ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА Au-Pd МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧУДНОЕ (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

© 2024 г. А. В. Козлов^{1, *}, В. Д. Корзников^{1, **}, В. В. Смоленский¹, С. К. Кузнецов², А. А. Савичев³, А. С. Иванов¹, Е. А. Васильев¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21 линия, 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

²Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, д. 54, Сыктывкар, 167982, Россия

³ООО УК «Полюс», ул. Красина, д. 3, стр. 1, Москва, 123056, Россия

*e-mail: akozlov@spmi.ru **e-mail: korznikov vd@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию: 20.10.2023 После доработки: 29.03.2024 Принята к публикации: 10.04.2024

Установленные с использованием методов изотопной геохронологии значения возраста минералов, входящих в состав руд месторождения Чудное, не позволяют корректно оценить время образования Au-Pd оруденения по причине отсутствия достоверных признаков их сингенетичности с золотом. На основании увязки изотопно-геохронологических данных с историей геологического развития Приполярного Урала и всем комплексом эндогенных и экзогенных процессов, определивших особенности его геологического строения и минерагении, обоснован раннепалеозойский возраст оруденения. Аналогичный возраст вмещающих оруденение метариолитов позволяет предполагать не только пространственную, но и парагенетическую связь рудной минерализации с кислыми вулканитами. При исследовании минерального состава и структурно-текстурных особенностей руд необходимо принимать во внимание наложение послерудных процессов, особенно наиболее мощно проявленного на Приполярном Урале метаморфизма, пик которого приходится на верхний палеозой (~ 250 млн лет).

Ключевые слова: месторождение Чудное, Приполярный Урал, Au-Pd минерализация, U-Pb датирование по циркону, возраст оруденения **DOI**: 10.31857/S0869605524030036, **EDN**: PLQSMZ

введение

Золото-палладиевое месторождение Чудное, открытое В. С. Озеровым в 1994 г., расположено на хребте Малдынырд в бассейне верхнего течения р. Кожим (западный склон Приполярного Урала). Его название, предложенное первооткрывателем, удивительно емко отражает его главную особенность — своеобразие рудной минерализации, выражающееся в том, что золото-палладиевое оруденение приурочено к разновидностям метариолитов, насыщенных прожилками фуксита (при отсутствии в непосредственной близости источников хрома), оруденение не содержит сульфидов, практически отсутствует золотоносная кварцевожильная минерализация, руды обогащены редкоземельными элементами, изоморфно входящими в алланит, титанит или образующие собственные минералы (монацит, ксенотим, черновит и др.).

Предпринятый поиск аналогичных рудных объектов не увенчался успехом, результатом чего стал вывод о том, что рудопроявление Чудное является представителем ранее неизвестного гидротермального Au-Pd-REE-оруденения (Тарбаев и др., 1996; Галанкина, 2001; Борисов, 2005). Продолжающиеся исследования месторождения базируются преимущественно на изучении коллекций, собранных в период проведения на нем геологоразведочных работ, завершившихся в 2015 г. Полученные результаты существенно детализируют минералогические особенности руд и непосредственно золота (Онищенко, Кузнецов, 2019, 2023; Онищенко и др., 2020; Palyanova et al., 2021), но возраст оруденения остается в ряду нерешенных проблем.

Ранее были предприняты попытки оценки возраста золото-палладиевой минерализации месторождения Чудное с использованием различных изотопно-геохронологических методов: U-Pb по циркону и Sm-Nd по алланиту (Галанкина, 2001), Rb-Sr по риолитам, мусковиту, фукситу, калиевому полевому шпату (Кузнецов, Андреичев, 1998), K-Ar по фукситу (Суренков, 2003), ⁴⁰Ar-³⁹Ar по фукситу (Борисов, 2005; Моралев и др., 2005). Возрастной диапазон оруденения, оцененный по результатам датирования этих минералов, колеблется в интервале от 500 млн лет (Галанкина, 2001) до 250 млн лет (Кузнецов, Андреичев, 1998; Суренков, 2003; Моралев и др., 2005). Однако отсутствие достоверных признаков сингенетичности использованных для изотопно-геохронологических исследований минералов и золота не позволяет корректно считать эти датировки временем возникновения собственно золото-палладиевой минерализации.

В то же время, ключевым элементом создания геолого-генетической модели месторождения Чудное является именно возраст оруденения. Если возраст золото-палладиевой минерализации совпадает со временем завершающего венд-кембрийского этапа проявления магматической активности в пределах Приполярного Урала, то целесообразно связывать ее образование с флюидно-магматическими процессами этого этапа. При установлении ее более молодого возраста, золото-палладиевая минерализация могла формироваться только в связи с проявлением амагматических гидротермальных процессов, поскольку в этой части Приполярного Урала более молодой магматизм не установлен. Отсюда вытекает цель исследования — выработка подходов к решению проблемы определения возраста рудной минерализации месторождения Чудное на основе обобщения опубликованных материалов, минералогического изучения руд и изотопно-геохронологических исследований кристаллов циркона из руд и вмещающих пород месторождения, а также увязки всей совокупности этих данных с историей геологического развития Приполярного Урала и особенностями его минерагении.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На территории исследуемого района развиты породы двух крупнейших структурно-тектонических комплексов Урала: рифей-вендского (доуралиды) и палеозойского (уралиды). Месторождение Чудное находится в пределах малдинского эрозионного окна, в котором обнажаются метабазальты и метариолиты саблегорской свиты позднего венда, которые на западе, юге и востоке перекрыты метатерригенными породами алькесвожской свиты позднего кембрия — раннего ордовика, выше по разрезу сменяющимися конгломератами и кварцито-песчаниками обеизской (тельпосской) свиты раннего ордовика (рис. 1). В основании палеозойского структурного этажа фрагментарно отмечаются реликты метаморфизованных кор выветривания кембрийского возраста, представленные линзами глиноземистых и железистых сланцев с серицитом, пирофиллитом, хлоритоидом, диаспором и гематитом, продукты переотложения которых входят в состав алькесвожской свиты (Шумилов, 1999; Юдович и др., 2001; Никулова,



Рис. 1. Геологическое строение месторождения Чудное (Онищенко и др., 2014): 1—3 — верхнерифейсковендские породы: 1 — вулканиты кислого состава верхней подсвиты саблегорской свиты; 2 — вулканиты основного и среднего состава нижней подсвиты саблегорской свиты; 3 — породы основного состава нерасчлененные; 4 — рудная зона с бортовым содержанием золота 1 г/т; 5 — зоны фукситовой минерализации; 6 — зоны интенсивного рассланцевания.

Fig. 1. Geological structure of the Chudnoye deposit (Onishchenko et al., 2014): 1-3 -Upper-Riphean-Vendian rocks: 1 -felsic volcanic rocks of the upper sub-formation of the Sablegorskaya suite; 2 -mafic and intermediate volcanic rocks of the lower sub-formation of the Sablegorskaya suite; 3 -mafic rocks undifferentiated; 4 - ore zone with the gold concentration more than 1 ppm; 5 - zones of fuchsite mineralization; 6 - zones of intensive shale.

Симакова, 2007; Кузнецов и др., 2018). Все породы района претерпели метаморфизм зеленосланцевой фации и в различной степени рассланцованы.

Золото-палладиевое оруденение приурочено к метариолитам саблегорской свиты, в которых многочисленные тонкие золотоносные фукситовые прожилки образуют линейные штокверки, формирующие три рудные зоны: Славная, Лидер и Людная (рис. 1). Содержание золота в метариолитах с фукситовыми прожилками колеблется от 2 до 8, а в наиболее богатых участках достигает сотен грамм на тонну (Кузнецов и др., 2018). Кроме самородного золота в фукситовых прожилках присутствуют кварц, альбит, кальцит, цинкохромит, титанит, ильменит, гематит, циркон, минералы металлов платиновой группы (мертиит, изомертиит, атенеит) и редкоземельных элементов (алланит, монацит, ксенотим, черновит). Особенности минерального состава детально изучены и нашли отражения в многочисленных публикациях (Тарбаев и др., 1996; Шумилов, Остащенко, 2000; Галанкина, 2001; Онищенко, Кузнецов, 2019, 2023; Онищенко и др., 2020; Palyanova et al., 2021).

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Коллекция образцов для исследования включала метариолиты и их золотоносные разновидности с фукситовыми прожилками, а также фрагменты метагравелитов и метапесчаников из базального горизонта перекрывающей метариолиты алькесвожской свиты. Метариолиты месторождения Чудное представлены массивными и в различной степени рассланцованными разностями редкопорфировой структуры. Порфировые вкрапленники калиевого полевого шпата (КПШ) и кварца размером около 1 мм слагают от 3 до 10% породы. По КПШ развивается шахматный альбит, кварц образует резорбированные изометричные зерна. Кварц-полевошпатовая цементирующая масса имеет микропойкилобластовую структуру. Породы преимущественно темно-серого цвета, отдельные участки с повышенным содержанием мусковита имеют светло-серую окраску, а фрагменты зеленоватого цвета обусловлены развитием фуксита. Метагравелиты и метапесчаники алькесвожской свиты представлены преимущественно рассланцованными разновидностями, в которых обломки сложены кварцем, КПШ, либо метапесчаниками. Матриксом служит мелкозернистый полевошпат-серицит-кварцевый агрегат с хлоритоидом, гематитом, иногда фукситом. Нередко в метариолитах и метапесчаниках отмечаются ругил, титанит, цинкохромит, фосфаты редких земель, урановые минералы. Минеральный состав и пространственно-временные взаимоотношения минералов пород и руд изучались в шлифах и аншлифах с использованием оптического микроскопа Leica DM2700P.

Для получения геохронологических данных был выбран наиболее надежный U-Pb метод датирования по циркону (Каулина, 2010), который ранее для этой цели на месторождении Чудное использовался редко (Галанкина, 2001). Изучение кристаллов циркона проводилось непосредственно в шлифах и аншлифах, а также в монофракциях, выделенных из безрудных и золотоносных метариолитов, и перекрывающих их метагравелитов мономинеральных фракциях. Наиболее крупные зерна (более 50 мкм), отобранные для изотопно-геохронологических исследований, монтировались в эпоксидную смолу с последующей шлифовкой и полировкой приблизительно на половину их толщины.

В аншлифах и шлифах кристаллы циркона и их взаимоотношения с другими минералами изучались с использованием оптического микроскопа Leica DM2700P в проходящем и отраженном свете. Для диагностики минеральных включений в зернах циркона и определения химического состава других минералов использовался электронно-зондовый микроанализатор JXA-8230 Superprobe (ЦКП, Санкт-Петербургский горный университет). При описании минералов, кроме фуксита и серицита, аббревиатуры давались согласно работе (Warr, 2021).

Аналитические данные по изотопному составу U-Pb системы зерен циркона, находящихся непосредственно в породе, получены в ЦКП МИИ СО РАН (Институт геологии и минералогии, г. Новосибирск, операторы А. В. Карпов и Д. В. Семенова) с использованием метода LA-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite при диаметре лазерного луча 25 мкм. Аналогичные исследования зерен циркона из мономинеральных фракций проводились в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» (Институт геологии и геохимии, г. Екатеринбург, оператор В. С. Червяковский) с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре NexION300S с приставкой для лазерной абляции NWR213 при диаметре кратера 25 мкм.

В результате последующей обработки аналитические результаты были отфильтрованы по критерию дискордантности. Для циркона мономинеральных проб были



Рис. 2. Спектры комбинационного рассеивания исследованного циркона в порядке увеличения степени метамиктности: наименьшая степень проявлена в зерне 2.2; наибольшая — в зерне 2.4.

Fig. 2. The Raman scattering spectra of the studed zircon in order of increasing the degree of metamictness: the lowest degree is manifested in grain 2.2; the highest — in grain 2.4.

исключены значения с D > 5% (оставшееся число датировок — 13). Для циркона, находящегося непосредственно в породе, рассматривались значения с D < 15% (оставшееся число датировок — 8), однако для расчета возрастов учитывались только значения с D < 5%. Диаграммы с конкордией были построены с использованием программы ISOPLOT/EX (Ludwig, 2003), эллипсы ошибок приведены на уровне $\pm 1\sigma$.

Оценка метамиктности циркона проводилась по спектрам комбинационного рассеяния (КР). Известно, что интенсивность линий КР напрямую зависит от дозы облучения (Nasdala et al., 1996; Zhang et al., 2000). Спектры КР регистрировались на спектрометре RenishawInVia (ЦКП, Санкт-Петербургский горный университет), при возбуждении лазером 785 нм, объектив ×100 в диапазоне 100-1500 см⁻¹ при времени накопления спектра 10 секунд. Спектры всех образцов (рис. 2) регистрировались в одном режиме, но для части образцов с максимальной интенсивностью сигнала мошность лазера снижалась до 10%. В качестве индикатора степени метамиктности использовалась интенсивность линии v3 (SiO₄) с максимумом около 1008 см⁻¹, определяемая относительно базовой линии в области 950—1030 см⁻¹, максимальное значения которой характерно для наименее затронутых процессами метамиктного распада кристаллов циркона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопно-геохронологические исследования циркона. Изучение кристаллов циркона, вскрытых непосредственно в аншлифах, проведено в двух образцах. Первый образец представлен золотоносной метариолитовой брекчией с фукситовым цементом. Индивиды циркона находились во фрагментах метариолитов, где были локализованы в участках, обогащенных фенгитом (рис. 3, точки анализа 0.1—0.5 на рис. 5). Кристаллы циркона во втором образце приурочены к локальному скоплению титансодержащих минералов, расположенному в массивном фукситовом агрегате (рис. 4; аналитические точки 0.6—0.8 на рис. 5).

Результаты, полученные по трем кристаллам циркона и внешней части зонального кристалла из первого образца (рис. 5, анализы 0.1, 0.3, 0.4, 0.5 в табл. 1), дают конкордантный возраст 503 ± 6 млн лет, СКВО 2.6; возраст, полученный по ядру зонального кристалла циркона (анализ 0.2), составляет 539 млн лет (рис. 6).

Результаты исследования второго образца, в котором кристаллы циркона находились в микрозернистом агрегате рутила и титанита с примесью редкоземельных и урановых минералов, свидетельствуют о нарушении U-Pb изотопной системы в двух проанализированных кристаллах (анализы 0.7, 0.8 на рис. 6 и в табл. 1). Для одного кристалла (анализ 0.6) аналитическая точка близка к конкордантному значению и практически совпадает с анализом 0.5 из первого образца (рис. 6). Это зерно циркона по содержанию U не отличается от других кристаллов этой группы, но находится в фуксите и непосредственно не контактирует с агрегатом титансодержащих минералов, в котором выявлен обогащенный U и Th монацит (см. рис. 46), что, возможно, и определило большую сохранность в нем U-Pb системы. Кристаллы циркона из метариолитов брекчии и золотоносного фукситового прожилка имеют близкую морфологию, схожие особенности внутреннего строения, что позволяет предположить их общее происхождение и связь с процессами формирования вулканитов венд-нижнекембрийского возраста (503 ± 6 млн лет).

Исследованный циркон из монофракций (рис. 7) представлен таблитчатыми, изометричными или столбчатыми кристаллами с различным удлинением (до 2.5 и более). Отдельно была выделена группа окатанных зерен циркона, распространенных



Рис. 3. Метариолитовая брекчия с фукситовым цементом с указанием положения кристаллов циркона, использованных для геохронологических исследований, результаты которых показаны на рисунке 6 (*a*); микрофотография кристалла циркона, приуроченного к обогащённому слюдой участку в метариолите, отраженный свет с анализатором (δ). Mica — слюда, Qz — кварц, Kfs — калиевый полевой шпат, Zrn — циркон. **Fig. 3.** Metariolite breccia with fuchsite cement with positions of zircon crystals which used for geochronological dating, the results are shown on figure 6 (*a*); micrograph of a zircon crystal confined to a mica-enriched site in the metariolite, reflected light with an analyzer (δ). Qz — quartz, Kfs — potassium fieldspar, Zrn — zircon.



Рис. 4. Ассоциация кристаллов циркона с титансодержащими и редкоземельными минералами: a — изометричное скопление титансодержащих минералов и циркона в фукситовом агрегате; δ — то же в отраженном свете без анализатора с указанием зерен циркона, для геохронологических исследований, результаты которых показаны на рисунке 15; e — то же с анализатором; e — то же, изображение в обратно-отраженных электронах; d — округлые минеральные включения в цирконе зонального строения (изображение в обратно-отраженных электронах); e — нарастание ксенотима на циркон (изображение в обратно-отраженных электронах); e — округлые минеральные включения в ов внешней зоне циркона (изображение в обратно-отраженных электронах); m — округлые минеральные включения во внешней зоне циркона (изображение в обратно-отраженных электронах); m — округлые минеральные включения во внешней зоне циркона (изображение в обратно-отраженных электронах); m — округлые минеральные включения во внешней зоне циркона (изображение в обратно-отраженных электронах); m — округлые минеральные включения во внешней зоне циркона (изображение в обратно-отраженных электронах); m — округлые минеральные включения во внешней зоне циркона (изображение в обратно-отраженных электронах). Міса — слюда, Ttn — титанит, Rt — рутил, Qz — кварц, Xtm — ксенотим, Zrm — циркон. **Fig. 4.** Association of zircon crystals with titanium-bearing and rare earth minerals: a — isometric accumulation of titanium-bearing minerals and zircon in a fuchsite aggregate; δ — the same in reflected light without an analyzer with marks of zircon crystals used for geochronological data, the results are shown on figure 15; e — the same with an analyzer; e — the same, BSE image, d — rounded mineral inclusions in the zonal structure of zircon (BSE image), m — rounded mineral inclusions in the outer zone of zircon (BSE image), m — rounded mineral inclusions in the outer zone of zircon (BSE image), m — rounded mineral inclusions in the outer zone of zircon (BSE image),

преимущественно в пробе из метагравелитов, но иногда выявляемых и в пробах из метариолитов. Каких-либо визуальных отличий кристаллов циркона, выделенных из темно-серых и светло-серых метариолитов не отмечается.



Рис. 5. Катодолюминесцентные микрофотографии изученных зерен циркона, вскрытых непосредственно в аншлифах. Кругами отмечено положение аналитических кратеров (диаметр 25 мкм). **Fig. 5.** Cathodoluminescent micrographs of the analyzed zircon grains uncovered directly in polished sections. Circles mark the position of analytical craters (25 microns in diameter).

Анализ изотопного состава U-Pb систем в цирконе из мономинеральных проб (табл. 2, рис. 8) показал, что многие датировки можно рассматривать как конкордантные, но они довольно сильно разнесены вдоль конкордии. Для окатанного зерна циркона из метагравелитов (зерно 1.1) был установлен возраст 1.6 млрд лет. Близкий, но с довольно высокой степенью дискордантности (D = 4.0), возраст установлен и для другого окатанного зерна циркона из метариолитов (зерно 2.1). Вероятно, такие древние зерна были захвачены материнской магмой риолитов из глубинных магматических и метаморфических пород, циркон из них такого возраста отмечают и другие исследователи (Пыстин, Пыстина, 2021; Никулова, Хубанов, 2022).

В основной совокупности конкордантных значений можно выделить 3 кластера датировок, относящихся, соответственно, к кристаллам циркона из метагравелитов (зерна 1.2—1.5), из метариолитов (зерна 3.1—3.4, 2.2) и метамиктным зернам циркона из этих же пород (зерна 2.3, 2.4). Существенный разброс конкордантных возрастов циркона из метагравелитов алькесвожской свиты (508—573 млн лет) понятен — это детритовые зерна,

. Analytical data on the isotopic composition of U-Pb systems in zircon from the polished section of metariolites of Chudnoye deposit	D,%		3.3	-0.1	1.2	-0.4	2.6	2.8	7.1	12.7
		lσ	8.2	8.7	8.2	8.3	8.0	8.1	9.3	8.1
	Возраст, млн лет	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	501.1	539.3	501.9	503.1	488.4	489.1	565.8	485.6
		lσ	8.2	8.2	8.0	8.6	8.0	8.8	10.0	9.7
		207 Pb/ 235 U	518.0	539.0	508.2	501.2	501.2	503.1	608.8	556.1
	Изотопные отношения	Th/U	0.99	1.64	0.69	0.64	0.77	0.71	0.68	0.80
		Rho	0.16	0.14	0.16	0.21	0.16	0.22	0.21	0.23
		lσ	0.0014	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0014	0.0016	0.0014
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	0.0808	0.0873	0.0810	0.0812	0.0787	0.0788	0.0917	0.0782
		1σ	0.0134	0.0137	0.0131	0.0139	0.0129	0.0142	0.0179	0.0165
		207 Pb/ 235 U	0.6656	0.7003	0.6496	0.6382	0.6382	0.6413	0.8213	0.7292
		lσ	0.0014	0.0013	0.0013	0.0014	0.0013	0.0014	0.0016	0.0017
		207 Pb/ 206 Pb	0.0598	0.0583	0.0583	0.0571	0.0589	0.0591	0.0650	0.0677
	Концентрации, ррт	206 Pb	27	49	36	18	37	18	19	15
		238 U	388	655	512	252	548	257	245	227
		²³² Th	386	1073	354	162	422	181	167	181
able 1.	Ž	гочки	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8

Таблица 1. Аналитические данные по изотопному составу U-Pb систем в цирконе из аншлифа метариолитов месторождения Чудное

Примечание. Нерадиогенный свинец в пробах отсутствует.

Таблица 2. Аналитические данные по изотопному составу U-Pb систем в цирконе из метагравелитов алькесвожской свиты и метариолитов месторождения Чудное Table 2. Analytical data on the isotopic composition of U-Pb systems in zircon from the metagravelites of the Alkesvozhskaya formation and metariolites of the Chudnoye deposit

Пб.	11pooa	МΓ	МΓ	МΓ	МΓ	МΓ	MPT	MPT	MPT	MPT	MPC	MPC	MPC	MPC	обрь/238U)]/ равелиты.
Iv3		1398	3761	4815	4358	567	927	8911	1041	412	3638	560	1955	1555	apacr ⁽² - Metary
D,%		0.1	-0.2	0'0	0.7	9.0-	4.0	-0.2	9.0-	6.0-	1.1	1.8	-0.5	6.0	: MI –
Возраст, млн лет	lσ	18	13	12	16	11	19	10	5	4	5	7	6	12	ь = 1 epыe
	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1632	571	538	517	507	1436	464	342	338	433	480	440	444	сордантност 1Ты светло-с
	lσ	22	34	31	44	29	26	30	14	6	13	20	28	34	циск
	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1634	570	538	521	504	1496	463	340	335	438	489	438	448	пибок; D— APC—метаן
	Th/U	0.27	1.00	0.93	0.90	0.63	0.52	1.03	0.87	0.39	1.16	0.94	0.78	0.82	ации оі серые; М
	Sho	.46	0.3	0.3	.29	.32	.45	.27	.32	.36	.34	0.3	.28	.31	ppeл9
Изотопные отношения	lσ I	0.004 0	0.002	0.002	0.003 0	0.002 0	0.004 0	0.002 0	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.001	0.002 0	0.002 0	ких точках отсутствуст; Rho — коэффициент кор ивность линии v3 (SiO ₄); MPT — метариолиты тём
	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	0.288	0.093	0.087	0.084	0.082	0.250	0.075	0.055	0.054	0.070	0.077	0.071	0.071	
	lσ	0.111	0.059	0.052	0.072	0.047	0.111	0.046	0.020	0.012	0.020	0.032	0.043	0.052	
	207 Pb/ 235 U	3.999	0.754	0.699	0.670	0.644	3.365	0.578	0.397	0.391	0.540	0.619	0.540	0.554	
	lσ	0.002	0.004	0.004	0.006	0.004	0.003	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	
	207 Pb/ 206 Pb	0.101	0.059	0.058	0.058	0.057	0.098	0.056	0.053	0.053	0.056	0.058	0.055	0.056	в аналитичес льная интенс
нтрации, ррт	^{206}Pb	668.5	29.58	24.19	27.7	131.8	433.7	124.7	792.8	916	343.5	117.2	85.11	92.82	й свинец относите
	238 U	570.3	78.91	68.94	82.74	404	439	402.4	2834	3331	1191	366.8	291.3	314.6	югенный 00; Iv3 —
Конце	232 Th	153.03	79.24	64.3	74.81	255.16	228.86	416.07	2466.9	1297.7	1383.3	343.32	228.3	257.94	e. Hepanu ^{b/235U]}]}×1
№ зерна	циркона	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	Примечани [Возраст ^{(207р}

КОЗЛОВ и др.



Рис. 6. Диаграмма с конкордией для кристаллов циркона, вскрытых непосредственно в аншлифах (месторождение Чудное). Аналитические точки 0.1-0.5 относятся к зернам из аншлифа метариолитовой брекчии (выделены черным контуром), 0.6-0.8 относятся к зернам из аншлифа с локальным скоплением титансодержащих минералов и минералов редкоземельных элементов (выделены синим контуром). **Fig. 6.** Concordia diagram for zircon crystals uncovered directly in polished sections (Chudnoye deposit). The analytical points 0.1-0.5 refer to grains from the polished section of metariolite breccia (highlighted by black contour), 0.6-0.8 refer to grains from the polished section with a local accumulation of titanium-bearing minerals and minerals of rare earth elements (highlighted by blue contour).

попавшие в осадочную толщу при разрушении гранитоидов, интервал формирования которых составляет 564—516 млн лет (Кузнецов и др., 2005). Датировки около 330 млн лет, получены при анализе бурых сильно трещиноватых метамиктных зерен циркона из темно-серых метариолитов (2.3 и 2.4), которые содержат на порядок больше урана по сравнению с остальными кристаллами (см. табл. 2). Метамиктный распад кристаллов циркона существенно снижает их устойчивость при наложенных метаморфических процессах (Ризванова и др., 2007; Каулина, 2010; Каулина и др., 2011), что не позволяет связывать эти значения возраста с конкретными геологическими событиями.

Основной кластер зерен циркона, включающий кристаллы из темно-серых и светло-серых золотоносных метариолитов (рис. 8, табл. 2), соответствует рассчитанному





Fig. 7. Cathodoluminescent micrographs of the analyzed zircon grains from monomineral samples. Circles mark the position of analytical craters (25 microns in diameter).

возрасту 441 \pm 4 млн лет с общим диапазоном 436—478 млн лет. Этот возраст заметно меньше возраста вмещающих их метариолитов, верхняя возрастная граница которых не моложе перекрывающих их отложений алькесвожской свиты (ε_3 —O₁), в базальном горизонте которых выявлены гальки метариолитов (Ефанова и др., 1997).

Для корректной интерпретации полученных результатов применительно к возрасту рудной минерализации при микроскопическом изучении руд обращено особое внимание на взаимоотношения золота с цирконом, фукситом, мусковитом (фенгитом), алланитом — минералами, которые использовались для датирования золоторудной минерализации месторождения Чудное (Соболева, 1998; Кузнецов, Андреичев, 1998; Галанкина, 2001; Моралев и др., 2005).

Пространственно-временные взаимоотношения золота с цирконом и другими минералами рудной ассоциации. Изучение циркона в шлифах и аншлифах свидетельствует об его распространении как в безрудных метариолитах, так и в их разновидностях, в различной степени затронутых наложенными процессами. Во внешне однородных метариолитах встречаются идиоморфные зерна циркона, приуроченные часто к локальным линзовидным скоплениям фенгита, что проявляется в появлении буроватых рефлексов в этих участках в отраженном свете (рис. 36).

В золотоносных существенно фукситовых агрегатах кристаллы циркона приурочены преимущественно к микрозернистым локальным скоплениям титановых и редкоземельных минералов (рис. 4, 9). Преобладающими минералами в них являются титанит



Рис. 8. Диаграмма с конкордией для зерен мономинеральных проб циркона из метариолитов месторождения Чудное и метагравелитов алькесвожской свиты: a — полномасштабный вид, δ — интервал 600— 300 млн лет в увеличенном масштабе. Различные пробы выделены разными цветами эллипсов ошибок. **Fig. 8.** Concordia diagram for grains of monomineral zircon samples from metariolites of the Chudnoye deposit and metagravelites of the Alkesvozhskaya suite: a — full-scale view, δ — the interval of 300—600 Ma in an enlarged scale. Different samples are highlighted with different colors of error ellipses.

и рутил (возможно и другие полиморфные модификации TiO_2). Редкоземельные минералы представлены фосфатами редких земель, которые образуют самостоятельные зерна или обрастают кристаллы циркона (рис. 4*e*). Кристаллы циркона обычно

идиоморфны, их размер в этих агрегатах достигает 50 мкм, на BSE-изображении выявляется слабоконтрастное зональное строение (рис. 4∂ , e). В кристаллах отмечаются округлые поры и заливообразные углубления на их периферии, заполненные окружающим минеральным веществом (рис. 4ω).

Кристаллы циркона в виде цепочечных выделений часто приурочены к контактам золотоносных фукситовых прожилков (рис. 9a, δ , e), где находятся в ассоциации с титанитом и уран-титановыми минералами с примесью тяжелых редких земель (до 15 мас.% HREE₂O₃) и ниобия (6—7 мас.% Nb₂O₅). Агрегаты этих минералов микрозернистые, что не позволяет достаточно надежно определить их состав. Золото в рассматриваемом случае не контактирует с зернами циркона и в фукситовом агрегате наследует от чешуйчатых кристаллов слюды ориентировку и пластинчатую форму индивидов (рис. 9a, δ). Взаимоотношение золота и циркона и золота, находясь в фукситовом



Рис. 9. Пространственные взаимоотношения циркона и золота с другими минералами: a - приуроченность кристаллов циркона к контакту золотоносного фукситового прожилка с метариолитами (изображение в обратно-отраженных электронах), $\delta -$ то же в отраженном свете с анализатором, e контакт идиоморфного кристалла циркона с золотом в фукситовом агрегате (изображение в обратноотраженных электронах); e - изометричные золотины в метариолите у контакта с фукситовым агрегатом, в котором преобладают тонкие пластинчатые выделения золота (отраженный свет без анализатора). Au – золото, Mica (Fuc) – слюда (фуксит), Ttn? – титанит(?), Qz – кварц, Fsp – полевой шпат, Zrn – циркон. **Fig. 9.** Spatial relationships of zircon and gold with other minerals: a - the proximity of zircon crystals to the contact of a gold-bearing fuchsite vein with metariolites (BSE image), $\delta -$ the same in reflected light with an analyzer, e - contact of an idiomorphic zircon crystal with gold in a fuchsite aggregate (BSE image), e - isometric gold in metariolite at contact with a fuchsite aggregate with thin lamellar gold segregations (reflected light without analyzer). Au – gold, Fuc – fuchsite, Ttn? – titanite (?), Qz – quartz, Fsp – feldspar, Zrn – zircon.

агрегате, контактируют между собой. Если последовательность образования этих минералов оценивать по их относительному идиоморфизму, то в этом временном ряду они выстраиваются в следующем порядке: циркон — фуксит — золото.

При макроскопическом знакомстве с рудами месторождения Чудное отмечается приуроченность золота исключительно к фукситу. На эту особенность обращают внимание все исследователи месторождения, часто рассматривая ее как признак сингенетичности этих минералов. Однако микроскопическое изучение руд показывает, что часто, в большей степени, чем фуксит, тонким золотом обогащены агрегаты и отдельные индивиды алланита (рис. 10*a*). В рудах месторождения Чудное выделяется от 3 до 5 генераций алланита (Шумилов, Остащенко, 2000), но золото связано только с одной из самых ранних. Взаимоотношение алланита этой генерации с золотом в большей степени свидетельствует об их близодновременном образовании и о более раннем образовании золото-алланитового агрегата по отношению к фукситу. Последняя



Рис. 10. Взаимоотношение золота с алланитом и мусковитом (фенгитом): a — агрегат алланита с обильным тонким золотом в фуксите (отраженный свет без анализатора); δ — стерильный в отношении золота сноповидный агрегат алланита поздней генерации, рассеченный кварцевым прожилком (отраженный свет с анализатором); e — выделение золота среди идиоморфных кристаллов железистого мусковита (фенгита) (отраженный свет с анализатором); e — выделение золота среди идиоморфных кристаллов железистого мусковита (фенгита) (отраженный свет с анализатором); e — высокопробное золото на границах зерен его более низкопробной разновидности (изображение в обратно-отраженных электронах). Aln — алланит, Au — золото, Fsp — полевой шпат, Hem — гематит, Mica (Fuc) — слюда (фуксит), Mica (Ms) — слюда (мусковит-фенгит), Qz — кварц. Fig. 10. Relationship of gold with allanite and muscovite (phengite): a — an allanite aggregate with abundant fine gold particles in fuchsite (reflected light without analyzer); e — late-generation sheaf-shaped allanite aggregate, crossed by a quartz vein, sterile in relation to gold (reflected light with analyzer); e — gold segregation among idiomorphic crystals of ferruginous muscovite (phengite) (reflected light with analyzer); e — the high-grade gold at the grain boundaries of its low-grade variety (BSE image). Aln — allanite, Au — gold, Fsp — feldspar, Hem — hematite, Fuc — fuchsite, Ms — muscovite-phengite, Qz — quartz.

генерация сноповидного крупнокристаллического алланита стерильна в отношении золота, кристаллы этой генерации не завершают минералообразующий процесс и рассекаются прожилками более позднего кварца (рис. 106).

Золото встречается не только в фуксите, оно выявляется непосредственно в метариолите, где обычно представлено изометричными зернами (рис. 9*г*), ассоциирует с кальцитом, бесхромовым железистым мусковитом (фенгитом), в чешуйчатых агрегатах которого выполняет мелкие полости (рис. 10*в*). Эти взаимоотношения однозначно указывают на более позднее, по отношению к фенгиту, образование золота. Ситуация усложняется в связи с многостадийностью проявления минерализации: выделяется несколько генераций алланита, фуксита, по крайней мере две генерации золота (рис. 10*г*). Проведенное изучение руд месторождения Чудное свидетельствует о невозможности дать однозначный ответ на вопрос о сингенетичности золота и минералов, используемых для изотопно-геохронологических исследований.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В большинстве публикаций определение возраста Au-Pd оруденения месторождения Чудное опирается на результаты изотопно-геохронологических исследований, а за возраст оруденения принимается определенный одним из этих методов возраст вмещающих оруденение метариолитов или минералов из предполагаемой рудной ассоциации: циркона, фуксита, мусковита, альбита, алланита. При этом временные взаимоотношения этих минералов с золотом в достаточной мере не обосновываются, а отмечается преимущественно их пространственное совмещение.

Была предпринята попытка определения возраста непосредственно золота из рядом расположенного Нестеровского месторождения (U-Th)/Не методом, в результате которого получены две датировки: 283 и 297 млн лет (Шуколюков и др., 2010). Однако Нестеровское месторождение является метаморфизованной палеороссыпью, залегающей в породах алькесвожской свиты верхнекембрийско-нижнеордовикского возраста (Никулова, Хубанов, 2022), и находки в ней более молодого золота противоречат достоверно установленным геологическим данным.

Интерпретация полученных изотопно-геохронологических данных часто весьма неопределенна. Например, методом ³⁹Ar/⁴⁰Ar датирования фуксита возраст Au-Pd-REE-оруденения оценивается как равный или моложе 253.94 ± 0.39 млн лет (Моралев и др., 2005). Отмечается также, что полученное по этим же пробам значение возраста в 264.96 \pm 0.46 млн лет является новой для региона датировкой и фиксирует ранее не распознававшееся гидротермальное событие, а появление высокотемпературных ступеней на спектре кажущихся возрастов дало основание предполагать, что фуксит древнее 300 млн лет. Эти противоречивые выводы получены при изучении двух проб фуксита, отобранных из однотипных руд участка Славный месторождения Чудное. Значение возраста порядка 249 млн лет получено Rb-Sr методом по изохроне, построенной на результатах анализа проб альбита, фуксита, мусковита и риолита, рассматривается как время проявления оруденения без обоснования отнесения этих образцов к рудному парагенезису (Кузнецов, Андреичев, 1998).

Сложность обоснования сингенетичности Au-Pd минерализации и минералов рудной ассоциации, доступных для изотопно-геохронологических исследований, а также отсутствие отработанных методик датирования непосредственно золота, требует поиска дополнительных аргументов для решения вопроса о возрасте оруденения.

Учитывая признанный большинством исследователей гидротермальный генезис золото-палладиевого оруденения (Тарбаев и др., 1996; Галанкина, 2001; Суренков, 2003; Борисов, 2005), необходимо проанализировать результаты геохронологических исследований широко проявленных термальных (магматических, метаморфических, гидротермальных) событий рифей-палеозойского возраста на Приполярном Урале, с локальным проявлением которых можно связать и золото-палладиевую минерализацию. Наиболее ярко на Приполярном Урале проявлен доверхнеордовикский магматизм и связанные с ним гидротермальные, в том числе и рудообразующие, процессы (Душин, 2021). Немногочисленные U-Pb датировки циркона гранитоидов Приполярного Урала свидетельствуют о их венд-кембрийском возрасте. По последним данным возраст гранитов хребта Малдынырд составляет 551 млн лет, а риолитов малдинского комплекса 495 \pm 4 млн лет, что дало основания предполагать их аналогию с позднекембрийско-раннеордовикскими гипабиссальными комплексами Полярного Урала, образовавшимися в начале рифтогенной стадии уралид (Соболева, 2020).

Полученные нами результаты датирования циркона в приполированных образцах немногочисленны, но хорошо согласуются с этими данными и с результатами датирования представительной выборки (92 анализа) детритовых зерен циркона из алькесвожской свиты, перекрывающей рудовмещающие метариолиты, на гистограмме плотности распределения изотопных датировок которых два максимума соответствуют значениям 501 и 539 млн лет (Никулова, Хубанов, 2022).

Близкий результат (максимумы 543 и 516 млн лет) получен по детритовым зернам циркона из базального горизонта уралид хребта Сабля (Никулова и др., 2016). Исследование детритовых зерен циркона из ордовикских песчаников, залегающих на расположенном южнее гранитном массиве Маньхамбо, также показало близкий результат: из 54 конкордантных значений 38 зерен (~70% выборки) представляют раннекембрийскораннеордовикский интервал 550—474 млн лет с максимумом плотности вероятности 510 млн лет (Удоратина и др., 2022). Эти данные хорошо согласуются с результатами обобщения полученных в последнее десятилетие U-Pb возраста циркона гранитоидов севера Урала, в соответствии с которым для Приполярного Урала установлены два наиболее ярко проявленных интервала их образования 625—600 и 550—525 млн лет (Udoratina et al., 2021).

Сложнее ситуация с определением возраста палеозойских эндогенных событий. В серии публикаций В. Л. Андреичева (1999, 2010) было доказано, что К-Аг система допалеозойских гранитоидов была практически полностью переуравновешена в позднем палеозое и полученный на ее основе возраст (около 250 млн лет) соответствует наиболее мощно проявившемуся в палеозое на Приполярном Урале эндогенному событию, с которым связан зеленосланцевый метаморфизм и однофациальный диафторез домезозойских комплексов осевой зоны Приполярного Урала. Сопоставляя полученные различными изотопно-геохронологическими методами результаты определения возраста гранитоидов Приполярного Урала, В.Л. Андреичев (2010) приходит к выводу о том, что результаты датирования с использованием Rb-Sr системы, полученные по породе в целом, всегда моложе возрастов, определенных по циркону (U-Pb система) для тех же гранитоидов. Например, К-Аг датировки расположенного несколько южнее месторождения Чудное Малдинского гранитного массива дали значения возраста 279 млн лет, Rb-Sr датировки — 485 и 431 млн лет, а возраст, полученный по циркону TIMS-методом, 584 ± 9 млн лет (Андреичев, 1999, 2010). Выявляется достаточно четкая закономерность, которая сводится к тому, что К-Аг система допалеозойских магматитов с возрастом 600—500 млн лет была полностью переуравновешена в позднем палеозое на возраст около 250 млн лет. Более устойчивая к наложенным процессам Rb-Sr изотопная система при анализе по породе в целом дает промежуточные результаты, но в отдельных случаях, вероятно при анализе наиболее измененных пород, возраст омолаживается до 250 млн лет, что характерно и для Rb-Sr изохрон, полученных по отдельным минералам (Кузнецов, Андреичев, 1998).

Приведенные материалы позволяют с высокой степенью достоверности предполагать наличие трех отчетливо проявленных термальных событий в венд-палеозойской истории Приполярного Урала: 550—525 млн лет — завершающий этап доуральского магматизма; около 500 млн лет — образование вулканитов малдинского комплекса, в связи с рифтогенными процессами ранних уралид; около 250 млн лет — регрессивный этап зеленосланцевого метаморфизма домезозойских комплексов и однофациального диафтореза в пределах наиболее флюидопроницаемых структур.

Исследования U-Pb методом по циркону и Rb-Sr изохронным методом в ряде случае приводят к получению промежуточных палеозойских датировок. С использованием Rb-Sr метода были изучены доордовикские метаморфические породы с целью выявления основных этапов их метаморфического преобразования (Юдович и др., 1995). По четырем полученным изохронам определен возраст метаморфизма, соответствующий 928 ± 16 , 397 ± 13 , 395 ± 8 и 255 ± 16 млн лет. Rb-Sr методом для риолитов месторождения Чудное получен возраст 390 млн лет, который, по предположению авторов, соответствует времени проявления метаморфизма зеленосланцевой фации (Кузнецов, Андреичев, 1998). В результате обобщения изотопно-геохронологических данных по породам Приполярного Урала был выделен этап зеленосланцевого метаморфизма с возрастом 400 млн лет (Пыстин, Пыстина, 2008; Андреичев, 2010). При преобладающем значении около 510 млн лет для детритового циркона из песчаников базального горизонта гранитного массива Маньхамбо, выделился кластер с возрастом 466—415 млн лет, что авторы связывают с влиянием постдиагенетических гидротермально-метасоматических процессов, исказивших их изотопные соотношения (Удоратина и др., 2022). По циркону мономинеральных проб из метариолитов нами также были получены в том числе и промежуточные конкордантные значения в диапазоне 478—436 млн лет, объяснить которые довольно сложно. На аналогичную ситуацию обратил внимание Л.К. Левский, отметивший, что «значительное увеличение объема экспериментальных данных привело к обнаружению загадочных процессов, которые проявляются как протяженная совокупность конкордантных точек». Он считает, что происхождение подобных сегментов на конкордии следует приписать либо «пульсирующему» магматизму либо «пульсирующему» метаморфизму, приводящему к эпитаксической перекристаллизации и практически непрерывной «микропотере» радиогенных изотопов (Левский, Морозова, 2012). Вариант пульсирующего метаморфизма вполне вероятен для Приполярного Урала, в пределах которого пик зеленосланцевого метаморфизма приходится на конец палеозоя (около 250 млн лет), но общая длительность этого процесса могла быть достаточно большой. Довольно часто выявляемые по изотопно-геохронологическим данным девонские датировки (около 350-400 млн лет), которые обычно связывают с метаморфическим событием (Юдович и др., 1995; Андреичев, 2010), пока не находят геологического подтверждения в истории развития Приполярного Урала.

Образование Au-Pd минерализации месторождения Чудное, наложенной на метариолиты малдинского комплекса, можно связать с одним из отчетливо проявленных эндогенных событий венд-кембрийского (около 500 млн лет) или верхнепалеозойского (около 250 млн лет) возраста. Сделать выбор на основе только изотопно-геохронологических данных невозможно, необходимо привлечение дополнительной геологической информации, которая, как нам представляется, позволяет дать предпочтение одному из этих вариантов.

1. Au-Pd оруденение месторождения Чудное приурочено исключительно к метариолитам, что дает основание предполагать парагенетическую связь этих образований. Проявление золоторудной минерализации в перекрывающих метариолиты фукситизированных метагравелитах и метапесчаниках базальной части алькесвожской свиты отмечаются весьма локально, и их образование можно связать с локальным перераспределением золота при наложении верхнепалеозойского метаморфизма. В кварцито-песчаниках вышезалегающей тельпосской свиты раннего ордовика золоторудная минерализация уже не распространяется (Ефанова, 2001). 2. Золото, фуксит, цинкохромит и другие типоморфные минералы руд месторождения Чудное выявлены в отдельных горизонтах алькесвожской свиты, что предполагает их поступление в осадочную толщу при разрушении первичных руд месторождения Чудное (Онищенко, 2011).

3. На Приполярном Урале не выявлено ни одного эндогенного месторождения в интервале от ордовика до перми кроме месторождения Чудное, которое связывается с трахибазальт-трахириолитовым косвожско-пагинским (D-C_{1?}) комплексом (Душин, 2021), магматиты которого в осевой зоне Приполярного Урала не выявлены. Кроме того, довольно сложно представить эндогенный процесс, породивший только месторождение Чудное, и не оставивший никаких других следов в геологической истории Приполярного Урала.

Приведенные аргументы в большей степени свидетельствуют о связи Au-Pd оруденения месторождения Чудное с венд-кембрийским этапом тектоно-магматической активизации Приполярного Урала и о его парагенетической связи с малдинским базальт-риолитовым комплексом.

выводы

1. В геологической истории венда-палеозоя палеоконтинентального сектора Приполярного Урала выделяются три значимых эндогенных события, возраст проявления которых подтверждается данными изотопно-геохронологических исследований и согласуется с геологическими наблюдениями: 550—525 млн лет — завершающий этап доуральского магматизма; около 500 млн лет — образование вулканитов малдинского комплекса, в связи с рифтогенными процессами ранних уралид; около 250 млн лет — пик амагматичного флюидного импульса, определившего проявление зеленосланцевого метаморфизма домезозойских комплексов и однофациального диафтореза в пределах наиболее флюидопроницаемых структур.

2. Изотопно-геохронологические методы не позволяют сделать однозначный вывод о возрасте золото-палладиевого оруденения месторождения Чудное, поскольку невозможно установить достоверные критерии сингенетичности золота и минералов, используемых для датирования.

3. Анализ результатов изотопно-геохронологических исследований с учетом особенностей геологического развития Приполярного Урала и его минерагении позволяет достаточно уверенно связывать образование месторождение Чудное с кембрийским этапом эндогенной активизации Приполярного Урала (около 500 млн лет), который соответствует началу рифтогенной стадии уралид.

4. Раннепалеозойский возраст золото-палладиевой минерализации предполагает наложение на нее процессов выветривания в позднем кембрии и неизбежное преобразование структурно-текстурных и минеральных особенностей руд в результате проявления зеленосланцевого метаморфизма, пик которого приходится на верхний палеозой (около 250 млн лет). Следовательно, наблюдаемые в рудах пространственновременные взаимоотношения минералов и их видовой состав не отражают в полной мере первичные особенности рудной минерализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреичев В. Л. Изотопная геохронология доуралид Приполярного Урала. Сыктывкар, **1999**. 48 с. *Андреичев В. Л.* Геохронология гранитоидного магматизма Приполярного Урала // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. **2010**. Т. 191. № 11. С. 7—12.

Борисов А. В. Геолого-генетические особенности Au-Pd-REE рудопроявлений хр. Малдынырд (Приполярный Урал). Автореф. дис. ... канд. г.- м. н. Москва, **2005**. 22 с.

Галанкина О. Л. Особенности минералогии палладий-золотых проявлений Приполярного Урала. Автореф. дис. ... канд. г.- м. н. СПб, **2001**. 21 с.

Душин В.А. Металлогения Ляпинского мегаблока (Приполярный Урал) // Известия УГГУ. **2021**. Т. 62. № 2. С. 88—105.

Ефанова Л. И. Алькесвожская толща на севере Урала, стратиграфия, литология, металлоносность. Автореф. дисс. ... канд. г.-м. н. Сыктывкар, **2001**. 19 с.

Ефанова Л. И., Юдович Я. Э., Котельникова Е. А. Новые данные о возрасте риолитов хр. Малдынырд (Приполярный Урал) / Гранитоидные вулканоплутонические ассоциации: петрология, геодинамика, металлогения: информ. матер. Всеросс. совещ. 21—23 мая 1997 г. Сыктывкар: Геопринт, 1997. С. 36—38.

Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: Кольский НЦ РАН, **2010**. 144 с.

Каулина Т. В., Синай М. Ю., Савченко Е. Э. Метасоматические замещения и изотопные соотношения в кристаллах циркона и кристаллогенетические модели // ЗРМО. 2011. Т. 140. № 1. С. 36—48.

Кузнецов Н. Б., Соболева А.А., Удоратина О. В., Герцева М. В. Доордовикские гранитоиды Тимано-Уральского региона и эволюция протоуралид и тиманид. Сыктывкар: Геопринт, **2005**. 100 с.

Кузнецов С.К., Андреичев В.Л. Возраст золото-фукситовой минерализации в риолитах хребта Малдынырд / Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов: материалы Всероссийской конференции, Сыктывкар, 17—19 февраля 1998 года. Сыктывкар: Геопринт, **1998**. С. 18—19.

Кузнецов С. К., Майорова Т. П., Сокерина Н. В., Глухов Ю. В. Золотоносные районы западного склона севера Урала и Тимана // Известия Коми НЦ УрО РАН. **2018**. Т. 36. № 4. С. 81—94.

Левский Л. К., Морозова И. М. К интерпретации данных U—Pb метода для цирконов. / Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов. Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии. Москва: ИГЕМ РАН, **2012**. С. 211—214.

Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В., Тарбаев М. Б., Пономарчук В.А. Первые ³⁹Аг/⁴⁰Агдатировки слюд Аи-Pd-P3Э-проявления Чудное (Приполярный Урал) // Докл. РАН. **2005**. Т. 400. № 2. С. 243—246.

Никулова Н. Ю., Симакова Ю. С. Геохимические особенности пород зоны межформационного контакта уралид/доуралид в верховье реки Тельпос // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. **2007**. Т. 153. № 9. С. 9–12.

Никулова Н. Ю., Удоратина О. В., Хубанов В. Б. Возраст песчаников в основании разреза уралид на хр. Сабля (Приполярный Урал) по результатам U-Pb датирования детритных цирконов. // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. **2016**. Т. 91. № 1. С. 15—23.

Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б. Первые U/Pb-данные о возрасте детритового циркона из песчаников золотоносной верхнекембрийско-нижнеордовикской алькесвожской толщи (Приполярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. **2022**. Т. 329. № 5. С. 3—10.

Онищенко С.А. Минералы хрома в отложениях алькесвожской свиты на хребте Малдынырд / Минеральные индикаторы литогенеза: Материалы российского совещания с международным участием. Сыктывкар. **2011**. С. 114—117.

Онищенко С.А., Кузнецов С.К. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. **2019**. Т. 294. № 6. С. 20—27.

Онищенко С.А., Кузнецов С.К. Самородное золото Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия) // Геология и геофизика. **2023**. Т. 64. № 2. С. 233—254.

Онищенко С.А., Кузнецов С.К., Тропников Е. М. Эпигенетические изменения медистого золота в структуре распада Au–Ag–Cu–Pd-твердого раствора // Докл. РАН. Науки о Земле. **2020**. Т. 492. № 2. С. 35–38.

Онищенко С. А., Онищенко Л. В., Ефанова Л. И., Артеева Т. А. Золоторудное месторождение Чудное на Приполярном Урале / Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI съезда Республики Коми. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, **2014**. Т. 3. С. 172—175.

Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. **2008**. № 6. С. 25—38.

Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Геохронология докембрийских образований севера Урала // Вестник геонаук. **2021**. Т. 315. № 3. С. 3—10.

Ризванова Н. Г., Гайдамако И. М., Левченков О. А., Безмен Н. И., Макеев А. Ф., Левский Л. К. Взаимодействие метамиктного циркона с флюидами разного состава // Геохимия. 2007. № 5. С. 522—534.

Соболева А.А. Новые данные о риолитах и гранитах севера Урала / Магматизм и геодинамика. Екатеринбург: УрО РАН, **1998**. С. 108—118.

Соболева А.А. Результаты U–Pb (SIMS)-датирования циркона из гранитов и риолитов хр. Малдынырд, Приполярный Урал / Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения 2020): Мат. российской конференции с международным участием (7—10 декабря 2020 г.). Сыктывкар: Геопринт, **2020**. С. 63—65.

Суренков С. В. Условия образования и источники рудного вещества Au-PGE-REE рудопроявлений Алькесвожской площади (Приполярный Урал). Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. Москва, **2003**. 23 с.

Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Моралев Г. В. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала // Геология рудных месторождений. **1996**. Т. 38. № 1. С. 15—30.

Удоратина О. В., Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б. Возраст рудных метапесчаников (Маньхамбо, Северный Урал) / Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов. Материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии (Санкт-Петербург, 7—10 июня 2022 г). СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, **2022**. С. 163—165.

Шуколюков Ю. А., Якубович О. В., Яковлева С. З., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Рыцк Е. Ю. Прямое изотопное датирование (U-Th)/Не методом самородного золота / Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований. Всероссийская конференция, посвященная 100-летию Н. В. Петровской. Т. II. Москва: ИГЕМ РАН, **2010**. С. 307–309.

Шумилов И. Х. Источники вещества при минералообразовании золоторудного проявления Чудное. // Труды Института геологии Коми научного центра УрО РАН. **1999**. № 103. С. 126–133.

Шумилов И.Х., Остащенко Б.А. Минералого-технологические особенности Au-Pd-TR оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар: Геопринт. 2000. 104 с.

Юдович Я. Э., Андреичев В. Л., Мерц А. В., Кетрис М. П. Новые данные о возрасте метаморфизма доуралид Приполярного Урала / Магматические и метаморфические комплексы севера Урала. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН. **1995**. С. 52—67.

Юдович Я. Э., Козырева И. В., Кетрис М. П., Швецова И. В. Геохимия РЗЭ в зоне межформационного контакта на хр. Малдынырд (Приполярный Урал) // Геохимия. **2001**. Т. 39. № 1. С. 1—13.

Problems of Dating the Au-Pd Mineralization of the Chudnoye Deposit (the Subpolar Urals)

© 2024 A. V. Kozlov^{a, *}, V. D. Korznikov^{a, **}, V. V. Smolensky^a, S. K. Kuznetsov^b, A. A. Savichev^c, A. S. Ivanov^a, E. A. Vasiliev^a

^a Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia ^b Institute of Geology of Komi Science Centre, Ural Branch RAS, Syktyvkar, Russia ^c OOO UK Polyus, Moscow, Russia *e-mail: akozlov@spmi.ru **e-mail: korznikov vd@pers.spmi.ru

The ages values of the minerals that make up the ores of the Chudnoe deposit, established using isotope geochronology methods, do not allow us to correctly estimate the time of formation of Au-Pd mineralization due to the lack of reliable signs of their syngeneticity with gold. Based on linking isotope-geochronological data with the history of the geological development of the Subpolar Urals and the entire complex of endogenous and exogenous processes which determined the features of its geological structure and minerageny, the Early Paleozoic age of mineralization is substantiated. The similar age of the metarhyolites hosting the mineralization and felsic volcanites. When studying the mineral composition and structural and textural features of ores, it is necessary to take into account the imposition of post-ore processes, especially the most powerful metamorphism manifested in the Subpolar Urals, the peak of which occurred in the Upper Paleozoic (~250 Ma).

Keywords: Chudnoe deposit, the Subpolar Urals, Au-Pd mineralization, U-Pb dating on zircon, age of mineralization

REFERENCES

Andreichev V. L. Isotopic geochronology of the preuralides of the Subpolar Urals. Syktyvkar, **1999**. 48 p. (*in Russian*).

Andreichev V. L. Geochronology of granitoid magmatism of Subpolar Urals. *Vestnik IG Komi SC UB RAS.* **2010**. Vol. 191. N 11. P. 7–12 (*in Russian*).

Borisov A. V. Geological and genetic features of Au-Pd-REE ore occurrences of the Maldynyrd region (Subpolar Urals). *Ph. D. thesis syn.* Moscow, **2005**. 22 p. (*in Russian*).

Dushin V.A. Metallogeny of the Lyapinsky megablock (Subpolar Urals). *News of the Ural State Mining University.* **2021**. Vol. 62. N 2. P. 88–105 (*in Russian*).

Efanova L. I. Alkesvozhskaya strata in the north of the Urals, stratigraphy, lithology, metallicity. *Ph. D. thesis syn.* Syktyvkar, **2001**. 19 p. (*in Russian*).

Efanova L. I., Yudovich Ya.E., Kotelnikova E.A. New data on the age of rhyolites of the Maldynyrd ridge (Subpolar Urals). In: Granitoid volcanic plutonic associations: petrology, geodynamics, metallogeny: information materials of the All-Russian Meeting. May 21–23, 1997. Syktyvkar: Geoprint, **1997**. P. 36–38 (in Russian).

Galankina O. L. Features of mineralogy of palladium-gold manifestations of the Subpolar Urals. *Ph. D. thesis syn.* St. Petersburg, **2001**. 21 p. (*In Russian*).

Kaulina T.V. Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes. Apatity: Kola SC RAS, **2010**. 144 p. (*in Russian*).

Kaulina T. V., Sinai M. Yu., Savchenko E. E. Metasomatic substitutions and isotope ratios in zircon crystals and crystallogenetic models. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.).* **2011**. Vol. 140. N 1. P. 36–48 (*in Russian*).

Kuznetsov N. B., Sobolev A. A., Udoratina O. V., Gertseva M. V. Preordovik granitoids of the Timan-Ural region and the evolution of the Protouralids-Timanids. Syktyvkar: Geoprint, 2005. 100 p. (in Russian).

Kuznetsov S. K., Andreichev V. L. The age of gold-fuchsite mineralization in the rhyolites of the Maldynyrd ridge. In: *Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and adjacent regions.* Syktyvkar: Geoprint, **1998.** P. 18–19 (*in Russian*).

Kuznetsov S. K., Mayorova T. P., Sokerina N. V. Gold-bearing areas of the western slope of Northern Urals and Timan. Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences. **2018**. Vol. 36. N 4. P. 81–94 (in Russian).

Levsky L. K., Morozova I. M. On the interpretation of the U-Pb method data for zircons. In: Geochronometric isotope systems, methods of their study, chronology of geological processes. Proc. of the V Russian Conference on Isotope Geochronology. Moscow: IGEM RAS, **2012**. P. 211–214 (In Russian).

Ludwig K. R. User's manual for Isoplot/Ex, Version 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*. **2003**. Vol. 4.

Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Tarbaev M. B., Ponomarchuk V.A. The first ³⁹Ar/⁴⁰Ar-dating of micas from the Chudnoe Au-Pd-REE occurrence, near-Polar Urals. *Doklady Russian Acad. Sci.* **2005**. Vol. 400. N 2. P. 243–246 (*in Russian*).

Nasdala L., Pidgeon R. T., Wolf D. Heterogeneous metamictization of zircon on a microscale. Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. Vol. 60. N 6. P. 1091–1097.

Nikulova N. Yu., Khubanov V. B. The first U/Pb data on the age of detritus zircons from sandstones of the gold-bearing Upper Cambrian-Lower Ordovician Alkesvozhskaya strata (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi SC UB RAS.* **2022.** Vol. 329. N 5. P. 3–10 (*in Russian*).

Nikulova N. Yu., Simakova Yu. S. Geochemical features of rocks of the Uralid/preuralid interformational contact zone in the upper reaches of the Telpos River. *Vestnik IG Komi SC UB RAS.* **2007**. Vol. 153. N 9. P. 9–12 (*in Russian*).

Nikulova N. Yu., Udoratina O. V., Khubanov V. B. The age of sandstones at the base of the Uralid section on the Sabre (Subpolar Urals) according to the results of U-Pb dating of detritus zircons Bull. Moscow Soc. Naturalists, Dep. Geol. 2016. N 1. P. 15–23 (in Russian).

Onishchenko S. A. Chromium minerals in the deposits of the Alkesvozhsky formation on the Maldynyrd ridge. In: *Mineral indicators of lithogenesis: Proc. of the Russian meeting with international participation*. Syktyvkar, **2011**. P. 114–117 (*in Russian*). Onishchenko S. A., Onishchenko L. V., Efanova L. I., Arteeva T. A. The Chudnoye gold deposit in the Subpolar Urals. In: Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Materials of the XVI Congress of the Komi Republic. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, **2014**. Vol. 3. P. 172–175 (in Russian).

Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Palladium-gold-sulfide mineralization in andesites at the Chudnoe deposit (Subpolar Urals). Vestnik IG Komi SC UB RAS. 2019. Vol. 294. N 6. P. 20–27 (in Russian).

Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K., Tropnikov E. M. Epigenetic alteration of Cupreous gold in the Au-Ag-Cu-Pd exsolution texture. Doklady Earth Sci. 2020. Vol. 492. N 2. P. 418–421.

Onishchenko S.A., Kuznetsov S. K. Native gold of the Chudnoe gold-palladium deposit (Subpolar Urals, Russia). Russian Geol. Geophys. 2023. Vol. 64. N 2. P. 233–254 (in Russian).

Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. Native gold in the Chudnoe Au-Pd-REE deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, minerals in intergrowth and genesis. *Minerals.* **2021**. Vol. 11. N 5. Paper 451.

Pystin A. M., Pystina Yu. I. Metamorphism and granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Urals segment of the Earth's crust. *Lithosphere.* **2008**. N 6. P. 25–38 (*in Russian*).

Pystin A. M., Pystina Yu. I. Geochronology of Precambrian formations of the north of the Urals. *Vestnik IG Komi SC UB RAS.* **2021**. Vol. 315. N 3. P. 3–10 (*in Russian*).

Rizvanova N. G., Levchenkov O. A., Makeev A. F., Levsky L. K., Gaidamako I. M., Bezmen N. I. Interaction of metamict zircon with fluids of various composition. *Geochem. Int.* **2007**. Vol. 45. N 5. P. 465–477 (*in Russian*).

Shumilov I. H. Sources of matter in the mineral formation of the Chudnoye gold ore manifestation. *Vestnik IG Komi SC UB RAS.* **1999**. N 103. P. 126–133 (*in Russian*).

Shumilov I. Kh., Ostashchenko B.A. Mineral and technological features of Au-Pd-TR mineralization in the Subpolar Urals. Syktyvkar: Geoprint, **2000**. 104 p. (*in Russian*).

Soboleva A.A. New data on rhyolites and granites of the Northern Urals. In: *Magmatism and geodynamics*. Ekaterinburg: UB RAS, **1998**. P. 108–118. (*in Russian*).

Soboleva A. A. Results of U-Pb (SIMS)-dating of zircon from granites and rhyolites of the Maldynyrd region, Subpolar Urals. In: Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin Readings 2020): Proceedings of the Russian conference with international participation (December 7–10, 2020). Syktyvkar: Geoprint, **2020**. P. 63–65 (in Russian).

Surenkov S. V. Conditions of formation and sources of ore matter Au-PGE-REE ore occurrences of the Alkesvozhskaya area (Subpolar Urals). Ph. D. thesis syn. Moscow, **2003**. 23 p. (*in Russian*).

Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Moralev G. V. A new gold-palladium type of mineralization in the Kozhimsky district of the Subpolar Urals. Geol. Ore Deposits. **1996**. Vol. 38. N 1. P. 15–30 (*in Russian*).

Udoratina O. V., Kulikova K. V., Shuyskiy A. S., Soboleva A. A., Andreichev V. L., Golubeva I. I., Kapitanova V. A. Granitoid magmatism in the north of the Urals: U–Pb age, evolution, sources. *Geodynamics* & Tectonophysics. **2021**. Vol. 12. N 2. P. 287–309.

Udoratina O. V., Nikulova N. Yu., Khubanov V. B. Age of ore metasandstones (Mankhambo, Northern Urals). In: Age and correlation of magmatic, metamorphic, sedimentary and ore-forming processes. Proc. of the VIII Russian Conference on Isotope Geochronology (St. Petersburg, June 7–10, 2022). St. Petersburg: Cartographic factory of VSEGEI, **2022**. P. 163–165 (In Russian).

Shukolyukov Yu.A., Yakubovich O. V., Yakovleva S. Z., Kotov A. B., Salnikova E. B., Knyazhk E. Yu. Direct isotopic dating of native gold by (U-Th)/He method. In: Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions of formation of deposits, tasks of applied research. All-Russian Conference dedicated to the 100th anniversary of N. V. Petrovskaya. Vol. II. Moscow: IGEM RAS, 2010. P. 307–309 (In Russian).

Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols. Miner. Mag. 2021. Vol. 85. N 3. P. 291-320.

Yudovich Ya. E., Andreichev V. L., Merts A. V., Ketris M. P. New data on the age of metamorphism of the doralides of the Subpolar Urals. In: Magmatic and metamorphic complexes of the North of the Urals. Syktyvkar: Komi SC UB RAS, **1995**. P. 52–67 (in Russian).

Yudovich Ya.E., Kozyreva I.V., Ketris M.P., Shvetsova I.V. Geochemistry of rare earth elements in the zone of interformational contact in the Maldynyrd Range (Near-Polar Urals) *Geochemistry*. **2001**. Vol. 39. N 1. P. 1–13 (*in Russian*).

Zhang M., Salje E. K.H., Farnan I., Graeme-Barber A., Daniel P., Ewing R. C., Clark A. M., Leroux H. Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study. *Journal of Physics: Condensed Matter.* **2000**. Vol. 8. N 12. P. 1915–1925.