

Типохимизм и возможные источники исходных компонентов Се–Cu–Ni-содержащего ферросапонита из метабазитов севера Урала

О. В. Гракова✉, К. С. Попвасев, Н. С. Уляшева

Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация
✉ ovgrakova@geo.komisc.ru

Аннотация

Представлены результаты изучения метабазитов из метаморфических комплексов, расположенных в пределах северной части Ляпинского антиклинория Приполярного Урала и Харбейского антиклинория на Полярном Урале Центрально-Уральского поднятия, территориально входящих в состав зоны Арктики. В метабазитах впервые установлен ферросапонит, содержащий медь, никель и редкоземельные металлы. С помощью электронной микроскопии изучены морфологические и типохимические особенности ферросапонита. На Полярном Урале ферросапонит установлен в альмандиновом эклогите марункеуского эклогит-амфиболит-гнейсового комплекса. Здесь он ассоциирует с гранатом, кварцем, пироксеном, мусковитом, амфиболом и сульфидами. Общая формула минерала из альмандинового эклогита: $(\text{Ca}_{0,06-0,27}\text{K}_{0,01-0,06}\text{Ce}_{0,01})_{\Sigma 0,13-0,31}(\text{Fe}^{2+}_{1,67-2,21}\text{Mg}_{0,51-0,84}\text{Cu}_{0,01-0,09}\text{Ni}_{0,03-0,11})_{\Sigma 2,25-3,08}[(\text{Si}_{2,84-3,08}\text{Al}_{0,92-1,16})_{\Sigma 4,00}\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 3,55-3,83\text{H}_2\text{O}$. На Приполярном Урале исследуемый минерал изучен в образце гранат-амфибол-биотит-плаггиоклаз-кварцевого сланца, где он находится в ассоциации с амфиболом, плагиоклазом, кварцем, эпидотом, биотитом, цирконом, альбитом, титанитом, апатитом и сульфидами. Общая формула минерала: $(\text{Ca}_{0,14-0,22}\text{K}_{0,01-0,02}\text{Ce}_{0,01})_{\Sigma 0,15-0,23}(\text{Fe}^{2+}_{1,24-2,22}\text{Mg}_{0,76-0,97})_{\Sigma 2,17-3,15}[(\text{Si}_{2,86-2,96}\text{Al}_{1,04-1,14})_{\Sigma 4,00}\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 3,41-4,47\text{H}_2\text{O}$. Предполагается гидротермально-метаморфический характер образования ферросапонита на поздней флюидной стадии преобразования пород. Полевые шпаты и биотит являлись поставщиками калия и алюминия, а роговые обманки, пироксены, эпидот – магния и железа. В химическом составе, помимо основных компонентов минерала – калия, кальция, магния, алюминия, кремния и железа, обнаружены медь, никель и редкоземельные металлы. Под воздействием флюидов из замещенных сульфидов могли быть заимствованы медь и никель, а церий был привнесен из алланита, апатита и других минералов, содержащих редкие земли. Изучение минерогенических особенностей метаморфических пород арктических территорий Урала необходимо продолжить с целью оценки их ресурсного потенциала, а также в качестве перспективных источников и концентраторов редких металлов.

Ключевые слова: типохимические особенности, ферросапонит, метабазиты, Приполярный, Полярный Урал

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по темам НИР «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» и «Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых».

Благодарности. Выражаем благодарность рецензенту за рекомендации, аналитикам А. С. Шуйскому и Е. В. Тропникову за оказанную помощь.

Для цитирования: Гракова О.В., Попвасев К.С., Уляшева Н.С. Типохимизм и возможные источники исходных компонентов Се–Cu–Ni-содержащего ферросапонита из метабазитов севера Урала. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):372–383. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-372-383>

Typochemistry and possible sources of ferrosaponite with Ce–Cu–Ni from the metabasalts of the Northern Ural

Oksana V. Grakova✉, Konstantin S. Popvasev, Natalia S. Ulyasheva

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation
✉ovgrakova@geo.komisc.ru

Abstract

We studied metabasites from metamorphic complexes located in the northern part of the Lyapin anticlinorium of the Subpolar Urals and the Kharbey anticlinorium in the Polar Urals of the Central Ural Uplift, which are part of the Arctic zone. For the first time, ferrosaponite containing copper, nickel, and rare earth metals has been identified in these metabasites. The morphological and typochemical characteristics of ferrosaponite were examined using electron microscopy. In the Polar Urals, ferrosaponite is found in the almandine eclogite of the Marunkeu eclogite-amphibolite gneiss. The mineral is associated with garnet, quartz, pyroxene, muscovite, amphibole, and sulfides. The general formula for the mineral from almandine eclogite: $(\text{Ca}_{0.06-0.27}\text{K}_{0.01-0.06}\text{Ce}_{0.01})_{\Sigma 0.13-0.31}(\text{Fe}^{2+})_{1.67-2.21}\text{Mg}_{0.51-0.84}\text{Cu}_{0.01-0.09}\text{Ni}_{0.03-0.11})_{\Sigma 2.25-3.08}[(\text{Si}_{2.84-3.08}\text{Al}_{0.92-1.16})_{\Sigma 4.00}\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 3.55-3.83\text{H}_2\text{O}$. In the Subpolar Urals, this mineral was examined in a sample of garnet-amphibole-biotite-plagioclase-quartz shale, where it occurs in association with other minerals: amphibole, plagioclase, quartz, epidote, biotite, zircon, albite, titanite, apatite, and sulfides. The general formula of the mineral: $(\text{Ca}_{0.14-0.22}\text{K}_{0.01-0.02}\text{Ce}_{0.01})_{\Sigma 0.15-0.23}(\text{Fe}^{2+})_{1.24-2.22}\text{Mg}_{0.76-0.97})_{\Sigma 2.17-3.15}[(\text{Si}_{2.86-2.96}\text{Al}_{1.04-1.14})_{\Sigma 4.00}\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 3.41-4.47\text{H}_2\text{O}$. It is assumed that ferrosaponite forms through a hydrothermal-metamorphic process during the late fluid stage of rock transformation. Feldspars and biotite serve as sources of potassium and aluminum, while hornblende, pyroxenes, and epidote are the primary suppliers of magnesium and iron. In the chemical composition, alongside the main components of the mineral—potassium, calcium, magnesium, aluminum, silicon, and iron—copper, nickel, and rare earth metals were also detected. Under the influence of fluids, copper and nickel may have been derived from replaced sulfides, while cerium could have been introduced from allanite, apatite, and other minerals containing rare earth elements. Continued study of the mineragenic features of metamorphic rocks in the Arctic regions of the Urals is essential for a comprehensive assessment of their resource potential, as well as promising sources and concentrators of rare metals.

Keywords: typochemical features, ferrosaponite, metabasites, Subpolar, Polar Urals

Funding. This study was conducted within the state assignment “Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism and isotope geochronology of the Timan-North Ural segment of the lithosphere” and “Development of the mineral resource complex of the Timan-North Ural-Barents Sea region based on effective forecast, geological modeling, geological and economic assessment of resource potential and new technologies for processing minerals”.

Acknowledgements. We express our gratitude to the reviewer for recommendations, analysts A.S. Shuisky and E.V. Tropnikov for their assistance.

For citation: Grakova O.V., Popvasev K.S., Ulyasheva N.S. Typochemistry and possible sources of ferrosaponite with Ce–Cu–Ni from the metabasalts of the Northern Ural. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):372–383. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-372-383>

Введение

Сапонит – глинистый слоистый силикат из группы триоктаэдрических смектитов. Ферросапонит является аналогом сапонита, с общей формулой $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, содержащего двухвалентное железо. Минерал встречается в зоне выветривания магнезиальных горных пород и образуется за счет разложения слюд, плагиоклазов, туфов и других образований, содержащих много тетраэдрического магния и алюминия. Он имеет высокую физико-химическую активность и характеризуется склонностью к гидратации.

Сапониты представляют особенный интерес при изучении пород различных петрографических типов и геологических обстановок [1].

Впервые ферросапонит был описан как продукт изменения туфов риолитового состава с общей формулой $\text{Na}_{0.30}\text{Ca}_{0.22}\text{K}_{0.02}(\text{Fe}_{1.99}\text{Mg}_{1.02}\text{Al}_{0.01})(\text{Si}_{3.18}\text{Al}_{0.82})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ [2, 3]. «Свежий» (не окислившийся на воздухе и не подвергшийся процессам дегидратации) ферросапонит был найден на месторождении исландского шпата в Восточной Сибири, содержание основных компонентов, мас. %: Na_2O (0,21), K_2O (0,07), CaO (3,31), MgO (6,62), FeO (21,23), Fe_2O_3 (8,78), Al_2O_3 (9,95),

SiO₂ (33,15), H₂O (17,92), сумма 101,24, эмпирическая формула минерала: Ca_{0,31}Na_{0,04}K_{0,01}(Fe²⁺_{1,56}Mg_{0,87}Fe³⁺_{0,52})(Si_{2,91}Al_{1,03}Fe³⁺_{0,06})O₁₀[O_{0,95}(OH)_{1,05}]·4,24H₂O [4]. Ферросапонит из измененных базальтов каньона Тапанга (Лос-Анджелес, Калифорния) был исследован как минералогический аналог смектита, обнаруженного на Марсе. Авторами показано, что изученный сапонит замещал оливин и первоначально содержал Fe²⁺, а затем произошло окисление и замещение трехвалентным железом, в отличие от не полностью окисленного сапонита с Марса [5].

В базальтах Северного Тимана был установлен Fe³⁺-сапонит: Ca_{0,22}Na_{0,04}(Al_{0,26}Fe³⁺_{0,87}Fe²⁺_{0,35}Mg_{1,44}Mn_{0,02})(Si_{3,50}Al_{0,50})O₁₀(OH)₂ [6]. На западном склоне Полярного Урала в выветрелых породах приповерхностных частей золоторудных проявлений установлен диоктаэдрический минерал группы смектит – нонтронит [7, 8]. Триоктаэдрические смектиты зон контактного метаморфизма и наложенной гидротермальной деятельности описаны в скарнах магнезитового месторождения на Южном Урале [9].

В метаморфических породах основного состава арктической зоны Урала нами впервые обнаружен ферросапонит, содержащий медь, никель и редкоземельные металлы. Ранее в метабазахитах нами были установлены редкоземельные карбонаты: анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce) [10].

Целью исследований является установление типохимических и типоморфных особенностей, а также условий формирования Ce–Cu–Ni-содержащего ферросапонита из метабазитов Урала. Изучение подобных рудных минералов, выявление их генезиса и стадийности образования представляет не только научный интерес, но и практическое значение с точки зрения прогнозирования перспективности данной территории на возможное присутствие источников редких и редкоземельных элементов – стратегического минерального сырья.

Материалы и методы

Нами были изучены метабазиты из метаморфических комплексов в районах Харбейского антиклинория на Полярном Урале и северной части Ляпинского антиклинория Приполярного Урала, расположенные в зоне Центрально-Уральского поднятия (рис. 1). Минеральный состав, структурные и текстурные особенности метабазитов были изучены в шлифах на поляризационном микроскопе Биоптик-400. Химические

составы Ce–Cu–Ni-содержащего ферросапонита из метабазитов севера Урала были получены на сканирующем электронном микроскопе JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max 50 mm2 Oxford instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, размере пучка 180 нм и области возбуждения до 5 мкм, с использованием программного обеспечения Aztec, в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, аналитики А. С. Шуйский и Е. В. Тропников.

Геологическое строение региона и петрографическое описание пород

В геологическом строении Урала выделяются следующие структурные этажи: архейско-раннепротерозойский (Волго-Уральский), рифейско-вендский – позднепротерозойский (завершение которого окончилось тиманской складчатостью), палеозойско-раннемезозойский (палеозойский – формирование уралид, раннемезозойский – закончился древнекиммерийской складчатостью), позднемезозойско-раннеплиоценовый (платформенный), позднеплиоценовый-четвертичный (неорогенический). В структурном плане Урала выделены следующие тектонические зоны: Предуральский краевой прогиб, Западноуральская и Центрально-Уральская – палеоконтинентальный сектор уралид, Тагильская зона уралид – палеоокеанический сектор [11]. На Приполярном и Полярном Урале в ядрах крупных антиклинальных структур Центрально-Уральской зоны уралид в дорифейском этаже обнажены древние метаморфические комплексы [12].

На Полярном Урале ферросапонит был установлен в альмандиновом эклогите марункеуского эклогит-амфиболит-гнейсового комплекса. Считается [13, 14], что здесь высокobarический метаморфизм связан с палеозойскими процессами коллизии Восточно-Европейского кратона с Магнитогорской островной дугой. Возраст протолита метаморфитов согласно одним данным оценивается палеопротерозоем [15], согласно другим – неопротерозоем [16].

Альмандиновый эклогит имеет порфиробластовую лепидонематогранобластовую структуру и массивную текстуру. Порода состоит из (в об. %) граната (30), омфацита (50), амфибола (10), кварца (5), фенгита (4). Акцессорные минералы представлены рутилом (<1) и цирконом (микронные зерна). Основная масса мелкозернистая, в ней равномерно распределены призматический бледно-

зеленый омфациит, гранат пироп-альмандинового ряда, кварц, фенгит и рутил. Порфириобласты размером до 0,5 см образуют крупные зерна зеленого амфибола с пойкилитовыми включениями кварца, граната, омфациита, рутила, т. е. минералами основной массы (рис 2, а, б).

На Приполярном Урале исследуемый минерал изучен в образце гранат-амфибол-биотит-плагиоклаз-кварцевого сланца, отобранного из няринского метаморфического комплекса, слагающего ядро Хобеизской антиклинали в северной части Ляпинского антиклинория. По данным Р.Г. Тимониной [17], А.М. Пыстина [18], М.А. Шишкина и др. [19], на рассматриваемой территории отмечается проявление метаморфизма в разных Р–Т-условиях: ранний этап (раннепротерозойский) – амфиболитовая (гранулитовая?) фация, второй этап (рифейско-вендский) – зональный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фации, третий этап – низкотемпературный диафторез нижнепротерозойских и докембрийских толщ, а также прогрессивный метаморфизм ниже-среднепалеозойских образований [17, 18].

Гранат-амфибол-биотит-плагиоклаз-кварцевый сланец имеет сланцеватую текстуру, нематолепидогранобластовую мелкозернистую структуру. В породе равномерно распределены такие минералы как (в об. %) кварц (30), плагиоклаз (20), биотит (25), амфибол (20), клиноцоизит (до 3). Аксессуары представлены титанитом, апатитом и цирконом (до 3). Бурый биотит и зеленый амфибол вытянуты в одном направлении и придают породе рассланцованность. Гранатgrossуляр-альмандинового состава образует мелкие изометричные зерна. Плагиоклаз представлен альбитом и олигоклазом (рис. 2, в, г).

Типохимические особенности ферросапонита из метабазитов

Ферросапонит входит в группу смектита, общая формула этой группы минералов: $A_{0,3}D_{2-3}[T_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$. Кристаллическая структура ферросапонита состоит из двух слоев ненасыщенных форм: двух тетраэдрических решеток SiO_2 и одной октаэдрической решетки, расположенной между ними, которая содержит Fe^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} по типу 2:1 (рис. 3). Между этими тремя слоями кристаллической решетки происходит изоморфный обмен, поэтому минерал обладает высокими адсорбционными и ионообменными свойствами. Сапонит отличается от других смектитов тем, что часть отрицательного

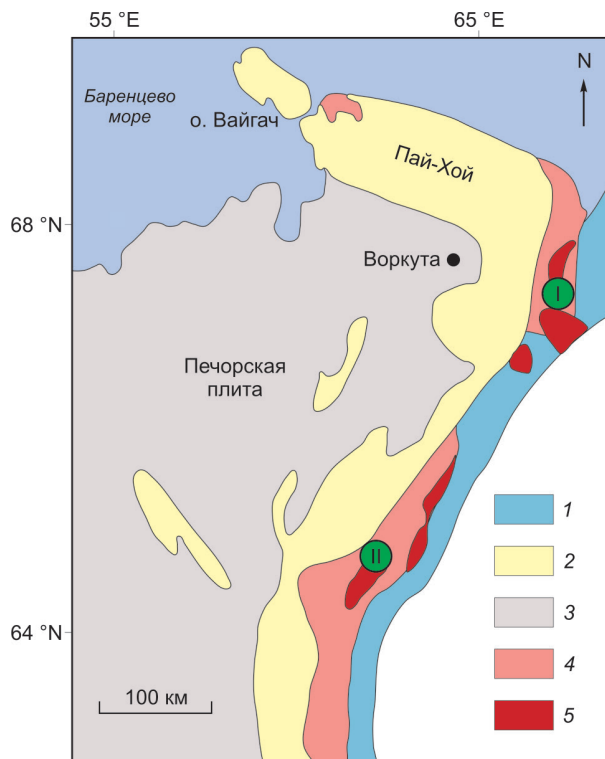


Рис. 1. Схематическая геологическая карта севера Урала. 1, 2 – палеозойские формации: 1 – палеоокеанические, 2 – палеоконтинентальные, 3 – платформенный чехол, 4 – верхнепротерозойские формации, 5 – области распространения метаморфических пород: I – на Полярном Урале (Харбейский антиклинорий), II – на Приполярном Урале (Ляпинский антиклинорий)

Fig. 1. Schematic geological map of the Northern Urals. 1, 2 – Paleozoic formations: 1 – paleoceanic, 2 – paleocontinental, 3 – platform cover, 4 – Upper Proterozoic formations, 5 – areas of distribution of metamorphic rocks: I – in the Polar Urals (Kharbey anticlinorium), II – in the Subpolar Urals (Lyapin anticlinorium)

тетраэдрического заряда уравнивается замещением октаэдрических Mg^{2+} трехвалентными катионами Al^{3+} или Fe^{3+} (в случае ферросапонита – Fe^{2+}), октаэдрический слой несет положительный заряд. Тем не менее, тетраэдрический заряд, благодаря замещению Si^{4+} на Al^{3+} , больше и уравнивает любой положительный октаэдрический заряд. Железо, присутствующее в ферросапоните, также изменяет степень своего окисления в ответ на определенные условия. Эти замещения, их количество и вид катионов существенно влияют на свойства минерала. Межслойные катионы Na^+ , Ca^{2+} , K^+ могут быть легко удалены из него или заменены другими катионами, не разрушая трехслойную упаковку. Состав природного сапонита неоднороден и, как и все смектиты и другие слои-

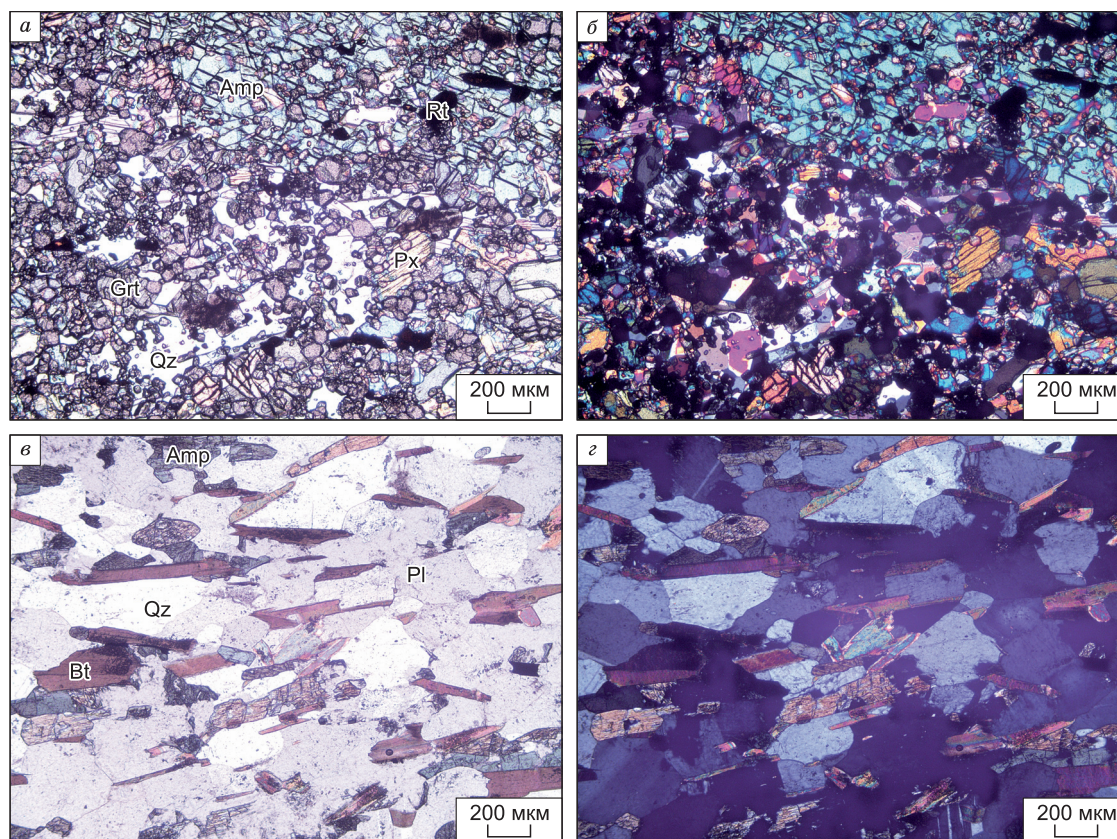


Рис. 2. Микрофотографии шлифов (а, в – без анализатора, б, г – с анализатором): а, б – альмандиновый эклогит, в, г – гранат-амфибол-биотит-плаггиоклаз-кварцевый сланец. Amp – амфибол, Px – пироксен, Grt – гранат, Pl – плаггиоклаз, Bt – биотит, Qz – кварц, Rt – рутил

Fig. 2. Microphotographs of thin sections (а, в – without an analyzer, б, г – with an analyzer): а, б – almandine eclogite, в, г – garnet-amphibole-biotite-plagioclase-quartz slate. Mineral symbols: Amp – amphibole, Px – pyroxene, Grt – garnet, Pl – plagioclase, Bt – biotite, Qz – quartz, Rt – rutile

стые силикаты, может содержать фрагменты других слоистых силикатов, образующих иногда смешанные слоистые структуры [1].

Ферросапонит в метабазитах севера Урала присутствует в виде чешуйчатых лентовидных выделений в породообразующих минералах, иногда заполняет пустоты и трещины в породе (табл. 1, рис. 4).

В эклогите из метаморфического комплекса Полярного Урала он ассоциирует с гранатом, кварцем, пироксеном, мусковитом, амфиболом, халькопиритом и баритом (рис. 4, а–в). На поверхности ферросапонита отмечаются светло-серые полосы, содержащие большое количество оксида железа, что связано с процессами окисления. Химический состав ферросапонита (мас.%): MgO 4,24–6,93, Al₂O₃ 9,98–12,15, SiO₂ 33,62–39,28, K₂O 0,08–0,62, CaO 0,69–3,18, FeO 25,44–32,43, NiO 0,52–1,69, CuO 0,23–1,43, Ce₂O₃ 0,21–0,22, H₂O 10,26–11,05.

Общая формула сапонита из альмандинового эклогита: $(Ca_{0,06-0,27}K_{0,01-0,06}Ce_{0,01})_{\Sigma 0,13-0,31}(Fe^{2+}_{1,67-2,21}Mg_{0,51-0,84}Cu_{0,01-0,09}Ni_{0,03-0,11})_{\Sigma 2,25-3,08}[(Si_{2,84-3,08}Al_{0,92-1,16})_{\Sigma 4,00}O_{10}](OH)_2 \cdot 3,55-3,83H_2O$. Формулы здесь и далее рассчитаны на Si + Al = 4.

В сланце из метаморфического комплекса Приполярного Урала ферросапонит ассоциирует с амфиболом, плаггиоклазом, кварцем, эпидотом, биотитом, цирконом, альбитом, титанитом, апатитом (рис. 4, д–е). Совместно с ним отмечаются сульфиды железа (пирит и халькопирит) и борнит. Борнит развивается по окисленным фазам ферросапонита, содержит серебро – 0,54 вес.%. Химический состав, мас.%: MgO (6,69–9,51), Al₂O₃ (10,30–14,49), SiO₂ (33,33–42,54), K₂O (0,09–0,17), CaO (1,58–2,66), FeO (21,64–30,23), Ce₂O₃ (0,20–0,38), H₂O (9,85–12,91). Общая формула: $(Ca_{0,14-0,22}K_{0,01-0,02}Ce_{0,01})_{\Sigma 0,15-0,23}(Fe^{2+}_{1,24-2,22}Mg_{0,76-0,97})_{\Sigma 2,17-3,15}[(Si_{2,86-2,96}Al_{1,04-1,14})_{\Sigma 4,00}O_{10}](OH)_2 \cdot 3,41-4,47H_2O$.

Результаты и обсуждение

Магнезиально-железистые триоктаэдрические смектиты – сапониты, чаще всего образуются при низкотемпературном преобразовании ультраосновных и основных пород, в отличие от диоктаэдрических разновидностей этих минералов – нонтронит и др., более характерны для осадочных пород и распространены в корах выветривания, в почвах, в осадках озер, морей, океанов, среди продуктов наземных и подводных гидротерм [1]. Для основных пород чаще всего характерны обогащенные железом разновидности – ферросапониты [4].

Нами все железо определялось как двухвалентное, так как в составе катионов группы оно играет доминирующую роль, но в составе ферросапонита в меньшем количестве присутствует и трехвалентное железо, поэтому в некоторых формулах, имеющих недостаток в сумме коэффициентов катионов группы D, необходимо учитывать при-

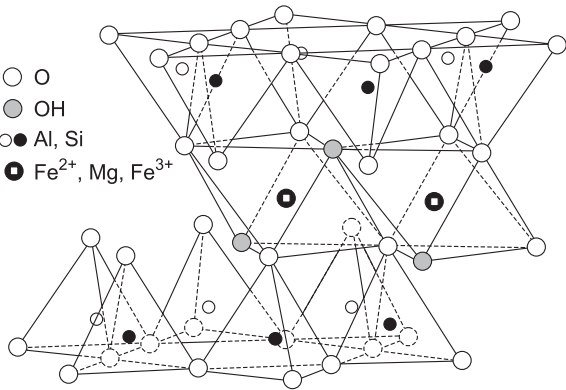


Рис. 3. Схема структуры ферросапонита [1]

Fig. 3. Scheme illustrating the structure of ferrosaponite [1]

существование трехвалентного железа. Известно, что переход в минерале окисных форм железа в закисные может происходить при катагенезе и завершиться при метаморфизме. Такая закономерность была прослежена на примере связанных с

Таблица 1

Составы ферросапонита из метабазитов севера Урала

Table 1

Composition of ferrosaponites from the metabasites of the Northern Urals

№ п/п	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	NiO	CuO	Ce ₂ O ₃	H ₂ O	Сумма
Альмандиновый эклогит											
1	5,91	10,94	36,98	–	2,39	31,58	–	0,30	0,21	10,80	99,11
2	5,73	10,75	37,89	0,08	2,33	32,43	–	0,30	0,22	10,95	100,68
3	5,48	11,92	34,60	0,09	1,36	32,20	–	0,90	–	10,54	97,09
4	5,58	9,98	39,28	0,41	3,18	25,84	–	0,23	–	11,05	95,55
5	4,76	10,91	37,96	0,27	2,95	25,44	–	0,36	0,21	11,01	93,87
6	5,96	11,90	36,28	0,59	1,72	25,91	0,52	0,51	–	10,89	94,28
7	5,89	12,15	36,80	0,62	1,35	26,44	0,99	0,72	–	11,07	96,03
8	6,65	11,69	33,62	0,44	0,69	28,95	1,69	1,43	–	10,26	95,42
9	6,93	11,71	36,29	0,47	1,60	27,73	1,05	1,09	–	10,85	97,72
10	4,24	11,80	35,70	0,44	1,61	30,85	–	0,67	–	10,74	96,05
Гранат-амфибол-альбит-кварц-биотитовый сланец											
11	7,05	12,15	38,85	0,11	1,93	23,75	–	–	0,38	11,51	95,73
12	8,25	12,29	41,24	–	2,66	21,92	–	–	–	12,07	98,43
13	6,75	12,08	38,75	0,12	1,94	24,58	–	–	0,29	11,48	95,99
14	7,85	12,95	42,24	0,13	2,17	23,37	–	–	0,38	12,45	101,54
15	6,69	11,01	36,90	0,09	2,59	21,64	–	–	–	10,80	89,72
16	6,87	11,11	33,72	0,15	1,58	27,82	–	–	0,36	10,14	91,75
17	9,51	14,49	42,54	0,15	2,00	22,13	–	–	0,30	12,91	104,03
18	7,07	10,30	33,33	0,17	1,68	30,23	–	–	0,20	9,85	92,83
19	8,51	12,72	37,68	0,11	1,73	22,78	–	–	–	11,41	94,94

Примечание. «–» – не обнаружено. H₂O – расчетные данные.

Note. «–» – not detected. H₂O – calculated data.

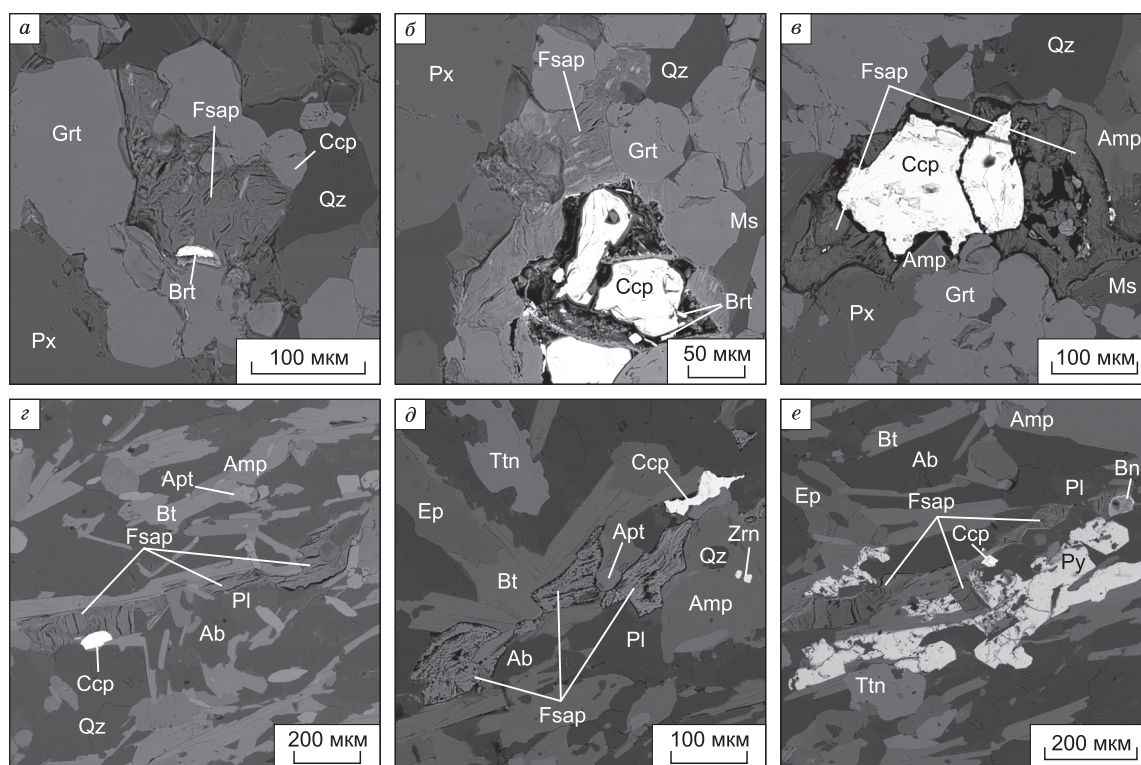


Рис. 4. Ферросапонит в метабазитах севера Урала: *а-в* – Полярный Урал, *г-е* – Приполярный Урал. Fsap – ферросапонит, Ccp – халькопирит, Py – пирит, Bn – борнит, Brt – барит, Grt – гранат, Ttn – титанит, Ap – апатит, Zrn – циркон, Amp – амфибол, Ep – эпидот, Px – пироксен, Pl – плагиоклаз, Bt – биотит, Ms – мусковит, Ab – альбит, Qz – кварц

Fig. 4. Ferrosaponite in the metabasites of the Northern Urals: *a-b* – Polar Urals, *г-e* – Subpolar Urals. Legend: Fsap – ferrosaponite, Ccp – chalcopyrite, Py – pyrite, Bn – bornite, Brt – barite, Grt – garnet, Ttn – titanite, Ap – apatite, Zrn – zircon, Amp – amphibole, Ep – epidote, Px – pyroxene, Pl – plagioclase, Bt – biotite, Ms – muscovite, Ab – albite, Qz – quartz

Таблица 2
Соотношение Fe/Mg
в ферросапонитах севера Урала (в ат. проп.)

Table 2
Fe/Mg ratio in ferrosaponites
of the Northern Urals (at. prop.)

№	Fe	Mg	Fe/Mg
1	9,39	4,60	2,04
2	8,37	5,01	1,67
3	8,80	4,85	1,81
4	11,29	4,97	2,27
5	7,69	5,89	1,31
6	12,2	5,08	2,40
7	8,72	5,81	1,50
8	10	3,85	2,60
9	8,44	3,23	2,61
10	10,25	4,20	2,44
11	10,29	4,09	2,52

рудоносными формациями Fe-хлоритов, начиная от современных и заканчивая докембрийскими, где происходила постепенная трансформация от Fe-сметитов (нонтронитов и Fe-сапонитов) современных рудоносных отложений Красного моря и Восточно-Тихоокеанского поднятия до железистых Fe²⁺-хлоритов в докембрийских джеспилитах [20].

При примерно равных содержаниях основных компонентов кальция, калия, железа, магния, кремния и алюминия ферросапониты метаморфических пород Приполярного и Полярного Урала различаются содержанием элементов примесей. В обоих ферросапонитах в группе А общей формулы минерала содержится церий, содержание Ce₂O₃ составляет 0,20–0,38 мас.%. В ферросапоните из альмандинового эклогита, помимо редких земель, присутствуют медь и никель (см. табл. 1).

Наблюдаемая ассоциация с сульфидами (пиритом, халькопиритом) может считаться одним из диагностических признаков ферросапонита и указывать на условия минералообразования.

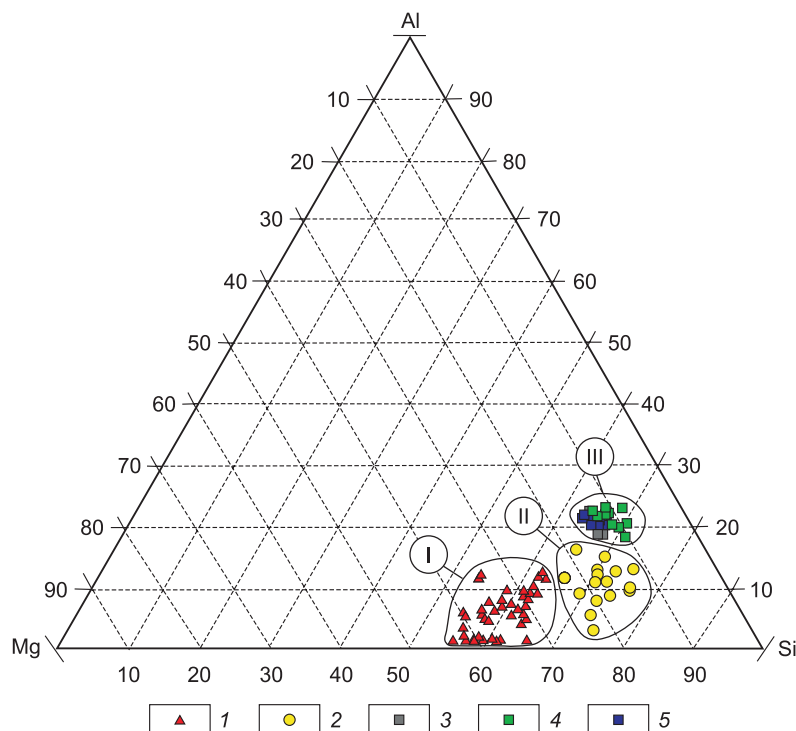


Рис. 5. Диаграмма Mg–Al–Si химических составов сапонита (I), нонтронита (II) и ферросапонита (III) по основным катионам. 1 – сапонит [26 и ссылки в этой работе]; 2 – нонтронит [26 и ссылки в этой работе]; 3 – ферросапонит из включений в исландском шпате [4]; 4 – ферросапонит из метабазита Полярного Урала; 5 – ферросапонит из метабазита Приполярного Урала

Fig. 5. Mg–Al–Si diagram of the chemical compositions of saponite (I), nontronite (II) and ferrosaponite (III) by main cations. 1 – saponite [26 and references in this work]; 2 – nontronite [26 and references in this work]; 3 – ferrosaponite from inclusions in Iceland spar [4]; 4 – ferrosaponite from metabasite of the Polar Urals; 5 – ferrosaponite from metabasite of the Subpolar Urals

В невыветрелом и негидратированном «свежем» ферросапоните, образующем радиально-лучистые сферолиты, включенные в кристалл исландского шпата из трапповых лав, он также ассоциирует с пиритом [4].

Рассмотрим отношение Fe–Mg в ферросапонитах севера Урала, оно составляет в атомных пропорциях 1,31–2,61 (табл. 2). Такие соотношения описаны в триоктаэдрических смектитах – виридитах, образующихся при ретроградном метаморфизме толеитового базальта [21, 22]. Также они встречаются в сапонитах в пропилитизированном диорит-порфирите [23], в жеодах андезитобазальтов [24] и долеритах [25]. В трапповых лавах свежий (не окисленный на воздухе и не подвергшийся дегидратации) ферросапонит имеет значение $\text{Fe}/\text{Mg} > 2$ [4].

Для уточнения кристаллохимических особенностей была построена тройная диаграмма по содержанию магния, алюминия и кремния в минерале (рис. 5). Для сравнения на диаграмму были нанесены составы ферросапонитов, сапо-

нитов и нонтронитов [26, 27 и ссылки в них]. На диаграмме Mg–Al–Si ферросапониты из метабазитов севера Урала образуют отдельное поле.

По своим структурным характеристикам все исследованные минералы находятся в поле распространения «свежих» ферросапонитов, установленных во включениях в исландском шпате [4].

В ферросапоните, по данным ИК-спектроскопии, присутствует большое количество слабосвязанной молекулярной воды [4], для железистого сапонита из шаровых лав сибирских траппов указана температура образования около 50 °C [28]. Богатый Al смектит образуется при низкотемпературном (<~50 °C) погребальном диагенезе или гидротермальном изменении кремнивого вулканического стекла и полевого шпата [29].

В результате изучения измененных базальтов в гидротермальном поле Рейкьянес (Исландия) [30, 31] были получены данные, что смешанослойный смектит-хлорит образовался при температурах от 200 до 270 °C. Вероятной тем-

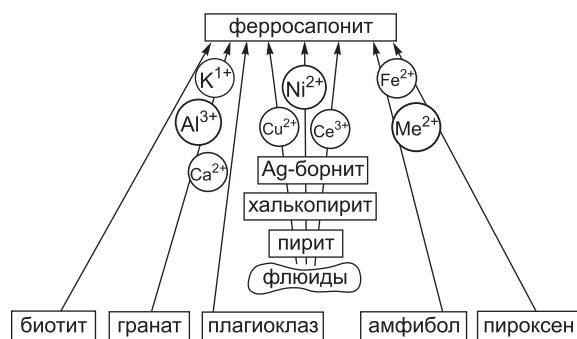


Рис. 6. Схема формирования ферросапонита в метабазитах

Fig. 6. Scheme illustrating ferrosaponite formation in metabasites

пературой образования исследуемых нами ферросапонитов можно считать этот диапазон температур 200–270 °C.

Проведенные нами исследования показали, что Ce–Cu–Ni-содержащий ферросапонит из метабазитов севера Урала – новообразованный минерал, относящийся к поздней гидротермальной стадии преобразования пород. Его возникновение могло быть связано с процессами проявления низкотемпературного метаморфизма. Полевые шпаты и биотит явились поставщиками калия и алюминия (извлекаемых в процессе их коррозии, «внутрислойного растворения»). Фемические минералы – роговые обманки, пироксены, эпидот были основными поставщиками магния и железа (рис. 6). Это связано с механизмом образования минералов группы смектит, когда происходит изменение химического состава исходных минералов-хозяев при минимальной структурной перестройке [1].

При преобразовании пироксенов или амфиболов ленточно-цепочечные формы минералов сменяются слоистыми, сохраняя при этом постоянный объем и когерентность кристаллических решеток новообразованного и исходного минералов. Происходит вынос почти всего CaO, больших количеств MgO и SiO₂ при минимальной перестройке структуры пироксена или амфиболов, из-за того, что эти минералы содержат структурные фрагменты, которые являются «прообразами» структур смектитов.

Под воздействием флюидов, выделенных при кристаллизации сульфидных расплавов, были привнесены Cu и Ni, в том числе заимствованные из замещенных сульфидов, подобный процесс метаморфогенно-гидротермального минералообразо-

вания был описан в норильских сульфидных Co–Ni–Cu рудах [32]. Кроме того, метабазиты, образующиеся за счет метаморфизма магматических пород основного состава, зачастую обогащены такими элементами-примесями, как Co, Ni, V, Ti и Cr.

Церий был привнесен при участии минералов, содержащих редкоземельные элементы (алланит, апатит и др.). В метабазитах Няртинского комплекса нами также установлены редкоземельные карбонаты: анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce). Анкилит-(Ce) – водосодержащий карбонат редких земель. Общая формула анкилита-(Ce) имеет вид $(Sr_{0,59-0,62}Ce_{0,55-0,58}La_{0,31-0,39}Ca_{0,19-0,26}Nd_{0,16-0,24}Pr_{0,06})_{\Sigma=2,00}(CO_3)_2(OH) \cdot H_2O$. Формула гидроксилбастнезита-(Ce) – редкоземельного карбоната, содержащего гидроксильную группу и фтор с преобладающим содержанием церия, соответствует $(Ce_{0,32-0,46}La_{0,16-0,22}Nd_{0,14-0,17}Ca_{0,03-0,15}Si_{0,02-0,07}FeO_{0,02-0,05}Th_{0,01-0,05}Pr_{0,03-0,04}Y_{0,01-0,04}Sm_{0,02-0,03}Gd_{0,01-0,02})_{\Sigma=0,98-1,01}(CO_3)((OH)_{0,75-0,92}(F)_{0,08-0,25})$. Мы полагаем, что образование минералов, содержащих редкоземельные элементы, в том числе Ce–Cu–Ni-содержащего ферросапонита проходило в одних и тех же условиях в течение одного периода времени при метаморфических и гидротермальных преобразованиях.

Заключение

В метабазитах Харбейского и Ляпинского антиклинориев на севере Урала (включая арктические территории) впервые установлен Ce–Cu–Ni-содержащий ферросапонит. В альмандиновом эклогите (Полярный Урал) он ассоциирует с гранатом, кварцем, пироксеном, мусковитом, амфиболом. В гранат-амфибол-биотит-плагиоклаз-кварцевом сланце (Приполярный Урал) ферросапонит ассоциирует с амфиболом, плагиоклазом, кварцем, эпидотом, биотитом, цирконом, альбитом, титанитом, апатитом.

Ферросапонит из метабазитов севера Урала является поздним минералом и образовался в результате гидротермально-метаморфических преобразований. Полевые шпаты и биотит были поставщиками калия и алюминия, а роговые обманки, пироксены, эпидот – основные поставщики магния и железа. В химическом составе, помимо основных компонентов калия, кальция, магния, алюминия, кремния и железа, обнаружены медь, никель и редкоземельные металлы. Эти элементы могли быть заимствованы из замещен-

ных сульфидов и при участии минералов, содержащих редкие земли (алланит, апатит и др.), и привнесены под воздействием флюидов.

Изучение минерогенических особенностей метаморфических пород арктических территорий Урала необходимо продолжить с целью оценки их ресурсного потенциала, а также в качестве перспективных источников и концентраторов редких металлов.

Список литературы / References

1. Дриц В.А., Коссовская А.Г. *Глинистые минералы: Сметиты, смешанослойные образования*. М.: Наука; 1990. 214 с.

Drits V.A., Kossovskaya A.G. *Clay minerals: Smectites, mixed-layer formations*. Moscow: Nauka; 1990. 214 p. (In Russ.)

2. Sudo T. Iron-rich saponite found from Tertiary iron sand beds of Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*. 1959;60:18–27.

3. Kohyama N., Shimodo S., Sudo T. Iron-rich saponite (ferrous and ferric forms). *Clays and Clay Miner.* 1973; 21:229–237.

4. Чуканов Н.В., Пеков И.В., Задов А.Е. и др. Ферросапонит $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, новый триоктаэдрический смектит (Эвенкия). *Записки Всероссийского минералогического общества*. 2003; 132:68–74.

Chukanov N.V., Pekov I.V., Zador A.E., et al. Ferrosaponite $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, new trioctahedral smectite (Evenkia). *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2003;132:68–74. (In Russ.)

5. Treiman A.H., Morris R.V., Agresti D.G., et al. Ferrian saponite from the Santa Monica Mountains (California, U.S.A., Earth): Characterization as an analog for clay minerals on Mars with application to Yellowknife Bay in Gale Crater. *American Mineralogist*. 2014; 99(11–12):2234–2250. <https://doi.org/10.2138/am-2014-4763>

6. Симанович И.М., Дриц В.А., Дайняк Л.Г. Сметиты и изотропные фазы в базальтах Северного Тимана. *Литология и полезные ископаемые*. 1986;1:86–103.

Simanovich I.M., Drits V.A., Dainyak L.G. Smectites and isotropic phases in basalts of Northern Timan. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 1986;1:86–103. (In Russ.)

7. Ефанова Л.И., Симакова Ю.С., Артеева Т.А., Донцов А.Б. Мезозойско-кайнозойские коры выветривания на хребтах Манитаньрд и Енганепэ. *Труды Института геологии Коми научного центра УрО РАН* 2009;(125):29–38.

Efanova L.I., Simakova Yu.S., Arteeva T.A., Dontsov A.B. Mesozoic-Cenozoic weathering crusts on the Manitynyrd and Enganepe ridges. *Proceedings of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center URO RAS*; 2009;(125):29–38. (In Russ.)

8. Ефанова Л.И., Кузнецов С.К., Тарбаев М.Б., Майорова Т.П. Золотоносность Манитаньрдского района и

перспективы наращивания ресурсного потенциала, Полярный Урал. *Руды и металлы*. 2020;(3):39–51. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2020-10020>

Efanova L.I., Kuznetsov S.K., Tarbaev M.B., Maiorova T.P. Gold content of the Manitynyrd region and prospects for increasing resource potential, Polar Urals. *Ores and metals*. 2020;(3):39–51. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2020-10020> (In Russ.)

9. Коржинский А.Ф. Стивенсит и нонтронит из скарновой зоны Балканского рудника на Урале. *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 1970; 99(5):614–619.

Korzhinskii A.F. Stevensite and nontronite from the skarn zone of the Balkan mine in the Urals. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1970; 99(5):614–619. (In Russ.)

10. Гракова О.В., Попвасев К.С. Редкоземельные карбонаты из докембрийских пород Приполярного Урала. В кн.: *Материалы XIII Всероссийской молодежной научной конференции: Минералы: строение, свойства, методы исследования*. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. Академика А.Н. Заварицкого УрО РАН; 2023. С. 89–91.

Grakova O.V., Popvasev K.S. Rare earth carbonates from Precambrian rocks of the Subpolar Urals. In: *Proceedings of the 13th All-Russian Youth Scientific Conference: Minerals: structure, properties, research methods*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry named Academician A.N. Zavaritsky URO RAS; 2023, pp. 89–91. (In Russ.)

11. Пучков В.Н., Иванов К.С. Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития. *Геотектоника*. 2020;(1):41–61. <https://doi.org/10.31857/S0016853X20010105>

Puchkov V.N., Ivanov K.S. Tectonics of the northern Urals and Western Siberia: general history of development. *Geotectonics*. 2020;(1):41–61. <https://doi.org/10.31857/S0016853X20010105> (In Russ.)

12. Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Базальные отложения верхнего докембрия в Тимано-Североуральском регионе. *Литосфера*. 2014;(3):41–50.

Pystin A.M., Pystina Yu.I. Basal deposits of the Upper Precambrian in the Timan-Northern Urals region. *Lithosphere*. 2014;(3):41–50. (In Russ.)

13. Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоутц Э. и др. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала. *Доклады Академии наук*. 2000;371(4):519–523.

Shatskii V.S., Simonov V.A., Jagoutz E., Kurenkov S.A., Koz'menko O.A. New data on the age of eclogites from the Polar Urals. *Doklady Earth Sciences*. 2000;371A: 534–538.

14. Glodny J., Pease V., Austreim H., et al. Rb-Sr record of fluid-rock interaction in eclogites: The Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003;67:4353–4371.

15. Пыстина Ю.И., Пыстин А.М. *Цирконовая летопись уральского докембрия*. Екатеринбург: УрО РАН; 2002. 168 с.

- Pystina Yu.I., Pystin A.M. *Zircon record of the Ural Precambrian*. Ekaterinburg: URO RAS; 2002. 168 p. (In Russ.)
16. Коновалов А.Л., Лохов К.И., Черкашин А.В., Вакуленко О.В. О тектонической границе между метаморфическими сланцевыми и кристаллическими образованиями позднего протерозоя Харбейского антиклинария (Полярный Урал). *Региональная геология и металлогения*. 2016;(68):5–20.
- Konovalev A.L., Lokhov K.I., Cherkashin A.V., Vakulenko O.V. On the tectonic boundary between metamorphic schist and crystalline formations of the Late Proterozoic Kharbey anticlinorium (Polar Urals). *Regional geology and metallogeny*. 2016;(68):5–20. (In Russ.)
17. Тимонина Р.Г. *Петрология метаморфических пород Приполярного Урала*. Л.: Наука; 1980. 100 с.
- Timonina R.G. *Petrology of metamorphic rocks of the Subpolar Urals*. Leningrad: Nauka; 1980. 100 p. (In Russ.)
18. Пыстин А.М. *Полиметаморфические комплексы западного склона Урала*. СПб.: Наука; 1994. 208 с.
- Pystin A.M. *Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals*. St. Petersburg: Nauka; 1994. 208 p. (In Russ.)
19. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка. Ред. М.А. Шишкин. М.: МФ ВСЕГЕИ; 2013. 252 с.
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. North-Ural series. Sheet Q-41-XXV. Explanatory letter. Ed. M.A. Shishkin. Moscow: MF VSEGEI; 2013. 252 p. (In Russ.)
20. Япаскерт О.В. *Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования*. Учебное пособие. М.: ЭСЛАН; 2008. 356 с.
- Yapaskurt O.V. *Genetic mineralogy and stage analysis of processes of sedimentary rock and ore formation*. Tutorial. Moscow: ESLAN; 2008. 356 p. (In Russ.)
21. Arikas K. Die “Viridite” in Tholeyit von Toley (Saar). *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 1973;120(1): 83–97.
22. Arikas K. Ein optisch positives Mg-Fe-reiches Montmorillonitmineral. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 1977;131(2):179–186.
23. Коржинский А.Ф., Завьялова Т.В., Баранова Г.И. Находка высокожелезистого сапонита в пропилитизированном диорит-порфирите близ Вышково. Закарпатье. *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 1971;(2):201–209.
- Korzhinsky A.F., Zavyalova T.V., Baranova G.I. Finding of high-iron saponite in propylitized diorite-porphyrite near Vyshkovo. Transcarpathia. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1971;(2):201–209. (In Russ.)
24. Konno H., Akizuki M. Iron saponite in geode of Mitaki andesitic basalt from Sendai. Miyagi prefecture. *Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*. 1976;71(3):216–220.
25. Дайняк Л.Г. Дриц В.А., Кудрявцев Д. и др. Кристаллохимическая специфика триоктаэдрических Fe²⁺-содержащих смектитов – продуктов вторичного изменения океанических и континентальных базальтов. *Доклады АН СССР*. 1981;259(6):1458–1462.
- Daynyak L.G., Drits V.A., Kudryavtsev D., et al. Crystal chemical specificity of trioctahedral Fe²⁺-containing smectites – products of secondary alteration of oceanic and continental basalts. *Reports of the AS USSR*. 1981;259(6):1458–1462. (In Russ.)
26. Никулин И.И. Кристаллохимические зависимости слоистых силикатов. В кн.: *Глины, глинистые минералы и слоистые материалы, посвященного 90-летию со дня рождения Б.Б. Звягина: материалы совещания*. М.: ИГЕМ РАН; 2011. С. 36–37.
- Nikulin I.I. Crystal chemical dependencies of layered silicates. In: *Clays, clay minerals and layered materials, dedicated to the 90th anniversary of the birth of B.B. Zvyagina: Proceedings of the meeting*. Moscow: IGEM RAS; 2011, pp. 36–37. (In Russ.)
27. Никулин И.И. Глаукониты из нижнеэоценовых отложений юго-запада Приволжской моноклинали и потенциал их использования (Волгоградская область). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022;(3):29–40. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/29-40>
- Nikulin I.I. Lower Eocene glauconite deposits of the south west of the Volga monocline and the potential for their use (Volgograd region). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2022;3:29–40. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/29-40>
28. Кудряшова В. И. Железистый сапонит и селадонит из шаровых лав сибирских траппов. *Тр. Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана*. 1962;13:210–218.
- Kudryashova V.I. Ferrous saponite and celadonite from spherical lavas of Siberian traps. *The Proceedings of Mineralogical Museum*. 1962;13:210–218. (In Russ.)
29. Chamley H. *Clay Sedimentology*. Berlin: Springer-Verlag; 1989. P. 333–358. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85916-8>
30. Kristmannsdottir H. Types of clay minerals in hydrothermally altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland. *Jökull*. 1976;(26):30–39.
31. Kristmannsdottir H., Tomasson J. *Zeolite zones in geothermal areas in Iceland. Natural Zeolites, Occurrences, Properties, Use*. Oxford: Pergamon Press; 1978. P. 199–220.
32. Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А. и др. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах. *Геология рудных месторождений*. 2015;57(5):445–476. <https://doi.org/10.7868/S0016777015050068>
- Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A. et al. Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores. *Geology of Ore Deposits*. 2015;57(5):402–432. <https://doi.org/10.1134/S1075701515050062> (In Russ.)

Об авторах

ГРАКОВА Оксана Васильевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218>, ResearcherID: K-8365-2018, Scopus Author ID: 57192210915, SPIN: 9767-2911, e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

ПОПВАСЕВ Константин Степанович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2005-5901>, SPIN: 5466-4404, e-mail: kpopvasev@gmail.com

УЛЯШЕВА Наталия Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5744-0478>, ResearcherID: AAP-1401-2021, Scopus Author ID: 57194233882, SPIN: 2693-4969, e-mail: nataliaulyashewa@yandex.ru

Вклад авторов

Гракова О.В. – разработка концепции, руководство исследованием, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи; редактирование рукописи; **Попвасев К.С.** – проведение исследования; проведение статистического анализа, верификация данных, создание черновика рукописи; **Уляшева Н.С.** – руководство исследованием, проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

GRAKOVA, Oksana Vasil'evna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218>, ResearcherID: K-8365-2018, Scopus Author ID: 57192210915, SPIN: 9767-2911, e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

POPVASEV, Konstantin Stepanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2005-5901>, SPIN: 5466-4404, e-mail: kpopvasev@gmail.com

ULYASHEVA, Natalia Sergeevna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5744-0478>, ResearcherID: AAP-1401-2021, Scopus Author ID: 57194233882, SPIN: 2693-4969, e-mail: nataliaulyashewa@yandex.ru

Authors' contribution

Grakova O.V. – conceptualization, supervision, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Popvasev K.S.** – investigation, formal analysis, validation, writing – original draft; **Ulyashewa N.S.** – supervision, investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.08.2024

Принята к публикации / Accepted 27.08.2024