unevaluated gold ore occurrences and single industrial objects. The Karyernoe gold ore occurrence is located among the Middle Paleozoic volcanic-clastic rocks of the Toupugol-Khanmeishorsky gold ore district on the eastern slope of the Polar Urals. The volcanic rocks show signs of early massive sulfide mineralization, which is cut by veins and dikes of the Sob (D₁₋₂) and Musyur (C₁₋₂) complexes. A new approach — (U,Th)-He pyrite dating — was used in order to determine the age of the sulfide mineralization of the Karyer-

* Optical and scanning electron microscopy of pyrite, (U,Th)-He dating (mass spectrometric measurements, calculations) were performed with the financial support of RSF project no. 22-77-10088. The work of M. O. Anosova (chemical analysis) was carried out under the state assignment of GEOKHI RAS.

noe ore occurrence, located on the flank of the Novogodnenskoye ore field. (U,Th)-He pyrite ages ($n = 7$) varies in a wide range from 402 to 425 Ma. Given the petrographic and mineralogical-geochemical observations, obtained data suggest the presence of at least two stages of rock mineralization: wendock-ludlow — 424 ± 6 Ma; and a later Early Devonian — 402 ± 6 Ma, which is probably associated with the intrusion of Sob complex granitoids into the rocks of the Toupugolskaya formation. The obtained ages of the sulfide mineralization of the Karyernoe ore occurrence are significantly older than the age values established for large gold ore objects of the district: Petropavlovskoye and Novogodnee-Monto deposits (~382 million years). Taking into account the position of the Karyernoe ore occurrence on the flank of the Novogodnenskoye ore field, it can be assumed that the disseminated and layered sulfide impregnation of the volcanic rocks of the Toupugolskaya formation could have acted as one of the sources of sulfur and ore metals for later stages of sulfide mineralization in the Toupugol-Khanmeishorsky district.

Keywords: geochronology, pyrite, (U,Th)-He, Polar Urals, sulfide and skarn-porphyrty mineralization, gold deposits, Paleozoic island arc, Devonian.

References

- Baranov, E.N. and Vertepov, G.I. (1966). Uranium content of sulfides as an indicator of uranium mineralization. *Atomnaia energiya*, 20 (2), 170–172. (In Russian)
- Betekhtin, A.G. (2007). Mineralogy course: Textbook. Moscow: KDU Publ. (In Russian)
- Bortnikov, N.S., Ikorsky, S.V., Kamensky, I.L., Vikentiev, I.V., Bogdanov, Yu. A., Stavrova, O.O., Avedisyan, A.A. (2000). Helium isotopic composition and hydrocarbons in fluid inclusions from serpentinites and sulfides of the Logachev and Rainbow hydrothermal fields (Mid-Atlantic Ridge). *Doklady Akademii nauk*, 375 (3), 375–379. (In Russian)
- Burnard, P.G. and Polya, D.A. (2004). Importance of Mantle Derived Fluids during Granite Associated Hydrothermal Circulation: He and Ar Isotopes of Ore Minerals from Panasqueira. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 1607–1615. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.008>
- Chernyaev, E.V., Chernyaeva, E.I., Sedelnikov, A.Yu. (2005). Geology of Novogodnee-Monto Au-skarn deposit (Polar Urals). In: *The skarns, their genesis and ore mineralization (Fe, Cu, Au, W, Sn)*. Ekaterinburg: UB RAS Publ., 131–137. (In Russian)
- Christensen, J.N., Halliday, A.N., Leigh, K.E., Randell, R.N., Kesler, S.E. (1995). Direct Dating of Sulfides by Rb-Sr: A Critical Test Using the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb Deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (24), 5191–5197. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00345-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00345-2)
- Dushin, V.A., Serdyukova, O.P., Malyugin, A.A., Nikulina, A.A., Kozmin, V.S., Burmako, P.L., Abaturova, I.V., Kozmina, L.I. (2014). *State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Second edition. Polar-Ural series. Sheet Q-42-VII, VIII (Obskoi)*. [explain note] St. Petersburg: VSEGEI Press. (In Russian)
- Farley, K.A. (2000). Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *Journal of Geophysical Research*, 105 (2), 2903–2914. <https://doi.org/10.1029/1999JB900348>
- Farley, K.A. (2002). (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations and Applications. *Rev. Mineral. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47 (1), 819–844. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.18>
- Farley, K.A. (2018). Helium diffusion parameters of hematite from a single-diffusion-domain crystal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 231, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.04.005>
- Farley, K.A., Wolf, R.A., Silver, L.T. (1996). The Effects of Long Alpha-Stopping Distances on (U-Th)/He Ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 4223–4229. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00193-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00193-7)
- Flowers, R.M., Zeitler, P.K., Danišik, M., Reiners, P.W., Gautheron, C., Ketcham, R.A., Metcalf, J.R., Stockli, D.F., Enkelmann, E., Brown, R.W. (2022). (U-Th)/He Chronology: Part 1. Data, Uncertainty, and Reporting. *GSA Bulletin*, 135 (1–2), 104–136. <https://doi.org/10.1130/B36266.1>
- Hnatyshin, D., Creaser, R.A., Meffre, S., Stern, R.A., Wilkinson, J.J., Turner, E.C. (2020). Understanding the Microscale Spatial Distribution and Mineralogical Residency of Re in Pyrite: Examples from Carbonate-Hosted Zn-Pb Ores and Implications for Pyrite Re-Os Geochronology. *Chemical Geology*, 533, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119427>

- Ivanov, A. V., Vanin, V. A., Demonterova, E. I., Gladkochub, D. P., Donskaya, T. V., Gorovoy, V. A. (2015). Application of the 'no fool's clock' to dating the Mukodek gold field, Siberia, Russia. *Ore Geology Reviews*, 69, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.007>
- Kendrick, M. A., Burgess, R., Patrick, R. A. D., Turner, G. (2001). Fluid Inclusion Noble Gas and Halogen Evidence on the Origin of Cu-Porphry Mineralising Fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (16), 2651–2668. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00618-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00618-4)
- Kesler, S. E., Deditius, A., Reich, M., Utsunomiya, S., Ewing, R. (2010). Role of Arsenian Pyrite in Hydrothermal Ore Deposits: A History and Update. In: *6th Geological Society of Nevada on Great Basin Evolution and Metallogeny*.
- Luders, V. and Niedermann, S. (2010). Helium isotope composition of fluid inclusions hosted in massive sulfides from modern submarine hydrothermal systems. *Economic Geology*, 105 (2), 443–449. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.2.443>
- Mansurov, R. Kh. (2009). Geological structure of the Petropavlovsk gold deposit, Polar Urals. *Ores and metals*, 5, 70–74. (In Russian)
- Melekestseva, I. Y., Tret'yakov, G. A., Nimis, P., Yuminov, A. M., Maslennikov, V. V., Maslennikova, S. P., Kotlyarov, V. A., Beltenev, V. E., Danyushevsky, L. V., Large, R. (2014) Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input. *Marine Geology*, 349, 37–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.013>
- Moses, C. O., Nordstrom, D. K., Herman, J. S., Mills, A. L. (1987). Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51 (6), 1561–1571. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90337-1](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(87)90337-1)
- Pryamnosov, A. P., Nayuk, S. A., Pryamnosova, M. A. (1994). *Group geological survey and geological additional study on a scale of 1:50,000 in the Sob-Khanmei area (GGS sheets Q-41-48-B-в,з,Г-в,з, Q-42-38-A-в, V-a, GDP sheets Q-41-48-B, V-a, б, G-a, б, Q-42-37-A, B, V-a, б, G-a, б, б, Q-42-38-A-a, б, B-a, б)*. [report] JSC PU GGP, pos. Poliarnyi. (In Russian)
- Pryamnosov, A. P. and Stepanov, A. E. (2004). *Geological study and assessment of mineral resources of the subsoil of the territory of the Russian Federation and its continental shelf (forecasting and prospecting for gold in the Kharbeyskaya area)*. [report] Yekaterinburg: OKHNIR PARGI UGGA Press. (In Russian)
- Pshenichkin, A. Ya., Korobeinikov, A. F., Matsyushevsky, A. V. (1976). Features of crystal morphology and thermoelectric properties of pyrites from gold ore deposits of various types. *Izvestiia Tomskogo politekh. in-ta*, 260, 39–48. (In Russian)
- Pshenichny, G. N. (1975). *Gai copper pyrite deposit of the Southern Urals. Mineralogy, geochemistry, structure and conditions of ore formation*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Reich, M., Deditius, A., Chryssoulis, S., Li, J.-W., Ma, C.-Q., Parada, M., Barra, F., Mittermayr, F. (2013). Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104, 42–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.006>
- Scott, T. B., Riba Tort, O., Allen, G. C. (2007). Aqueous uptake of uranium onto pyrite surfaces, reactivity of fresh versus weathered material. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71 (21), 5044–5053. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2007.08.017>
- Shukolyukov, Y. A., Yakubovich, O. V., Mochalov, A. G., Kotov, A. B., Sal'nikova, E. B., Yakovleva, S. Z., Gorokhovskii, B. M., Korneev, S. I. (2012). New geochronometer for the direct isotopic dating of native platinum minerals (¹⁹⁰Pt-⁴He method). *Petrology*, 20 (6), 491–505.
- Silae, V. I., Khazov, A. F., Sokerin, M. Yu. (2003). Novogodneye-Monto gold deposit in the Polar Urals. Petrology and mineralogy of the north of the Urals and Timan. *Trudy IG KomiNTs UrO RAN*, 113, 159–172. (In Russian)
- Smith, P. E., Evensen, N. M., York, D., Szatmari, P., Oliveira, D. C. (2001). Single-Crystal ³⁹Ar-⁴⁰Ar Dating of Pyrite: No Fool's Clock. *Geology*, 29 (5), 403–406. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029%3C0403:SCAADO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029%3C0403:SCAADO%3E2.0.CO;2)
- Sobolev, I. D., Soboleva, A. A., Udoratina, O. V., Kaneva, T. A., Kulikova, K. V., Vikentiev, I. V., Khubanov, V. B., Buyantuev, M. D., Hourigan, J. K. (2017). First results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from Paleozoic island-arc clastic rocks of the Polar Urals. *Bulletin of the Moscow Society of Natural Scientists. Department of Geology*, 92 (4), 3–26. (In Russian)
- Sobolev, I. D., Soboleva, A. A., Udoratina, O. V., Varlamov, D. A., Hourigan, J. K., Khubanov, V. B., Buyantuev, M. D., Soboleva, D. A. (2018b). Devonian island arc magmatism of the Voykar zone of the Polar Urals. *Geotectonics*, 5, 39–74. <https://doi.org/10.1134/S0016853X18050065> (In Russian)

- Sobolev, I. D., Vikentyev, I. V., Soboleva, A. A., Travin, A. V. (2018a). Results of U/Pb SIMS dating of zircons and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ age of plagioclase from rocks of the Sob complex (Petropavlovskoe gold deposit, Polar Urals). In: *Materials of the VII isotope conference. geochemistry*. Moscow: IGEM RAN Publ., 398–401. (In Russian)
- Sobolev, I. D., Vikentyev, I. V., Travin, A. V., Bortnikov, N. S. (2020). Carboniferous magmatism of the Polar Urals. *Doklady RAN. Earth Sciences*, 494 (2), 22–28. (In Russian)
- Soloviev, S. G., Kryazhev, S. G., Dvurechenskaya, S. S. (2012). Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia. *Mineralium Deposita*, 47, 1–25. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-012-0449-9>
- Stein, H. J., Morgan, J. W., Scherstén, A. (2000). Re-Os Dating of Low-Level Highly Radiogenic (LLHR) Sulfides: The Harnäs Gold Deposit, Southwest Sweden, Records Continental-Scale Tectonic Events. *Economic Geology*, 95 (8), 1657–1671. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.95.8.1657>
- Stuart, F. M., Burnard, P. G., Taylor, R. P., Turner, G. (1995). Resolving Mantle and Crustal Contributions to Ancient Hydrothermal Fluids: HeAr Isotopes in Fluid Inclusions from Dae Hwa WMo Mineralisation, South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (22), 4663–4673. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00300-2](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(95)00300-2)
- Trofimov, A. P., Funtikov, B. V., Lyuchkin, V. A. (2006). Predictive and geochemical assessment of the gold content of the Novogodnenskaya promising area in the Polar Urals. *Ores and Metals*, 5, 13–18. (In Russian)
- Vermeesch, P. (2018). Isoplot R: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Vikentyev, I. V., Abramova, V. D., Ivanova, Yu. N., Tyukova, E. E., Kovalchuk, E. V., Bortnikov, N. S. (2016). Microimpurities in pyrite of the Petropavlovskoye porphyry gold deposit (Polar Urals) according to LA-ICP-MS data. *Doklady Akademii nauk*, 470 (3), 326–330. <https://doi.org/10.7868/S0869565216270220> (In Russian)
- Vikentyev, I. V., Mansurov, R. Kh., Ivanova, Yu. N., Tukova, E. E., Sobolev, I. D., Abramova, V. D., Vykhristenko, R. I., Khubanov, V. B., Trofimov, A. P., Groznova, E. O., Dvurechenskaya, S. S., Kryazhev, S. G. (2017). Porphyry-style Petropavlovskoe gold deposit, the Polar Urals: Geological position, mineralogy, and formation conditions. *Geology of Ore Deposits*, 59 (6), 501–541. <http://doi.org/10.7868/S001677701706003X> (In Russian)
- Volchkov, A. G., Girfanov, M. M., Kryazhev, S. G., Andreev, A. V., Cheremisin, A. A., Mansurov, R. H., Dvurechenskaya, S. V., Zelikson, B. S., Sapozhnikov, V. G. (2008). *The position of gold mineralization of the Toupugol-Khanmeishorsky ore area in ore-containing complexes, their mineral and geo-chemical characteristics and comparison with the reference objects of the Novogodnee-Monto mineralized area*. [report] Moscow: FGUP TsNIGRI Publ. (In Russian)
- Yakubovich, O. V., Gedz, A. M., Kotov, A. B., Gorokhovskii, B. M., Vikentyev, I. V. (2019b). Migration of radiogenic helium in the crystal structure of sulfides and prospects of their isotopic dating. *Petrology*, 27 (1), 59–78. <http://dx.doi.org/10.1134/S0869591118050089>
- Yakubovich, O. V., Gorokhovskii, B. M., Kotov, A. B., Vikentyev, I. V., Bortnikov, N. S., Zarubina, O. V., Bryanskiy, N. V., Dril, S. I. (2019a). U-Th-He dating of pyrite from the Uzelga copper-zinc massive sulfide deposit (South Urals, Russia): First application of a new geochronometer. *Doklady RAN. Earth Sciences*, 485 (2), 368–371. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19040263>
- Yakubovich, O., Podolskaya, M., Vikentyev, I., Fokina, E., Kotov, A. (2020). U-Th-He Geochronology of Pyrite from the Uzelga VMS Deposit (South Urals) — New Perspectives for Direct Dating of the Ore-Forming Processes. *Minerals*, 10 (629). <https://doi.org/10.3390/min10070629>
- Yakubovich, O., Vikentyev, I., Ivanova, E., Podolskaya, M., Sobolev, I., Tyukova, E., Kotov, A. (2021). U-Th-He Geochronology of Pyrite from Alteration of the Au-Fe-Skarn Novogodnee-Monto Deposit (Polar Urals, Russia) — The Next Step in the Development of a New Approach for Direct Dating of Ore-Forming Processes. *Geosciences*, 11 (408). <https://doi.org/10.3390/geosciences11100408>
- Yang, J. H. and Zhou, X. H. (2002). Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb Isotopes Systematics of Pyrite: Implications for the Age and Genesis of Lode Gold Deposits. *Geology*, 29 (8), 711–714. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029%3C0711:RSSNAP%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029%3C0711:RSSNAP%3E2.0.CO;2)
- Yazeva, R. G., and Bochkarev, V. V. (1984). *Voykar volcano-plutonic belt (Polar Urals)*. Sverdlovsk: UC USSR Academy of Sciences Publ. (In Russian)

- Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., Biersack, J. P. (2010). SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 268 (11–12), 1818–1823. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>
- Zyleva, L. I., Konovalov, A. L., Kazak, A. P., Zhdanov, A. V., Korkunov, K. V., Denisov, V. A., Novikova, L. P., Rumyantseva, N. A., Cherepanov, Yu. P., Cherkashin, A. V., Khryakova, L. A. (2014). *State 1: 1,000,000 Geological Map of the Russian Federation (3rd ed.). Series Western Siberian. Sheet No. Q-42 (Salekhard)*. [explanatory note] St. Petersburg: VSEGEI Press. (In Russian)

Received: May 15, 2023
Accepted: November 10, 2023

Authors' information:

Ekaterina S. Ivanova — ekate.s.ivanova@gmail.com
Ivan D. Sobolev — sobolev_id@mail.ru
Ilya V. Vikentev — ilyavikentev@rambler.ru
Maria O. Anosova — anosova@geokhi.ru
Maria M. Podolskaya — marypodolskaya@gmail.com
Evgenia E. Tyukova — evgtyuk@mail.ru
Boris M. Gorokhovskiy — bgorokh@mail.ru
Olga V. Yakubovich — olya.v.yakubovich@gmail.com