

УДК 552.161

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-7

**ПЕРОВСКИТ ИЗ МРАМОРОВ КОЧУМДЕКСКОГО КОНТАКТОВОГО ОРЕОЛА
СПУРРИТ-МЕРВИНИТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА: ПЕРВЫЙ ОПЫТ
U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ**

А.С. Девятярова, Э.В. Сокол, С.Н. Кох, Е.Н. Нигматулина
*Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. Академика Коптюга 3,
Новосибирск, 630090 Россия; devyatiyarova@igm.nsc.ru*

Статья поступила в редакцию 08.06.2022 г., принята к печати 10.06.2022 г.

**PEROVSKITE FROM SPURRITE-MERWINITE MARBLES
OF THE KOCHUMDEK CONTACT AUREOLE: APPLICATION TO
U-Pb DATING OF A THERMAL EVENT**

A.S. Devyatiyarova, E.V. Sokol, S.N. Kokh, E.N. Nigmatulina
*Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptyuga 3,
Novosibirsk, 630090 Russia; devyatiyarova@igm.nsc.ru*

Received 08.06.2022, accepted 10.06.2022

Аннотация. В статье приведены результаты первых U-Pb геохронологических исследований 60 зерен перовскита из спурритовых мраморов Кочумдекского ореола (В. Сибирь), выполненные методом ЛА-ИСП-МС. Перовскит является доминирующим акцессорным минералом в бедных U и Th мраморах, возникших на контакте с траппами кузьмовского комплекса (юго-западная окраина Тунгусской синеклизы). Минерал химически однороден, характеризуется ограниченными замещениями: $Ti^{4+} \rightarrow Zr^{4+}$ (до 2.5 мол. % $CaZrO_3$) и $Ca^{2+}Ti^{4+} \rightarrow REE^{3+}Fe^{3+}$ (до 1.8 мол. % $REEFeO_3$). Перовскит является главным концентратором Th (до 1550 г/т), U (до 450 г/т), Zr и легких РЗЭ (La + Ce + Pr + Nd); коэффициенты накопления Th и U: $K_{Th} = 516-870$; $K_U = 374$. Полученное значение абсолютного возраста перовскита 248.0 ± 7.2 млн лет согласуется с имеющимся массивом изотопных датировок траппов кузьмовского комплекса.

Ключевые слова: акцессорная минерализация, перовскит, U-Pb датирование, контактовый метаморфизм, мраморы, Кочумдек.

Abstract. The paper presents the results of the first LA-ICP-MS U-Pb geochronological studies of 60 perovskite grains from spurrite marbles of the Kochumdek contact aureole (East Siberia). Perovskite is a dominant accessory mineral of U- and Th-poor marbles, which formed at the contact with traps of the Kuz'movskiy complex (southwestern margin of the Tunguska Syncline). The chemically homogeneous perovskite is characterized by limited substitutions: $Ti^{4+} \rightarrow Zr^{4+}$ (up to 2.5 mol. % $CaZrO_3$) and $Ca^{2+}Ti^{4+} \rightarrow REE^{3+}Fe^{3+}$ (up to 1.8 mol. % $REEFeO_3$). Perovskite is the main host for Th (up to 1550 ppm), U (up to 450 ppm), Ti, Zr, and LREEs (La + Ce + Pr + Nd); the element incorporation ratios are $K_{Th} = 516-870$ and $K_U = 374$. The U-Pb isotopic age of perovskite of 248.0 ± 7.2 Ma is in agreement with isotopic age values of traps of the Kuz'movskiy complex.

Keywords: accessory mineralization, perovskite, U-Pb dating, contact metamorphism, marbles, Kochumdek.

Для цитирования: Девятярова А.С., Сокол Э.В., Кох С.Н., Нигматулина Е.Н. Перовскит из мраморов Кочумдекского контактового ореола спуррит-мервинитового метаморфизма: первый опыт U-Pb датирования термического события. Минералогия, 8(2), 83–95. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-8-2-7

For citation: Devyatiyarova A.S., Sokol E.V., Kokh S.N., Nigmatulina E.N. Perovskite from spurrite-merwinite marbles of the Kochumdek contact aureole: application to U-Pb dating of a thermal event. Mineralogy, 8(2), 83–95. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-8-2-7.

Введение

Перовскит (CaTiO_3 , $Pnma$) – распространенный аксессуарный минерал многих SiO_2 -недосыщенных магматических пород (кимберлитов, лампрофиров, нефелиновых сиенитов, карбонатитов) (Uher et al., 2011; Chakhmouradian et al., 2013; Mitchell et al., 2017; Potter et al., 2018). Он также обычен и для пород контактового метаморфизма – скарнов и мраморов (Перцев, 1977; Uher et al., 2011; Sklyarov et al., 2019). Перовскитовая структура ($A^{12}B^{6}X_3$, где $A^{2+} = \text{Ca, Sr, Ba, Na, REE}$; $B^{4+} = \text{Ti, Sn, Nb, Ta, Zr, Th, U, Fe}^{3+}, \text{Al, Mg}$; $X^{2-} = \text{O, F}$) – уникальна по своей «пластичности», способна в различных сочетаниях включать десятки элементов и толерантна к появлению дефицита/избытка кислорода (Mitchell et al., 2017). Природный перовскит концентрирует рассеянные, редкоземельные и высокозарядные элементы (главным образом, Nb, Ta, Ce, La, Th и U), благодаря чему он, наряду с цирконом и бадделейтом, пригоден для U-Pb изотопного датирования геологических процессов преимущественно методом SHRIMP (Гусев и др., 2019). Однако в последнее время для определения возраста ультраосновных и щелочных магматических пород успешно применяется U-Pb датирование перовскита методом ЛА-ИСП-МС (Cox, Wilton, 2006; Chakhmouradian et al., 2013; Арзамасцев, Ву, 2014; Chen, Simonetti, 2014; Putiš et al., 2015; Potter et al., 2018). Цели данной работы: (1) охарактеризовать макро- и микроэлементный состав перовскита из мраморов Кочумдекского ореола, бедных U и Th; (2) определить уровни накопления перовскитом U, Th и Pb; (3) определить U-Pb возраст перовскита, отвечающий возрасту термического события.

Материалы и методы

Перовскиты из 25 образцов ультравысокотемпературных мраморов Кочумдекского ореола изучены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Целью этих работ наряду с общей характеристикой минерала была оценка его потенциальной пригодности в качестве объекта $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ изотопного датирования. Петрографические наблюдения и оценка количественных соотношений минералов выполнены с использованием петрографических микроскопов исследовательского класса OLYMPUS BX 51 и бинокулярного стереомикроскопа OLYMPUS SZ 51 с осветительным прибором OLYMPUS KL 300 LED.

Сканирующая электронная микроскопия использовалась в качестве базового метода для кристалломорфологического и онтогенического анализа минеральных фаз, а также скрининга размера и примесного состава перовскитов в обширной выборке пород. Химический состав минералов (макрокомпоненты и примеси при уровнях их содержаний порядка 0.3 мас. %) в плоскополированных препаратах, напыленных углеродом, определен с использованием СЭМ MIRA3-LMU (TESCAN ORSAY Holding) с системой микроанализа AZtec Energy Xmax-50+ в Аналитическом Центре ИГМ СО РАН (аналитик М.В. Хлестов). Параметры съемки: ускоряющее напряжение 10 кВ, ток пучка 2 нА, глубина вакуума в камере ~0.01 Па. Диаметр пучка при этих параметрах составлял 1–2 мкм. Время набора спектра обычно составляло ~20 с.

Детальное определение химического состава перовскита (макрокомпоненты и элементы-примеси) и оценка степени его химической однородности были также выполнены с использованием микроанализаторов Camebax-Micro JXA-8100 и JXA-8230 (JEOL, Япония, аналитик Е.Н. Нигматулина). Микрозондовый анализ проведен в двусторонне полированных прозрачных шлифах на эпоксидной смоле толщиной 0.04 см, напыленных углеродом (толщина слоя 15–25 нм). Оптимальные параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток поглощенных электронов – 20 нА, время счета 10 с на каждой аналитической линии, диаметр зонда 2 мкм при глубине вакуума в камере ≤ 0.001 Па. Стандартами служили однородные природные и синтетические фазы (табл. 1). Погрешность определений всех компонентов находилась в пределах 2 отн. %. При определении концентрации примесей достоверными считались концентрации $\geq 3\sigma$. Пределы обнаружения компонентов составляют 0.03–0.21 мас. % (3σ).

Микроэлементный состав представительных образцов каждого типа пород ореола определен методом ИСП-МС на спектрометре Agilent 7700x (США) в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (аналитик К.А. Филиппова). Процедуры анализа и детальная характеристика составов всех типов пород ореола описаны в работах (Сокол и др., 2019; 2022; Sokol et al., 2021). Эта информация была использована при расчете коэффициентов накопления Ti, Zr, U, Th и PЗЭ перовскитом.

Для U-Pb датирования выбраны образцы PT-117 и PT-122 с крупными (50–150 мкм) зернами

Таблица 1
Table 1

Условия рентгеноспектрального микроанализа перовскита и багдадита из пород Кочумдекского ореола

EMPA conditions of perovskite and baghdadite from rocks of the Kochumdek aureole

| Аналитическая линия | Стандарт | Предел обнаружения, мас. % (3σ) | Кристалл анализатор |
|---------------------|--|---------------------------------|---------------------|
| Ti _{Kα} | Ильменит «IL GF-55» | 0.03 | PETJ |
| Mg _{Kα} | Диопсид «B.D.» | 0.03 | TAP |
| Ca _{Kα} | Волластонит | 0.03 | PETJ |
| Mn _{Kα} | Гранат «IGEM» | 0.03 | LIFH |
| Fe _{Kα} | Гранат «IGEM» | 0.03 | LIFH |
| Nb _{Lα} | LiNbO ₃ | 0.06 | PETJ |
| Na _{Kα} | NaLaMoO ₄ | 0.06 | TAP |
| La _{Lα} | NaLaMoO ₄ | 0.06 | LIF |
| Ce _{Lα} | LiCeWO ₄ | 0.06 | LIF |
| Y _{Lα} | Y ₃ Al ₅ O ₁₂ | 0.06 | PETJ |
| Al _{Kα} | Y ₃ Al ₅ O ₁₂ | 0.06 | TAP |
| U _{Ma} | UO ₂ | 0.06 | PETJ |
| V _{Kβ} | V ₂ O ₅ | 0.06 | LIF |
| Sr _{Lα} | Стекло «G1-10» | 0.06 | PETJ |
| Si _{Kα} | Волластонит | 0.06 | TAP |
| Th _{Ma} | ThO ₂ | 0.06 | PETJ |
| Ta _{Lα} | Ta ₂ O ₅ | 0.06 | LIFH |
| Pr _{Lα} | CsPrMoO ₄ | 0.12 | LIFH |
| Nd _{Lα} | RbNbWO ₄ | 0.12 | LIFH |
| Zr _{Lα} | ZrSiO ₄ | 0.21 | PETJ |

перовскита, содержащими U ($X_{\text{cp.}} = 361$ и 40 г/т, соответственно) и Th ($X_{\text{cp.}} = 646$ и 403 г/т, соответственно). Содержания ⁵⁶Fe, ⁹⁰Zr, ¹⁴⁰Ce, ²⁰²Hg, ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²³²Th и ²³⁸U и U-Pb возраст 60 зерен перовскитов определены методом ЛА-ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 4500 в Центральной научной лаборатории Университета Тасмании (г. Хобарт, Австралия) в соответствии с методикой (Potter et al., 2018).

Краткая характеристика контактового ореола и слагающих его пород

Тунгусская синеклиза – классический регион проявления высокотемпературного контактового метаморфизма (Соболев, 1935; Ревердатто, 1970; Kerick, 1991; Grapes, 2011). Внедрение пермо-триасовых траппов в палеозойский осадочный чехол здесь повсеместно сопровождалось метаморфическим, метасоматическим и гидротермальным изменением вмещающих осадков. Контактково-метасоматические ореолы различны по масштабам, типам зональности, минеральному составу и рудо-

носности (Туровцев, 2002; Алексеенко и др., 2010; Egofova, Laturov, 2013). На контактах с дифференцированными интрузиями, отличавшимися высокой флюидонасыщенностью, преимущественно развивались скарны и кальцифиры. Со слабо дифференцированными силлами, напротив, связаны интенсивные контактово-метаморфические преобразования уровня пироксеновых и роговообманковых роговиков при незначительном развитии метасоматитов. Проявления метаморфизма спуррит-мервинитового уровня исключительно редки.

К их числу принадлежит Кочумдекский полizonальный ореол, расположенный на р. Кочумдек (правый приток р. Подкаменной Тунгуски, 62°27'54.59" с.ш., 91°55'42.99" в.д.) (рис. 1). Он приурочен к верхнему контакту дифференцированного траппа кузьмовского комплекса ($v\beta T_1 kz$) и мергелистых известняков нижнекочумдекской подскиты ($S_1 k\check{c} + rs$). Суммарная мощность осадочной толщи ($S-T_1$), залегавшей над Кочумдекским траппом в момент его внедрения в раннем триасе, составляла 700 м, что соответствует давлению ~200 бар (Ревердатто, 1964; Перцев, 1977). Темпе-

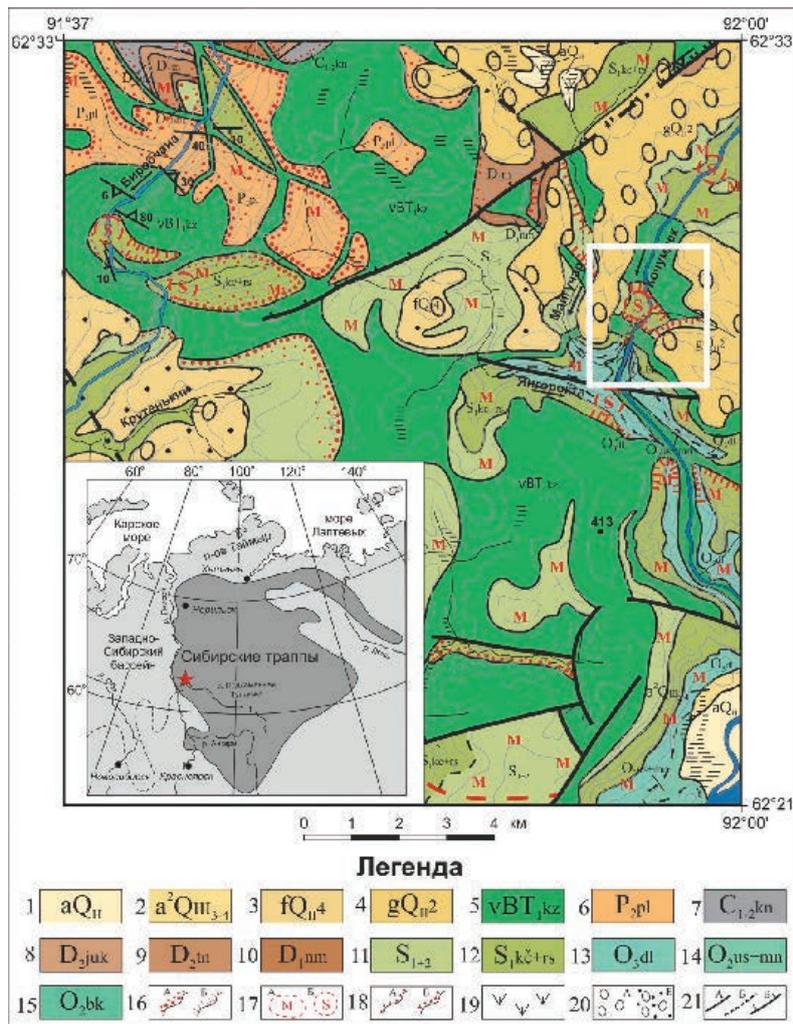


Рис. 1. Область распределения Сибирских траппов (Egorova, Latypov, 2013) и геологическая карта района работ (красная звезда и белый квадрат). Составлена на основе государственной геологической карты СССР масштаба 1:200 000. Туруханская серия. Р-46-XIV (Порядин и др., 1977). Индексы соответствуют легенде государственной геологической карты РФ масштаба 1:1 000 000 (третье поколение), Ангаро-Енисейская серия, лист Р-46, 2010 г.

1–4 – Четвертичные осадки (аллювий, флювиогляциальные, моренные отложения); 5 – раннетриасовые интрузии кузьмовского комплекса; 6–15 – осадочные толщи: 6 – пеляткинская свита (пермь); 7 – кондроминская свита (карбон); 8 – юктинская свита (девон); 9 – тынепская свита (девон); 10 – нимская свита (девон); 11 – нижний и верхний отделы силура (объединенные); 12 – кочумдекская, кулинная, развилкинская свиты нижнего силура (объединенные); 13 – долборская свита (ордовик); 14 – устьстолбовая и мангазейская свиты объединенные (ордовик); 15 – байкитская свита (ордовик); 16–18 – породы и их изменения: 16 – роговики (а), скарнированные породы (б); 17 – метасоматические породы (а), сульфидизация (б); 18 – данные 1981 г. (а) и 2017 г. (б); 19, 20 – четвертичные отложения: 19 – озерно-болотные; 20 – водно-ледниковые (а), ледниковые (б); 21 – тектонические контакты: достоверные (а), предполагаемые (б), достоверные с указанием направления падения поверхности сместителя (в).

Fig. 1. Area of occurrence of Siberian traps after (Egorova, Latypov, 2013) and geological map of the studied area (red star and white square) modified after State Geological Map on a scale of 1: 200 000 (Poryadin et al., 1977). Legend corresponds to the State Geological Map on a scale of 1:1 000 000.

1–4 – Quaternary alluvium, fluvio-glacial, moraine sediments; 5 – Early Triassic intrusions of the Kuz'movsky complex; 6–15 – sedimentary formations: 6 – Permian Pelyatka; 7 – Carboniferous Kondrominskaya; 8 – Devonian Yukta; 9 – Devonian Tynep; 10 – Devonian Nim; 11 – lower and upper parts of the Silurian (combined); 12 – Lower Silurian Kochumdek, Kulina, Razvilka (combined); 13 – Ordovician Dolbor; 14 – Ordovician Uststolbovaya and Mangazeya (combined); 15 – Ordovician Baikit; 16–18 – rocks and their alterations: 16 – hornfels (a), skarns (b); 17 – metasomatic rocks (a), sulfidization (b); 18 – data of 1981 (a) and 2017 (b); 19, 20 – Quaternary sediments: 19 – lacustrine-swamp; 20 – water-glacial (a), glacial (b); 21 – tectonic contacts – proven (a), inferred (b), proven with direction of dip of the displacer surface.

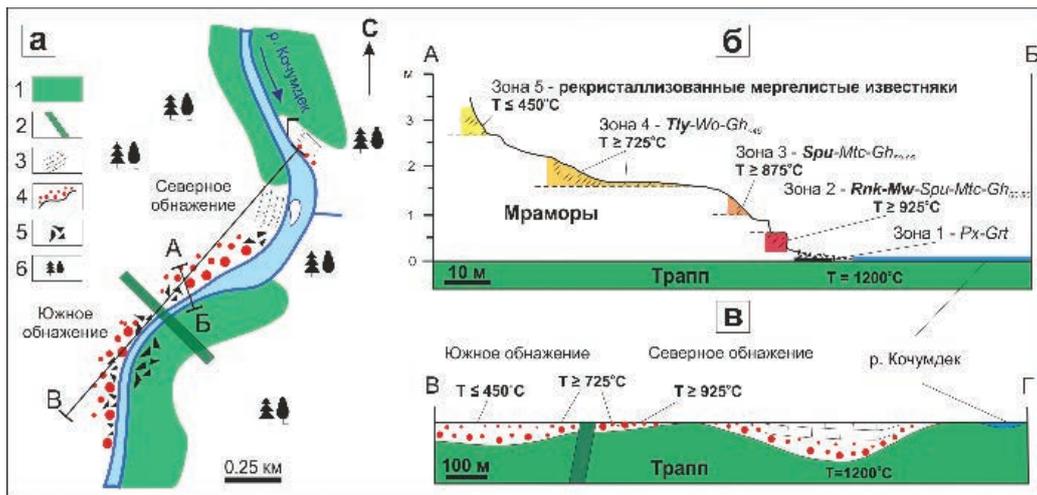


Рис. 2. Крупномасштабная схема района работ (а) и схематические разрезы Кочумдекского контактового ореола по линиям А–Б (б) и В–Г (в); б – температурные реконструкции по данным парагенетического анализа (для $PCO_2 = 0.3–0.4$ Робщ). Штриховкой выделены участки пробоотбора. Левая вертикальная ось – мощность метаморфических зон (м); в – упрощенный профиль кровли кочумдекского траппа.

1 – кочумдекский силл; 2 – секущая дайка; 3 – мергелистые известняки нижнекочумдекской подсвиты; 4 – зона контактово-метаморфических преобразований (крупные и мелкие круги – высоко- и низкотемпературные мраморы, соответственно); 5 – глыбовые развалы; 6 – тайга.

Здесь и на рис. 3: Gh – геленит, Grt – гранат, Mtc – монтичеллит, Mw – мервинит, Px – пироксен, Rnk – ранкинит, Spu – спуррит, Tly – тиллеит, Wo – волластонит.

Fig. 2. Large-scale schematic map of the studied area (a) and cross-sections of the Kochumdek contact aureole along profiles A–B (b) and B–Г (v); б – temperature interpretation according to the paragenetic analysis (for $PCO_2 = 0.3–0.4$ Ptotal). Dash lines – sampling sites. Left vertical axis – thickness of metamorphic rocks (m); в – simplified profile of the top of the Kochumdek trap.

1 – Kochumdek trap; 2 – dike; 3 – marly limestone of the Lower Kochumdek Subformation; 4 – zone of contact metamorphic alterations (large and small circles – high- and low-temperature marbles); 5 – rock blocks; 6 – taiga.

Here and in Fig. 3: Gh – gehlenite, Grt – garnet, Mtc – monticellite, Mw – merwinite, Px – pyroxene, Rnk – rankinite, Spu – spurrite, Tly – tilleyite, Wo – wollastonite.

ратура магмы в момент внедрения силла составляла не менее 1200 °С (Сокол и др., 2019). Разрез высокотемпературных мраморов (мощностью до 3 м) сохранился в провесах кровли траппового тела и был прослежен в полосе ~1.5 км вдоль контакта с траппом. Его характеризует отчетливая вертикальная минералогическая зональность, отражающая высокий температурный градиент (рис. 2). Прерывистая зона скарнирования (зона 1) мощностью до 3 см приурочена к контакту с силлом. Пиковые температуры ($T \geq 925$ °С) достигались в зоне геленит-спуррит-мервинитовых мраморов (зона 2; до 0.5 м от контакта). В спуррит-монтичеллитовых мраморах (зона 3) мервинит сохранился только в виде реликтов ($T \geq 875$ °С; 1.0–1.5 м от контакта). Зону 4 слагают мелилит-тиллеит-волластонитовые мраморы ($T \geq 725$ °С; 1.5–2.8 м от контакта). Детали строения ореола охарактеризованы в работах (Сокол и др., 2019; Sokol et al., 2021).

Мраморы возникли по протолиту мергелистых известняков (Тесаков, 2014). Оба типа пород бедны TiO_2 (≤ 0.35 мас. %); обладают умеренными содержаниями Zr (8.69–135 г/т) и легких РЗЭ (ЛРЗЭ) (La + Ce + Pr + Nd – 11.2–80.0 г/т) и низкими (г/т): Pb (0.44–9.13), Nb (0.96–6.75), Hf (0.20–3.16), Th (0.01–4.65) и U (0.41–2.16). Габброиды из кровли Кочумдекского траппа содержат (г/т): ЛРЗЭ (La + Ce + Pr + Nd – 26.6–72.7); Pb (2.20–10.8), Nb (2.68–8.15), Hf (1.87–5.29), несколько беднее Th (0.48–1.56) и U (0.23–0.68), но богаче TiO_2 (1.13–1.93 мас. %) и Zr (66–196 г/т). Мраморы – свежие, крупнозернистые (0.5–5.0 мм), грубополосчатые породы. Силикатные прослои, состоящие из спуррита, геленита, мервинита и монтичеллита, содержат обильный перовскит и зерна сульфидов Fe, K, Zn, Mn, Pb и Ag. В кальцитовых прослоях присутствуют только мелкие зерна мелилита и перовскита (Sokol et al., 2021).

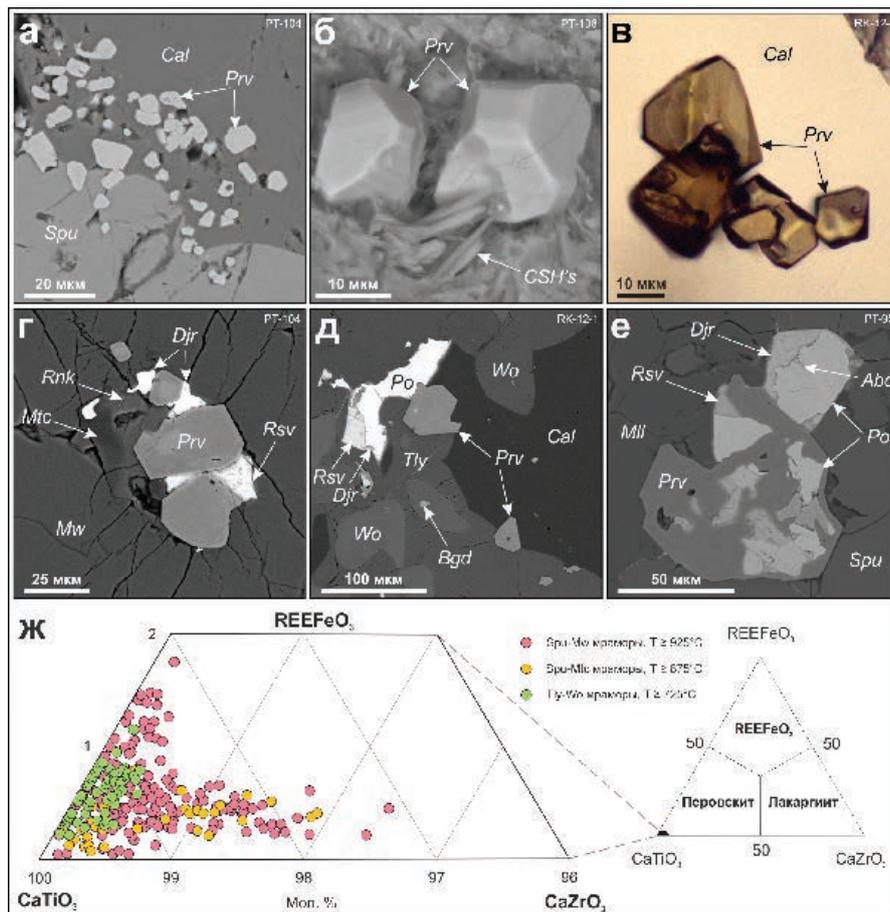


Рис. 3. Особенности морфологии и состава перовскитов из мраморов Кочумдекского контактового ореола: а–в – мелкие псевдооктаэдрические кристаллы перовскита; г, д – кристаллы перовскита в ассоциации с К-Fe сульфидами (г) и мелкими зернами багдадита (д); е – пойкилитовый кристалл перовскита с включениями сульфидов; ж – состав перовскитов в координатах CaTiO_3 - REEFeO_3 - CaZrO_3 (мол. %).

Данные рентгеноспектрального микроанализа. Рис. в – оптическое фото; рис. а, б, г–е – BSE изображения. Abd – алабандин, Bgd – багдадит, Cal – кальцит, CSH's – гидросиликаты Ca; Djr – джерфишерит, Mll – мелилит, Po – пирротин, Prv – перовскит, Rsv – расвумит.

Fig. 3. Peculiarities of morphology and chemical composition of perovskite from marbles of the Kochumdek contact aureole: а–в – small pseudo-octahedral perovskite crystals; г, д – perovskite crystals in assemblage with K-Fe sulfides (г) and small baghdadite grains (д); е – poikilitic perovskite crystal with sulfide inclusions; ж – composition of perovskites (mol. %) on CaTiO_3 - REEFeO_3 - CaZrO_3 diagram.

EPMA data. Fig. в – optical image; figs. а, б, г–е – BSE images. Abd – alabandite, Bgd – baghdadite, Cal – calcite, CSH's – hydrosilicates Ca; Djr – djerfisherite, Mll – melilite, Po – pyrrhotite, Prv – perovskite, Rsv – rasvumite.

Результаты

Перовскит является главным акцессорным минералом кочумдекских мраморов, в которых он образует неравномерную вкрапленность изометричных зерен, псевдооктаэдрических и псевдокубических кристаллов размером от 5–10 до 40–50 мкм (рис. 3а–в). Минерал зачастую приурочен к границам зерен породобразующих минералов и ассоциирует с сульфидами, багдадитом и магнетитом (рис.

3г, д). Реже перовскит образует включения в мелилите, мервините, кальците, спуррите и волластоните. В мраморах вблизи контакта с траппом появляются крупные пойкилокристаллы перовскита (до 150–200 мкм) с включениями кальцита, спуррита, мелилита и сульфидов (рис. 3е).

Состав кочумдекских перовскитов близок к теоретическому (97.1–99.8 мол. % CaTiO_3 , n = 520) и характеризуется ограниченным изовалентным $\text{Ti}^{4+} \rightarrow \text{Zr}^{4+}$ (ряд CaTiO_3 - CaZrO_3) и гетеровалент-

Таблица 2

Представительные анализы перовскита из мраморов Кочумдекского ореола
(по данным рентгеноспектрального микроанализа, мас. %)

Table 2

Representative compositions of perovskite from marbles of the Kochumdek contact aureole (EPMA data, wt. %)

| Тип пород | Spu-Mw мраморы | | | Spu-Mtc мраморы | | | Tly-Wo мраморы | | |
|--|----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|----------------|-------|-------|
| Образец | PT-117 | PT-122 | PT-102 | PT-94 | PT-97 | PT-105 | PT-88 | PT-88 | PT-89 |
| SiO ₂ | 0.08 | <0.06 | 0.16 | <0.06 | 0.45 | 0.16 | 0.35 | 0.12 | 0.19 |
| TiO ₂ | 54.86 | 55.07 | 55.74 | 56.39 | 55.18 | 54.24 | 56.63 | 55.55 | 55.72 |
| Al ₂ O ₃ | 0.32 | 0.27 | 0.20 | 0.18 | 0.21 | 0.22 | 0.28 | 0.29 | 0.34 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.31 | 1.42 | 1.46 | 0.88 | 1.32 | 1.40 | 0.42 | 1.06 | 1.24 |
| V ₂ O ₃ | <0.06 | <0.06 | <0.06 | 0.15 | 0.10 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 |
| CaO | 40.87 | 40.90 | 41.30 | 41.17 | 41.38 | 40.63 | 41.19 | 40.38 | 40.74 |
| La ₂ O ₃ | 0.24 | 0.38 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.10 | 0.07 | 0.33 | 0.11 |
| Ce ₂ O ₃ | 0.64 | 0.76 | 0.19 | 0.25 | 0.23 | 0.18 | 0.18 | 0.69 | 0.23 |
| Pr ₂ O ₃ | 0.16 | 0.15 | <0.12 | <0.12 | <0.12 | <0.12 | <0.12 | <0.12 | <0.12 |
| Nd ₂ O ₃ | 0.40 | 0.41 | <0.12 | <0.12 | <0.12 | 0.14 | <0.12 | 0.32 | 0.21 |
| ΣREE ₂ O ₃ | 1.44 | 1.70 | 0.27 | 0.36 | 0.39 | 0.42 | 0.25 | 1.33 | 0.55 |
| ThO ₂ | 0.57 | 0.26 | 0.14 | 0.07 | 0.15 | <0.06 | <0.06 | 0.10 | <0.06 |
| UO ₂ | 0.34 | 0.39 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 |
| Nb ₂ O ₅ | 0.42 | 0.29 | <0.07 | 0.15 | 0.08 | <0.07 | 0.16 | 0.10 | 0.09 |
| ZrO ₂ | <0.09 | <0.09 | 1.70 | 0.34 | 1.18 | 2.08 | 0.11 | 0.12 | 0.39 |
| Сумма | 100.22 | 100.29 | 100.96 | 99.68 | 100.45 | 99.15 | 99.38 | 99.06 | 99.26 |
| Формульные коэффициенты, рассчитанные на 3 атома О | | | | | | | | | |
| Si | <0.01 | – | <0.01 | – | 0.01 | <0.01 | – | <0.01 | <0.01 |
| Ti | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.97 | 0.94 | 0.94 | 0.97 | 0.9 | 0.96 |
| Al | 0.01 | – | 0.01 | 0.01 | 0.01 | – | – | – | – |
| Fe ³⁺ | 0.02 | – | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | – | – | 0.02 |
| V | – | – | – | <0.01 | <0.01 | – | – | – | – |
| Ca | 1.01 | 1.0 | 1.00 | 1.01 | 1.01 | 1.0 | 1.0 | 1.00 | 1.00 |
| La | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| Ce | 0.01 | 0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | – | <0.01 |
| Pr | <0.01 | <0.01 | – | – | – | – | – | – | – |
| Nd | <0.01 | <0.01 | – | – | – | <0.01 | – | <0.01 | <0.01 |
| Th | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | – | – | <0.01 | – |
| U | <0.01 | <0.01 | – | – | – | – | – | – | – |
| Nb | <0.01 | <0.01 | – | <0.01 | <0.01 | – | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| Zr | – | – | 0.02 | <0.01 | 0.01 | 0.02 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| Миалы (мол. %) | | | | | | | | | |
| CaTiO ₃ | 98.75 | 98.53 | 97.84 | 99.30 | 98.30 | 97.14 | 99.67 | 98.71 | 98.97 |
| REEFeO ₃ | 1.25 | 1.47 | 0.23 | 0.31 | 0.34 | 0.45 | 0.21 | 1.15 | 0.57 |
| CaZrO ₃ | 0.00 | 0.00 | 1.93 | 0.38 | 1.36 | 2.41 | 0.12 | 0.14 | 0.45 |

Примечание. Здесь и в табл. 4, Mtc – монтичеллит, Mw – мервинит, Spu – спуррит, Tly – тиллеит, Wo – волластонит. Прочерк – величина формульного коэффициента не значима.

Note. Here and in Table 4, Mtc – monticellite, Mw – merwinite, Spu – spurrite, Tly – tilleyite, Wo – wollastonite. Dash – the formula coefficient value is insignificant.

ным Ca²⁺Ti⁴⁺ → REE³⁺Fe³⁺ (ряд CaTiO₃–REEFeO₃) замещениями (рис. 3ж). Минимальные содержания примесей присущи перовскитам из **тиллеит-волластонитовых мраморов** (98.7–99.8 мол. % CaTiO₃). Они лишь изредка содержат до 1.04 мас. % Cr₂O₃, до 0.40 мас. % ZrO₂ и до 0.30 мас. % Nb₂O₅; количество (La + Ce + Nd + Pr)₂O₃ составляет <1.35 мас. %. Торий (до 0.25 мас. % ThO₂) обнаружен в единичных зернах. Концентрации UO₂ в перовскитах из мраморов, возникших при умеренных температурах, ниже предела

его обнаружения методом рентгеноспектрального микроанализа (<0.06 мас. %) (табл. 2). Для перовскитов из **спуррит-монтичеллитовых ассоциаций** (97.1–99.7 мол. % CaTiO₃) характерно постоянное присутствие ZrO₂ (0.12–2.16 мас. %), при этом содержание (La + Ce + Nd + Pr)₂O₃ не превышает 0.85 мас. %. Примеси Nb₂O₅ и ThO₂ (до 0.20 мас. %), а также Y₂O₃ (до 0.12 мас. %) отмечены изредка. Концентрации Pr₂O₃ (<0.12 мас. %) и UO₂ (<0.06 мас. %) не превышают пределов их обнаружения (табл. 2). Перовскиты из

наиболее высокотемпературных **спуррит-мервинитовых мраморов** (97.6–99.7 мол. % CaTiO_3) спорадически обладают повышенными концентрациями (мас. %): $(\text{La} + \text{Ce} + \text{Nd} + \text{Pr})_2\text{O}_3$ (до 2.05), ZrO_2 (до 1.70), ThO_2 (до 0.99), Nb_2O_5 (до 0.91) и UO_2 (до 0.39). В них доли миналов CaZrO_3 (до 2.50 мол. %) и REEFeO_3 (до 1.76 мол. %) максимальны (табл. 2; рис. 3ж).

Крупные зерна перовскитов обычно однородны, только в единичных случаях на BSE-снимках их ядра выглядят более светлыми, выявляя некоторое их обогащение тяжелыми элементами (Zr, PЗЭ, U, Th) (рис. 3г). При этом даже на площади одного шлифа отдельные группы зерен перовскита могут значительно отличаться по содержанию элементов-примесей. Эта особенность, вероятнее всего, является следствием неравномерного распределения в осадочном протолите минералов тяжелой фракции (ильменита, лейкоксена, рутила, брукита, анатаза, циркона, граната, эпидота), за счет ресурса которых возникали метаморфические акцессорные Ti и Zr минералы.

В частности, с перовскитом регулярно ассоциирует редкий минерал багдадит. Он наиболее характерен для мраморов зон 4 и 2 ореола (рис. 3д), образует мелкие округлые зерна (от 5–15 до 45 мкм), обычно без огранки. Минерал приурочен к границам породообразующих минералов и реже образует включения в волластоните, мелилите, кальците и спуррите, а также в сульфидах. Багдадит обычен в ассоциации с пирротинитом, раскумитом, джерфишеритом, перовскитом и Ti-(Zr, V) гранатом. Диапазон содержаний главных компонентов варьирует незначительно (мас. %): SiO_2 29.22–29.64; CaO 41.00–41.63; ZrO_2 24.53–28.11.

Характерными примесями являются TiO_2 (0.90–3.10 мас. %) и Nb_2O_5 (0.87–1.82 мас. %); в единичных анализах отмечены HfO_2 (0.65–0.75 мас. %) и FeO (0.10–0.40 мас. %). Состав багдадита отвечает формуле: $\text{Ca}_{2.98-3.03}(\text{Zr}_{0.81-0.94}\text{Ti}_{0.05-0.16}\text{Nb}_{\leq 0.06}\text{Fe}_{\leq 0.02}\text{Hf}_{\leq 0.01})_{0.98-1.00}\text{Si}_{1.99-2.01}\text{O}_{9.00}$ ($n = 16$).

По данным ЛА-ИСП-МС анализа, зерна перовскита из обр. РТ-117 (98.5–98.7 мол. % CaTiO_3) отличает стабильный уровень содержаний (г/т): Fe (8449–11482, $X_{\text{cp.}} = 9934$), Zr (837–1769, $X_{\text{cp.}} = 1201$), Ce (6172–8206, $X_{\text{cp.}} = 7095$), U (327–417, $X_{\text{cp.}} = 361$) и $\text{Pb}_{\text{общ.}}$ (21.8–39.7, $X_{\text{cp.}} = 27.5$). Концентрации Th в них отличаются в 4–5 раз: 368–1367 г/т, $X_{\text{cp.}} = 646$ г/т. Среднее Th/U отношение низкое – 1.84 при диапазоне 0.77–3.33. Перовскиты из обр. РТ-122 беднее примесями (98.7–99.5 мол. % CaTiO_3). Микроэлементный состав отдельных зерен в этом образце существенно отличается (г/т): Fe 4320–13146 ($X_{\text{cp.}} = 9365$), Zr 84.0–5099 ($X_{\text{cp.}} = 785$); Ce 984–8817 ($X_{\text{cp.}} = 3577$), U 9.09–254.00 ($X_{\text{cp.}} = 40.30$) и $\text{Pb}_{\text{общ.}}$ 3.90–27.50 ($X_{\text{cp.}} = 12.00$), количество Th варьирует от 92.9 до 1522 г/т ($X_{\text{cp.}} = 403$ г/т). Среднее Th/U отношение для перовскитов из этого образца высокое – 14.6 (диапазон – 1.04–35.20) (табл. 3). Для перовскитов из обоих образцов (РТ-117 и РТ-122) были измерены концентрации изотопов ^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th и ^{238}U .

Валовые содержания U в этих породах сопоставимы – 1.00 и 1.19 г/т, соответственно; Pb – <0.50 г/т. Коэффициенты накопления Th, U, Ti, Zr и PЗЭ, рассчитанные по формуле $K_{\text{El}} = [E]_{\text{минерал}}/[E]_{\text{порода}}$, составили: $K_{\text{Th}} = 514-870$, $K_{\text{U}} = 374$ (для спуррит-мервинитовых мраморов), $K_{\text{Zr}} = 41-79$; $K_{\text{PЗЭ}} = 35-78$ (табл. 4).

Таблица 3

Средний микроэлементный состав перовскита из спуррит-мервинитовых мраморов Кочумдекского контактового ореола (по данным ЛА-ИСП-МС, г/т)

Table 3

Average trace element compositions of perovskite from spurrite-merwinite marbles of the Kochumdek contact aureole (LA-ICP-MS data, ppm)

| Образец | РТ-117 (n = 13) | | | | РТ-122 (n = 47) | | | |
|---------------------------|-----------------|--------|-------|-------|-----------------|---------|-------|-------|
| | Среднее | S | Мин | Макс | Среднее | S | Мин | Макс |
| Fe | 9934 | 912.90 | 8449 | 11482 | 9365 | 1569.50 | 4320 | 13145 |
| Zr | 1201 | 298.90 | 837 | 1769 | 785 | 968.70 | 84 | 5099 |
| Ce | 7095 | 721.60 | 6172 | 8206 | 3577 | 1657.70 | 984 | 8817 |
| Th | 646 | 411.60 | 272 | 1433 | 403 | 363.70 | 92.90 | 1522 |
| U | 361 | 42.50 | 289 | 430 | 40.30 | 57.40 | 9.09 | 254 |
| $\text{Pb}_{\text{общ.}}$ | 27.50 | 6.20 | 21.80 | 39.70 | 12.00 | 5.20 | 3.94 | 27.60 |
| Th/U | 1.80 | 0.90 | 0.80 | 3.30 | 14.60 | 9.50 | 1.00 | 35.20 |

Примечание. S – стандартное отклонение, n – число анализов, Мин – минимальное содержание, Макс – максимальное содержание, $\text{Pb}_{\text{общ.}} = ^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$.

Note. S – standard deviation, n – number of analyses, Мин – minimum value, Макс – maximum value, $\text{Pb}_{\text{общ.}} = ^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$.

Таблица 4

Средние коэффициенты накопления Th, U, Zr и РЗЭ в перовските из мраморов
Кочумдекского контактового ореола

Table 4

Average value of element incorporation ratio for Th, U, Zr and REEs in perovskite from marbles
of the Kochumdek contact aureole

| Элемент Тип пород | Th | | | U | | | Zr | | | ΣREE | | |
|----------------------|------|------|-----------------|-----|------|----------------|------|-------|-----------------|------|-------|------------------|
| | 1 | 2 | K _{Th} | 1 | 2 | K _U | 1 | 2 | K _{Zr} | 1 | 2 | K _{REE} |
| Spu-Mw мраморы | 1217 | 1.40 | 870 | 313 | 0.84 | 374 | 3118 | 39.30 | 79.00 | 2885 | 41.40 | 69.00 |
| Spu-Mtc мраморы | 965 | 1.87 | 516 | нпо | 1.18 | – | 4678 | 65.60 | 71.00 | 1716 | 49.60 | 35.00 |
| Wo-Tly мраморы | 979 | 1.47 | 666 | нпо | 1.19 | – | 1446 | 34.80 | 41.00 | 2868 | 36.70 | 78.00 |

Примечание. 1 – среднее содержание компонента в перовските, г/т (по данным рентгеноспектрального микроанализа и ЛА-ИСП-МС); 2 – среднее содержание компонента в породе, г/т; K_{El} – коэффициент накопления, рассчитанный по формуле $K_{El} = [El]_{\text{минерал}}/[El]_{\text{порода}}$; ΣREE = La + Ce + Nd + Pr; нпо – ниже предела обнаружения.

Note. 1 – average component content of perovskite (EPMA and LA-ICP-MS data, ppm); 2 – average component content of rock (ppm); K_{El} – element incorporation ratio, $K_{El} = [El]_{\text{mineral}}/[El]_{\text{rock}}$; ΣREE = La + Ce + Nd + Pr; нпо – below detection limit.

**Обсуждение результатов: U-Pb
геохронологические исследования перовскита
и возраст метаморфического события**

Природный перовскит концентрирует РЗЭ, а также Nb, Ta, Ce, La, Th и U, благодаря чему он (наряду с цирконом и бадделейтом) пригоден для U-Pb изотопного датирования геологических процессов методами SHRIMP и ЛА-ИСП-МС. Соответствующие методики успешно используются для определения возраста перовскитов из ультраосновных и щелочных магматических пород (Cox, Wilton, 2006; Chakhmouradian et al., 2013; Арзамасцев, Ву, 2014; Chen, Simonetti, 2014).

По сравнению с перовскитами из комплексов щелочных пород, метасоматитов и скарнов (Uher et al., 2011; Chakhmouradian et al., 2013; Mitchell et al., 2017; Potter et al., 2018; Sklyarov et al., 2019) перовскит из спуррит-мервинитовых мраморов обладает рядом индивидуальных особенностей. Минерал представлен одной генерацией, имеет выдержанный состав, химически однороден, не имеет признаков перекристаллизации или замещения и в отсутствие фаз-конкурентов избирательно концентрирует U и Th. Совокупность этих характеристик позволяет сделать вывод о перспективности U-Pb датирования перовскита методом ЛА-ИСП-МС и определения на этом основании возраста события контактового метаморфизма.

При определении возраста фанерозойских объектов по минералам с низкими содержаниями U, предпочтение отдается отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, ввиду малого содержания радиогенного изотопа ^{207}Pb и обусловленных этим ошибок определения отноше-

ния $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Cox, Wilton, 2006). Предварительно для каждого из анализов перовскита выполнена коррекция $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ отношений и затем на основе оптимизированных значений рассчитаны абсолютные возраста индивидуальных зерен. Присутствие в газе-носителе контаминанта ^{204}Hg контролировалось по количеству изотопа ^{202}Hg , которое не превышало 96 отсчетов (cps), в 50 % анализов эта величина равна 0, а в 25 % анализов <30 cps ($^{204}\text{Hg}/^{202}\text{Hg} = 0.229883$). Расчет возраста перовскитов выполнен с использованием изотопа ^{207}Pb вместо изотопа ^{204}Pb . На основе данных ЛА-ИСП-МС получены значения абсолютных возрастов перовскита из мраморов Кочумдекского ореола. В обр. PT-122 удалось выполнить анализ 47 зерен и построить конкордию (рис. 4). U-Pb возраст минерала, рассчитанный для этого образца, составил 248.0 ± 7.2 млн лет (СКВО = 6.2; 95 % доверительный интервал).

На сегодня K/Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датированием слюд, плагиоклазов и валовых проб лав, а также U-Pb (SHRIMP) датированием циркона и бадделейта установлено, что магматическая активность, обусловленная деятельностью Сибирского суперплюма, длилась в общей сложности около 20 млн лет. Ее главные пики пришлись на интервалы (254) 251–248, 245–235 и ~229 млн лет. Извержения основного объема магм произошли на границе перми и триаса (~252 млн лет по U-Pb методу и ~249 млн лет по K/Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методам) (Гусев и др., 2019). На западной окраине Тунгусской синеклизы первой фазе базитового магматизма соответствуют кузьмовские траппы, эпизод внедрения которых относят к пермо-триассовой границе.

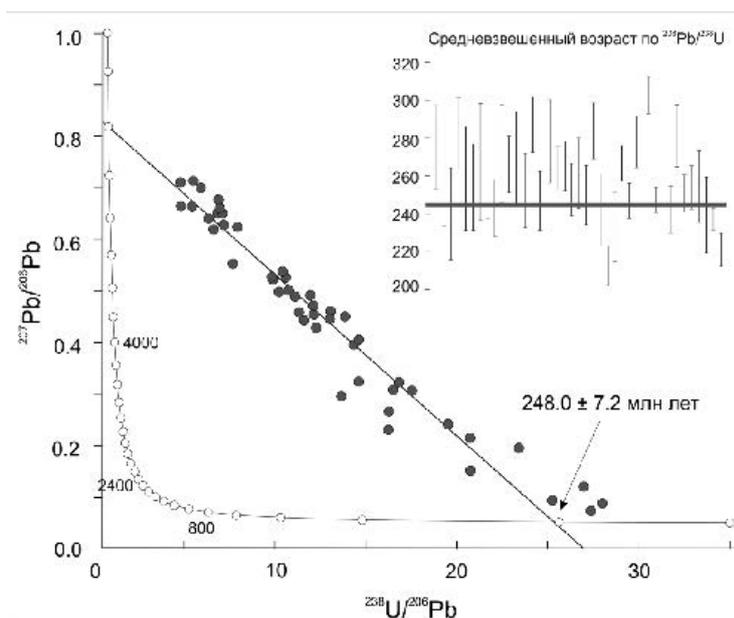


Рис. 4. Диаграмма с конкордией для перовскитов из спуррит-мервинитовых мраморов Кочумдекского контактового ореола.

Fig. 4. Concordia diagram for perovskites of spurrite-merwinite marbles of the Kochumdek contact aureole.

Ранее Д.М. Туровцев (2002), систематизируя информацию о контактовых ореолах разновозрастных траппов Тунгусской синеклизы, указывал на невозможность включить в эту систематику проявления спуррит-мервинитового метаморфизма на реках Кочумдек (Ревердатто, 1964; Перцев, 1977) и Анакит (Ревердатто, 1964; 1970). Полученный нами U-Pb возраст перовскита позволяет связать термическое событие, приведшее к формированию Кочумдекского контактового ореола, с первым импульсом магматизма и подтверждает принадлежность Кочумдекского траппа к кузьмовскому комплексу. К этому же выводу мы пришли ранее на основании сопоставления петро- и геохимических характеристик габброидов кузьмовского и кочумдекского силлов (Сокол и др., 2022).

В образце РТ-117 методом ЛА-ИСП-МС удалось проанализировать 13 зерен перовскита. Расчетный возраст 258.0 ± 6.0 млн лет (СКВО = 4.7; 95 % доверительный интервал) выходит за нижнюю границу доказанного временного интервала траппового магматизма на западной окраине Тунгусской синеклизы и потому не может рассматриваться как достоверный. Вероятной причиной этого представляется недостаточное количество выполненных анализов.

Заключение

Мраморы Кочумдекского контактового ореола, возникшие по шельфовым мергелисто-карбонатным осадкам, отличаются низкими содержаниями Ti, U, Th, Zr и P3Э, также как и Кочумдекский трапп (Сокол и др., 2022). Однако присутствие в мраморах перовскита, избирательно концентрирующего U ($K_U = 374$) и Th ($K_{Th} = 514-870$) (табл. 4), сделало возможным определение возраста метаморфического события посредством U-Pb датирования этого минерала методом ЛА-ИСП-МС. U-Pb геохронологические исследования перовскитов из мраморов на р. Кочумдек впервые позволили определить наиболее вероятный возрастной интервал контактового метаморфизма (248.0 ± 7.2 млн лет) и подтвердили его связь с раннетриассовым этапом траппового магматизма. Важно отметить высокую степень сохранности единственной генерации метаморфических перовскитов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что перовскит является благоприятным объектом для U-Pb датирования бедных U метакарбонатных пород из комплексов контактового метаморфизма. Повышение точности U-Pb датировок перовскитов методом ЛА-ИСП-МС и минимизация ошибок определения возраста термального события (в настоящей работе они составили 2.9 и 2.3 % для индивидуальных образцов) может быть достигнута за счет набора статистики определений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ отношений.

Авторы выражают свою глубокую признательность и благодарность академику В.В. Ревердатто (ИГМ СО РАН) за постоянный интерес и поддержку на каждом этапе исследования Кочумдекского контактового ореола. Мы искренне признательны М.В. Хлестову (ИГМ СО РАН) за техническое обеспечение при работе на сканирующем электронном микроскопе, а также коллегам из Центральной научной лаборатории Университета Тасмании (г. Хобарт, Австралия) за выполнение ЛА-ИСП-МС анализов перовскитов.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-05-00216 (характеристика акцессорных минералов Кочумдекского ореола) и № 20-35-90008 (датирование перовскитов).

Литература

- Алексеев В.Д., Алясов В.А., Бармин В.А., Белоплицкая Л.И., Божко В.В., Варганов А.С., Егоров В.Н., Егоров А.С., Кажаяева О.Д., Качевский Л.К., Москалев В.А., Певзнер В.С., Радюкевич Н.М., Румянцев Н.Н., Сулова С.В., Шор Г.М. (2010) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист Р-46-Северо-Енисейский. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 470 с.
- Арзамасцев А.А., Ву Фу-Ян (2014) U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции. *Петрология*, **22**(5), 496–496.
- Гусев Н.И., Сергеева Л.Ю., Строев Т.С., Савельев С.О., Шарипов А.Г., Ларионов А.Н., Скублов С.Г. (2019) U-Pb возраст, геохимия и Lu-Hf систематика циркона из интрузивных траппов западной части Тунгусской синеклизы Сибирской платформы. *Региональная геология и металлогения*, **79**, 49–67.
- Перцев Н.Н. (1977) Высокотемпературный метаморфизм и метасоматоз карбонатных пород. М., Наука, 256 с.
- Порядин В.С., Струнин Б.М., Турчин А.В., Комаров В.В., Файнер Ю.Б. (1977) Государственная геологическая карта СССР масштаб 1: 200 000. Серия Туруханская. Лист Р-46-XIV. Объяснительная записка. Красноярское территориальное геологическое управление, 82 с.
- Ревердатто В.В. (1964) Проявления высокотемпературного контактового метаморфизма известняков в бассейне р. Подкаменной Тунгуски. *Доклады АН СССР*, **155**(1), 104–107.
- Ревердатто В.В. (1970) Фации контактового метаморфизма. М., Недра, 271 с.
- Соболев В.С. (1935) Редкий тип контактового метаморфизма известняков. *Записки ВМО*, **64**(1).
- Сокол Э.В., Полянский О.П., Семенов А.Н., Ревердатто В.В., Кох С.Н., Девятярова А.С., Колобов В.Ю., Хворов П.В., Бабичев А.В. (2019) Контактный метаморфизм на р. Кочумдек (бассейн р. Подкаменной Тунгуски): свидетельства существования течения расплава. *Геология и геофизика*, **60**(4), 456–471.
- Сокол Э.В., Козьменко О.А., Девятярова А.С., Кох С.Н., Полянский О.П., Филиппова К.А. (2022) Изохимический метаморфизм в Кочумдекском контактовом ореоле (В. Сибирь): геохимические свидетельства и геологическая обусловленность. *Геология и геофизика*, **63**(6), 801–829.
- Тесаков Ю.И. (2014) О валидности силурийских свит, выделенных на северо-западе Сибирской платформы по материалам промышленной геофизики. *Новости палеонтологии и стратиграфии. Приложение к журналу «Геология и геофизика»*, **55**(19), 5–37.
- Туровцев Д.М. (2002) Контактный метаморфизм норильских интрузий. М., Научный мир, 319 с.
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Kamenetsky V.S., Sharygin V.V., Golovin A.V. (2013) Trace-element partitioning in perovskite: implications for the geochemistry of kimberlites and other mantle-derived undersaturated rocks. *Chemical Geology*, **353**, 112–131.
- Chen W., Simonetti A. (2014) Evidence for the multi-stage petrogenetic history of the Oka carbonatite complex (Québec, Canada) as recorded by perovskite and apatite. *Minerals*, **4**(2), 437–476.
- Cox R.A., Wilton D.H. (2006) U-Pb dating of perovskite by LA-ICP-MS: an example from the Oka carbonatite, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, **235**(1–2), 21–32.
- Egorova V., Latypov R. (2013) Mafic-ultramafic sills: New insights from M- and S-shaped mineral and whole-rock compositional profiles. *Journal of Petrology*, **54**(10), 2155–2191.
- Grapes R. (2011) *Pyrometamorphism*, 2nd edn. Berlin, Springer, 365 p.
- Kerrick D.M. (1991) Contact metamorphism. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **26**, 847 p.
- Mitchell R.H., Welch M.D., Chakhmouradian A.R. (2017) Nomenclature of the perovskite supergroup: A hierarchical system of classification based on crystal structure and composition. *Mineralogical Magazine*, **81**(3), 411–461.
- Potter N.J., Ferguson M.R., Kamenetsky V.S., Chakhmouradian A.R., Sharygin V.V., Thompson J.M., Goemann K. (2018) Textural evolution of perovskite in the Afrikanda alkaline-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **173**(12), 1–20.
- Putiš M., Yang Y.H., Koppa M., Dyda M., Šmál P. (2015) U/Pb LA-ICP-MS age of metamorphic–metasomatic

perovskite from serpentized harzburgite in the Meliata Unit at Dobšiná, Slovakia: Time constraint of fluid–rock interaction in an accretionary wedge. *Acta Geologica Slovaca*, **7**(1), 63–71.

Sklyarov E.V., Karmanov N.S., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E. (2019) Perovskites of the Tazheran massif (Baikal, Russia). *Minerals*, **9**, 323.

Sokol E.V., Deviatiiarova A.S., Kokh S.N., Reutsky V.N., Abersteiner A., Philippova K.A., Artemyev D.A. (2021) Sulfide minerals as potential tracers of isochemical processes in contact metamorphism: case study of the Kochumdek aureole, East Siberia. *Minerals*, **11**(1), 17.

Uher P., Koděra P., Vaculovič T. (2011) Perovskite from Ca-Mg skarn-porphry deposit Vysoká Zlatno, Štiavnica stratovolcano, Slovakia. *Mineralia Slovaca*, **43**(3), 247–254.

References

Alekseenko V.D., Alasev V.A., Barmin V.A., Belolipetskaya L.I., Bozhko V.V., Varganov A.S., Egorov V.N., Egorov A.S., Kazhaeva O.D., Kachevsky L.K., Moskalev V.A., Pevzner V.S., Radyukevich N.M., Rumyantsev N.N., Suslova S.V., Shor G.M. (2010) [State geological map of the Russian Federation on a scale of 1:1 000 000 (third generation). Series Angara-Yenisei. Sheet R-46-North Yenisei. Explanatory Note]. St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 470 p. (in Russian)

Arzamastsev A.A., Wu F.-Y. (2014) U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopic systematics of minerals from the ultrabasic-alkaline massifs of the Kola Province. *Petrology*, **22**(5), 462–479.

Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Kamenetsky V.S., Sharygin V.V., Golovin A.V. (2013) Trace-element partitioning in perovskite: implications for the geochemistry of kimberlites and other mantle-derived undersaturated rocks. *Chemical Geology*, **353**, 112–131.

Chen W., Simonetti A. (2014) Evidence for the multi-stage petrogenetic history of the Oka carbonatite complex (Québec, Canada) as recorded by perovskite and apatite. *Minerals*, **4**(2), 437–476.

Cox R.A., Wilton D.H. (2006) U-Pb dating of perovskite by LA-ICP-MS: an example from the Oka carbonatite, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, **235**(1–2), 21–32.

Egorova V., Latypov R. (2013) Mafic-ultramafic sills: New insights from M- and S-shaped mineral and whole-rock compositional profiles. *Journal of Petrology*, **54**(10), 2155–2191.

Grapes R. (2011) *Pyrometamorphism*, 2nd edn. Berlin, Springer, 365 p.

Gusev N.I., Sergeeva L.Yu., Stroeve T.S., Savel'ev S.O., Sharipov A.G., Larionov A.N., Skublov S.G. (2019) [U-Pb age, geochemistry and Lu-Hf systematics of zircon from intrusive traps of the western Tunguska

Syncline, Siberian Platform]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*, **79**, 49–67. (in Russian).

Kerrick D.M. (1991) Contact metamorphism. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **26**, 847 p.

Mitchell R.H., Welch M.D., Chakhmouradian A.R. (2017) Nomenclature of the perovskite supergroup: A hierarchical system of classification based on crystal structure and composition. *Mineralogical Magazine*, **81**(3), 411–461.

Pertsev N.N. (1977) [High-temperature metamorphism and metasomatism of carbonate rocks]. Moscow, Nauka, 256 p. (in Russian).

Poryadin V.S., Strunin B.M., Turchin A.V., Komarov V.V., Fainer Yu.B. (1977) [State geological map of the USSR on a scale of 1:200 000. Series Turukhansk. Sheet R-46-XIV. Explanatory Note]. Moscow, Krasnoyarskoe territorial'noe geologicheskoe upravlenie, 82 p. (in Russian).

Potter N.J., Ferguson M.R., Kamenetsky V.S., Chakhmouradian A.R., Sharygin V.V., Thompson J.M., Goemann K. (2018) Textural evolution of perovskite in the Afrikanda alkaline-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **173**(12), 1–20.

Putiš M., Yang Y.H., Koppa M., Dyda M., Šmál P. (2015) U/Pb LA-ICP-MS age of metamorphic–metasomatic perovskite from serpentized harzburgite in the Meliata Unit at Dobšiná, Slovakia: Time constraint of fluid–rock interaction in an accretionary wedge. *Acta Geologica Slovaca*, **7**(1), 63–71.

Reverdatto V.V. (1964) [High-temperature contact metamorphism of limestones in the Podkamennaya Tunguska basin]. *Doklady AN SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **155**(1), 104–107. (in Russian)

Reverdatto V.V. (1970) [Facies of contact metamorphism]. Moscow, Nedra, 271 p. (in Russian).

Sklyarov E.V., Karmanov N.S., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E. (2019) Perovskites of the Tazheran massif (Baikal, Russia). *Minerals*, **9**, 323.

Sobolev V.S. (1935) [Rare type of contact metamorphism of limestones]. *Zapiski VMO [Proceedings of the All-Union Mineralogical Society]*, **64**(1). (in Russian).

Sokol E.V., Deviatiiarova A.S., Kokh S.N., Reutsky V.N., Abersteiner A., Philippova K.A., Artemyev D.A. (2021) Sulfide minerals as potential tracers of isochemical processes in contact metamorphism: case study of the Kochumdek aureole, East Siberia. *Minerals*, **11**(1), 17.

Sokol E.V., Kozmenko O.A., Deviatiiarova A.S., Kokh S.N., Polyansky O.P., Philippova K.A. (2022) Geochemical evidence and geological prerequisites for isochemical metamorphism in the Kochumdek contact aureole (East Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, **63**, 1–25.

Sokol E.V., Polyansky O.P., Semenov A.N., Reverdatto V.V., Kokh S.N., Devyatyyarova A.S.,

Kolobov V.Y., Khvorov P.V., Babichev A.V. (2019) High-grade contact metamorphism in the Kochumdek River valley (Podkamennaya Tunguska basin, East Siberia): evidence for magma flow. *Russian Geology and Geophysics*, **60**(4), 386–399.

Tesakov Yu.I. (2014) [Validity of Silurian formations in the northwestern Siberian craton, according to materials of commercial geophysics]. *Novosti paleontologii i stratigrafii. Prilozhenie k zhurnaly «Geologiya i geofizika»* [News of Paleontology and Stratigraphy. Supplement to journal «Russian Geology and Geophysics»], **55**(19), 5–37. (in Russian).

Turovtsev D.M. (2002) [Contact metamorphism of Norilsk intrusions]. Moscow, Nauchnyi Mir, 319 p. (in Russian).

Uher P., Koděra P., Vaculovič T. (2011) Perovskite from Ca-Mg skarn-porphyry deposit Vysoká Zlatno, Štiavnica stratovolcano, Slovakia. *Mineralia Slovaca*, **43**(3), 247–25.