

УДК 551.21:553.08 (470.5)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Геология и минеральный состав флюидолитов мезо-кайнозойского этапа развития активизированных структур Полярного Урала

В.А. Душин, С.Г. Сустанов, И.А. Власов, Д.И. Прокопчук[✉]

Уральский государственный горный университет, Россия, г. Екатеринбург

[✉]uva9090@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* работы связана с выяснением роли наиболее молодых гипогенных процессов в становлении мезозойско-кайнозойского мегакомплекса Полярного Урала. **Цель:** исследование минерального состава флюидолитов как своеобразных нетрадиционных образований, связанных с функционированием под давлением водно-газовых потоков в пределах активизированных тектонических структур Байдарацкого блока. **Методология и методы:** обобщение, анализ и синтез материалов многолетнего изучения геологии и минерации Полярного Урала, включая проведение ГДП-200/2 листов R-42-XXXI, XXXII, Q-42-I, II, VII, VIII и Программы «Приоритет 2030». Изучение морфологии, внутреннего строения, химического состава флюидолита осуществлено в научно-исследовательском лабораторном центре Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург). Морфологическое изучение было проведено с помощью оптического микроскопа МБС 10 в отраженном свете и сканирующего электронного микроскопа VEGA LMS фирмы TESCAN; состав минералов определялся с использованием энергодисперсионной приставки Xplore 30 Oxford Instruments, программы «Aztec» U=20 кВ, I=3 нА. Рентгенографические исследования выполнены с помощью дифрактометра POWDIX 600. **Результаты.** Флюидолиты как продукты флюидно-газовых процессов приурочены к опережающим швам Себета-Хуутинской системы разломов. Они имеют сложный полиминеральный состав, где наряду с преобладающими водными сульфатами железа и магния – магнезиокопиапитом, эпсомитом с продуктами его дегидратации и фиброферритом, присутствуют более редкие, такие как славикит и микрокристаллы точно не диагностированного сульфата, содержащего в составе магний и железо. С обломочным силикатным материалом среди игольчатых скоплений фиброферрита установлены мелкие кристаллы каолинита и встречены участки «микрокавернозного» строения, где среди сульфатов сравнительно равномерно распределен алюмосиликатный тонкодисперсный материал. В составе последнего иногда встречаются скопления наноминералов, содержащих калий. **Выводы.** Получены новые данные по минералогическому составу флюидолитов как продуктов гипогенных флюидно-газовых процессов квартала, близких к фумарольным явлениям, в пределах Байдарацкого блока Полярного Урала.

Ключевые слова: Полярный Урал, Байдарацкий блок, флюидолиты, активизированные структуры, минерация, кора выветривания, славикит

Благодарности: Работа подготовлена при участии научно-исследовательского лабораторного центра Уральского государственного горного университета и при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Геология и минеральный состав флюидолитов мезо-кайнозойского этапа развития активизированных структур Полярного Урала / В.А. Душин, С.Г. Сустанов, И.А. Власов, Д.И. Прокопчук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг госресурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 36–46. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554

UDC 551.21:553.08 (470.5)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554

Geology and mineral composition of fluidolites of the Meso-Cenozoic stage of development of activated structures of the Polar Urals

V.A. Dushin, S.G. Sustavov, I.A. Vlasov, D.I. Prokopchuk[✉]

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

[✉]uva9090@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to clarify the role of the youngest hypogenic processes in the formation of the Mesozoic-Cenozoic megacomplex of the Polar Urals. **Aim.** To study the mineral composition of fluidolites as peculiar unconventional formations associated with the functioning of pressurized water and gas flows within the activated tectonic structures of the Baydaratsky block. **Methodology and methods.** Generalization, analysis and synthesis of materials from the long-term study of the geology and minerageny of the Polar Urals, including the implementation of GDP200/2 sheets R-40-XXXI, XXXII, Q-42-I, II, VII, VIII and the Priority 2030 Program. The study of the morphology, internal structure, and chemical composition of the fluidolite was carried out at the research laboratory center of the Ural State Mining University (Yekaterinburg). The morphological study was carried out using an optical microscope MBS 10 in reflected light and a scanning electron microscope VEGA LMS from TESCAN; the composition of minerals was determined using an energy dispersive prefix Xplore 30 Oxford Instruments, the program "Aztec" U=20 kV, I=3 hA. X-ray examinations were performed using a POWDIX 600 diffractometer. **Results.** Fluidolites as products of fluid-gas processes are confined to the feathering seams of the Sebeta-Huuta fault system. They have a complex polymineral composition, where, along with the predominant aqueous sulfates of iron and magnesium – magnesiocopiapite, epsomite with their dehydration products fibroferrite, there are rarer ones, such as slavikite and microcrystals of an accurately undiagnosed sulfate containing magnesium and iron. Along with the clastic silicate material, small kaolinite crystals were found among needle clusters of fibroferrite and areas of a "microcavernous" structure were found, where aluminosilicate fine-dispersed material is relatively evenly distributed among sulfates. Clusters of nanominerals containing potassium are sometimes found in the composition of the latter. **Conclusions.** New data have been obtained on the mineralogical composition of fluidolites, as products of hypogenic fluid-gas processes of the quarter, close to fumarolic phenomena within the Baidaratsky block of the Polar Urals.

Keywords: Polar Urals, Baydaratsky block, fluidolites, activated structures, minerageny, weathering crust, slavikite

Acknowledgements: The research was prepared assisted by the research laboratory center of the Ural State Mining University (Yekaterinburg) and financially supported by the program of strategic academic leadership.

For citation: Dushin V.A., Sustavov S.G., Vlasov I.A., Prokopchuk D.I. Geology and mineral composition of fluidolites of the Meso-Cenozoic stage of development of activated structures of the Polar Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 36–46. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554

Введение

В сложившихся к настоящему времени представлениях об эволюции Полярного Урала основное внимание уделялось докембрийской и палеозойской эпохам его становления, тогда как мезозойско-кайнозойский мегакомплекс относительно слабо освещен в литературе. Это вызвано, с одной стороны, ограниченным распространением за исключением квартера, мезозойских осадков в горной части Урала, а с другой – сложностью определения возраста и бытующим представлением о его невысокой перспективности в отношении рудных полезных ископаемых. Подобная ситуация начала постепенно исправляться в связи с обнаружением мезозойских фосфоритов гипогенно-гипергенного генезиса в бассейне р. Бол. Пайпудыны (Сафроновское месторождение) и фосфорно-урановых (Високосное проявление) в бассейне р. Нярма Яхи [1, 2].

Первые сведения о корях выветривания были получены П.Д. Миклухо-Маклаем в 1955 г. по карбонатным породам харотской свиты [3]. Затем в 1960-х гг. В.И. Краснокутским в районе оз. Есто-То была обнаружена кора выветривания с повышенным содержанием фосфора, алюминия, никеля, кобальта, марганца, а в среднем течении р. Нарма-Яхи при проведении ГСР-50 [2] тюменскими геологами (Ю.Ю. Эрвье, В.Г. Криночкин и др.) совместно с сотрудниками Шабровской экспедиции выявлено первое рудопроявление гипогенно-гипергенных урансодержащих брекчиевых фосфо-

ритов. Естественно, это привело к более пристальному изучению «молодых» мезозойско-кайнозойских процессов и структур их проявления, а также влияния последних на общую потенциальную рудоносность территории.

Формирование мезозойско-кайнозойских тектонических структур Полярного Урала имеет длительную, многоступенчатую геологическую историю. Их становление связано с позднепалеозойско-раннемезозойским коллизионным этапом развития Уральско-подвижного пояса. Переход к постколлизионному раннемезозойскому платформенному этапу характеризовался завершением проявления унаследованных вертикальных тектонических движений с образованием горстовых блоковых дислокаций в тектонически напряженных зонах и грабеновых структур на участках локальных тектонических растяжений. Позднемезозойско-кайнозойские тектонические процессы эмерсивного геотектонического этапа развития Полярного Урала сохранили унаследованность вертикальных движений, сопровождались значительными амплитудами воздымания и эрозией горных сооружений, а также перестройкой речной сети. Кроме того, с этим этапом связано образование своеобразных локальных структур тектономагматической активизации, приуроченных к зонам деструкции земной коры и выраженных в современном рельефе автономными морфоструктурами и линейными зонами северо-западного направления (Приморские, Себета-Хуугинские нарушения), отличающихся набором

слагающих их геологических и рудных формаций. Кроме того, широкое привлечение изотопно-геохронологических исследований в 70-х и 90-х гг. прошлого века по урановым объектам (Ново-Харбейское, Базисное, Андриано-Павловское и др.) и магматическим комплексам кислого и основного состава показывало наличие мезозойских и даже кайнозойских меток при диагностике цирконов, настурана U-Pb (SHRIMP) Pb-Pb методами в различных лабораториях России (ВСЕГЕИ, Невская лаборатория, ВИМС). Полученные данные свидетельствуют о весьма широком участии мезозойско-кайнозойских процессов (метасоматоз, магматизм, рудогенез) в становлении геологического облика региона.

Методика исследования

Данная публикация посвящена краткому описанию геологического положения и характеристике коренного выхода своеобразных слаболитифицированных рыхлых пород (флюидолитов), вероятных индикаторов наиболее «молодых» современных (кайнозойских) эндогенных процессов. Работы выполнялись в рамках геологического доизучения листов R-42-XXXI, XXXII (Байдарацкая площадь) масштаба 1:200000 (ГДП-200/2) и программы «Приоритет 2030» Уральского государственного горного университета (УГГУ) на 2021–2030 гг. Исследования включали широкий круг задач от изучения петрографии и петрохимии пород до выяснения их минерального состава, а также геологического строения, тектонических и геоморфологических особенностей территории.

Изучение морфологии, внутреннего строения, химического состава флюидолитов, проявленных на поверхности натечных новообразований в виде сульфатных корок, проводилось в лабораториях УГГУ (г. Екатеринбург). Морфологическое изучение было проведено с помощью оптического микроскопа МБС 10 в отраженном свете и сканирующего электронного микроскопа VEGA LMS фирмы TESCAN (параметры съемки $U=20$ кВ, $I=300$ пА, $WD=15$ мм); состав минералов определялся с использованием энергодисперсионной приставки Xplore 30 фирмы Oxford Instruments, программа «Aztec» $U=20$ кВ, $I=300$ пА, (аналитик И.А. Власов, УГГУ). Рентгенографические исследования выполнены с помощью дифрактометра POWDIX 600 (параметры съемки: Cu – анод, $U=30$ кВ, $I=10$ мА, фильтр – Ni 20μm (аналитик Г.М. Воротинова) в научно-исследовательской и испытательной лаборатории вещественного состава пород и руд УГГУ.

Объект исследования

Рассматриваемая в работе территория относится к самой северной части Урала – аллохтонному Байдарацкому блоку, принадлежащему Сакмаро-Лемвинской структурно-формационной зоне (СФЗ).

Это в различной степени метаморфизованные (зеленосланцевая фация) осадочные, вулканогенно-осадочные шельфовые и склоновые комплексы нижнего, отчасти среднего палеозоя, осложненные различной тектоникой. Перекрывающие их мезозойско-кайнозойские отложения представлены слабо литифицированными и рыхлыми осадочными формациями морского и континентального генезиса, принадлежащие Зауральской СФЗ.

Главной особенностью Байдарацкого блока является широкое развитие покровно-надвиговых дислокаций, нарушенных системой субвертикальных активизационных структур сбросо-раздвигового типа. При этом последние формируют ступенчатые тектонические зоны субпараллельные арктической береговой линии, сопровождаемая наиболее молодым мезозойско-кайнозойским магматизмом и гидротермально-метасоматическими процессами, в том числе флюидно-фреатического типа.

Наиболее крупными хорошо проявленными разломами активизационной природы, фиксируемыми в пределах Байдарацкого блока, являются системы Приморских и Себета-Хуутинских дизъюнктивов (рис. 1) северо-западного ($320-340^\circ$) простирания. Первый трассируется немзияхинским лампроитовым (J_1nmz), левдиевским и торасовейским граносиенит-гранитным (T_2ld), а последний – осовейским калиево-трахитовым (K_1os) и яляяхским эссексит-долеритовым (T_2-J_1jl) комплексами.

Не обсуждая информацию о магматизме и рудообразовании в целом мезозойско-кайнозойского платформенного мегакомплекса, остановимся лишь на гипогенных образованиях, обнаруженных нами в процессе исследований в Байдарацком блоке Полярного Урала. Так, в скальных обнажениях нижнего течения р. Мал. Хууты нами были установлены натечные образования (флюидолиты) светло-серого, желтовато-серого цветов, приуроченных к трехметровой зоне повышенной трещиноватости и расланцевания северо-западного простирания (Аз. пад. $40-60^\circ$, $\angle 75-80^\circ$). Данные натечные отложения ввиду их растворимости в воде сохранились только на «отрицательных» скальных выходах и в небольших полостях (рис. 1) в полосе развития апо-вулканогенных сланцев, алевролитов и углеродсодержащих сланцев орангской свиты (C_3-O_1). Вмещающие породы дислоцированы и смяты в складки с размахом крыльев 5–7 м (Аз. пад. 70° , $\angle 45^\circ$; 95° , $\angle 50^\circ$; 115° , $\angle 25^\circ$; 165° , $\angle 35^\circ$; 215° , $\angle 60^\circ$). Флюидолиты располагаются в узле пересечения оперяющих структур Себета-Хуутинской системы региональных нарушений и установлены вблизи маломощных (0,3 м) выходов апогипербазитовых тальцитов (Аз. пад. 85° , $\angle 90^\circ$) и кварц-карбонатных, кварц-сульфидосодержащих линз и прожилков (Аз. пад. $60-40^\circ$, $\angle 80^\circ$).

Натечные образования представлены кавернозным, рыхловатым и коркоподобным материалом. Под микроскопом в отраженном свете основная масса отложений представлена натечным неясно полосчатым мелко глобулярным, местами скорлуповатым агрегатом желтой окраски. Размер отдельных глобул составляет 1,0–1,5 мм. В дальнейшем глобулы консолидируются в слои, из которых формируются более крупные скорлуповатые и сплошные образования, соединяющиеся между собой и постепенно слагающие всю корку. Подобное строение определяет присутствие в породе множества пустот различного размера и формы. Наиболее мелкие составляют доли миллиметра, наиболее крупные могут превышать мощность флюидолита, располагаясь поперек, имеют овальную, трубчатую и более сложные формы. Минерал легко растворяется в воде при комнатной температуре. Показатель преломления глобул $n < 1,570$.

Глобулы, выходящие на поверхность, очень редко ничем не покрыты и имеют «зализанный» вид. Чаще они обрастают поздними белыми сульфатами, нередко перемешанными с обломочным материалом (рис. 2). Полости частично заполнены сульфатами, образовавшимися позднее. В некоторых случаях на поверхности отдельных полостей видны остаточные трещины дегидратации, свидетельствующие о присутствии более ранних нестабильных сульфатов. В новообразованиях встречаются участки, имеющие ограниченные линейно-трещинные зоны. Последние состоят из нескольких субпараллельных трещин разрыва, которые после возникновения были залечены. На подобных участках возникает много мелкообломочного материала, который вместе с поздними сульфатами заполняет полости флюидолита.

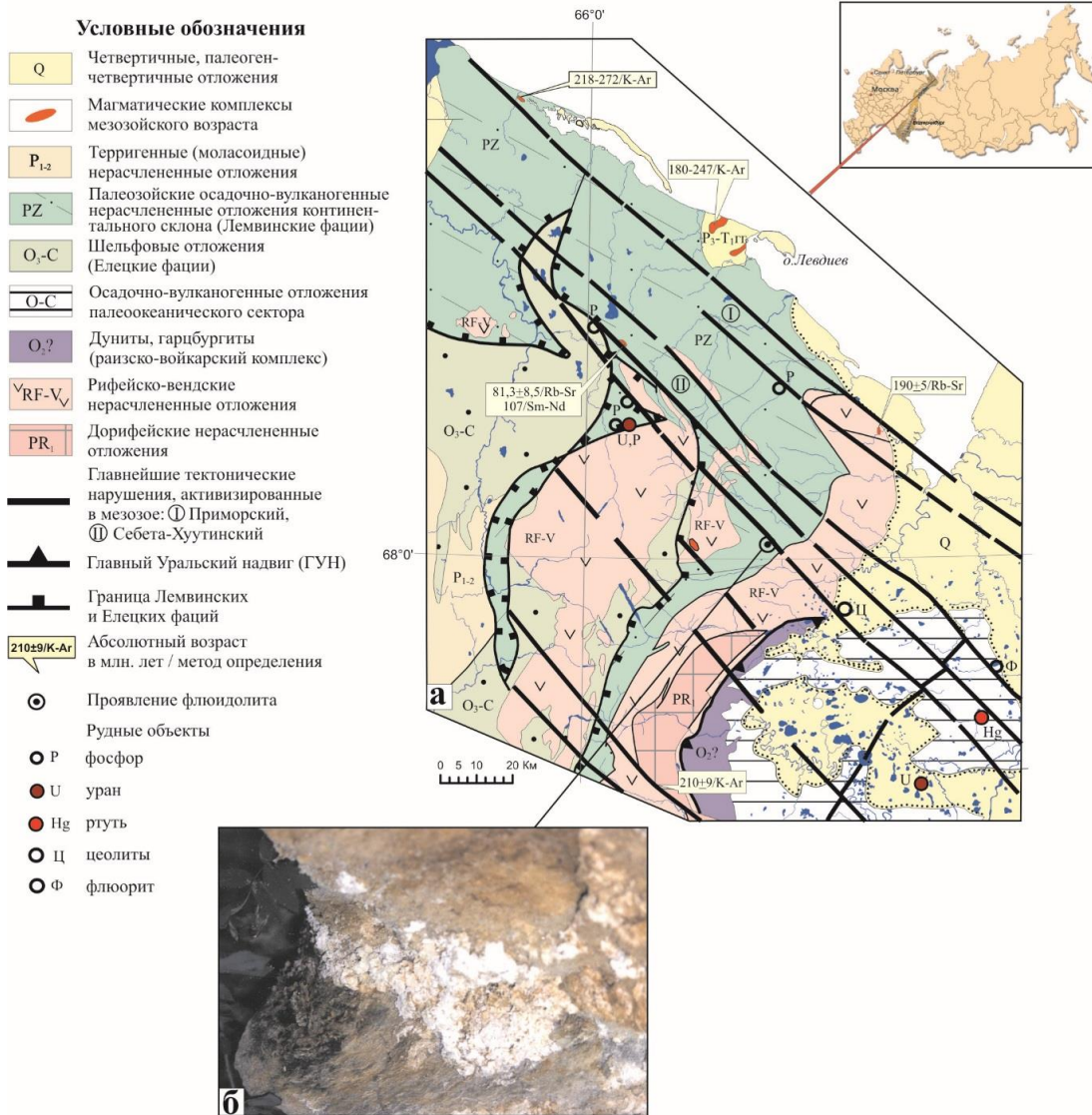


Рис. 1. Схематическая карта Полярного Урала (а), выходы флюидолитов – белое (б)
Fig. 1. Schematic map of the Polar Urals (a), fluidolite outputs – white (b)

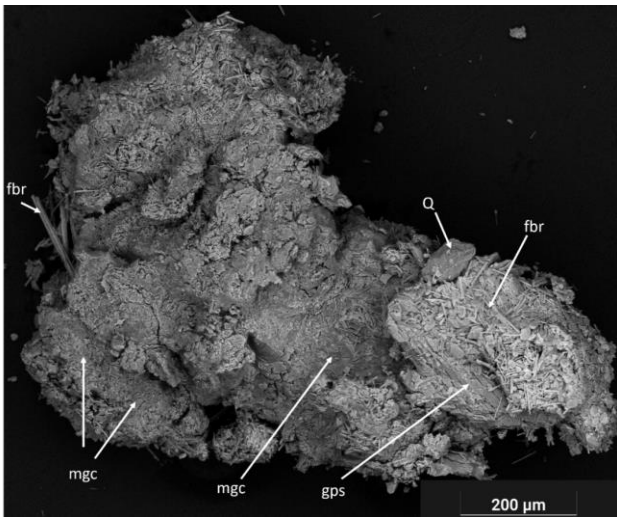


Рис. 2. Внешний вид фрагмента флюидолита (сульфатной корки). Основа представлена магнизиокопиапитом (*mgc*); игольчатые кристаллы фиброферрита (*fbr*); на поверхности лежит кристалл гипса (*gpc*) с обломком кварца (*Q*). BSE изображение

Fig. 2. Appearance of a fragment of fluidolite (sulfate crust). The base is represented by magnesiocopiapite (*mgc*); needle-like crystals of fibroferrite (*fbr*); gypsum crystal (*gpc*) with a fragment of quartz (*Q*) lies on the surface. BSE image

Для определения фазового состава натечного образования было проведено исследование на дифрактометре. Основные значения полученного спектра: 9,33(85)–6,20(75)–5,60(80)–5,35(40)–4,22(100) отвечают магнизиокопиапиту – $MgFe_4^{3+}(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$. Под

электронным микроскопом поверхности глобул имеют черепитчатое строение (рис. 3, а), которое при большем увеличении преобразуется в агрегат тонкопластинчатых кристаллов (рис. 3, б). Группа копиапита содержит в своем составе семь минералов [4–8].

Водный сульфат магния – второй минерал, участвующий в строении флюидолита, сложен мелкими зернистыми выделениями эпсомита – $Mg(SO_4) \cdot 7H_2O$ [9, 10] (рис. 4, а), или продуктами его дегидратации, врастающими в магнизиокопиапит (рис. 3, а). Наиболее интенсивные линии этого минерала присутствуют в спектре сульфатной корки и имеют значения 5,35(26)–4,21(100)–3,79(13)–2,880(20)–2,677(24)–2,659(22). При понижении влажности в сухой обстановке эпсомит ступенчато дегидратирует, переходя сначала в шестиводный гексагидрит, затем в пятиводный пентагидрит, далее в четырехводный тетрагидрит и двухводный сандерит. Процесс заканчивается на одноводном представителе – кизерите. Наиболее интенсивные линии этих минералов присутствуют в дифракционном спектре флюидолита (сульфатной корки).

Третий по количественному содержанию минерал представлен бесцветными и белыми волокнистыми или волосовидными индивидами, собранными в метелки или образующими параллельно-волокнистые выделения с перламутровым блеском. Длина некоторых волокон приближается к 1,0 мм, при поперечном сечении, составляющем сотые доли миллиметра. Обычно они обрастают глобулы магнизиокопиапита и заполняют полости в нем.

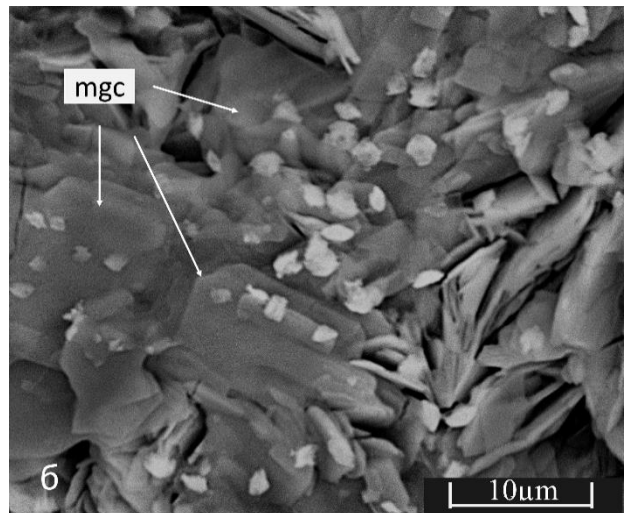
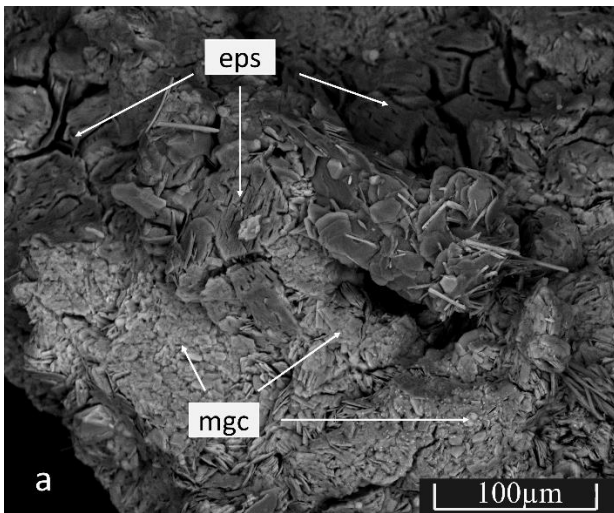


Рис. 3. Минералы флюидолита (сульфатной корки): а) черепитчатое строение глобулы магнизиокопиапита с вростками эпсомита с трещинами дегидратации; б) сrostки пластинчатых кристаллов магнизиокопиапита с микрокристаллами точно не диагностированного магнизиально-железистого сульфата. BSE изображение

Fig. 3. Minerals of fluidolite (sulfate crust): а) tiled structure of a magnesiocopiapite globule with epsomite accretions with dehydration cracks; б) accretions of plate crystals of magnesiocopiapite with microcrystals of an accurately undiagnosed magnesia-ferruginous sulfate. BSE image

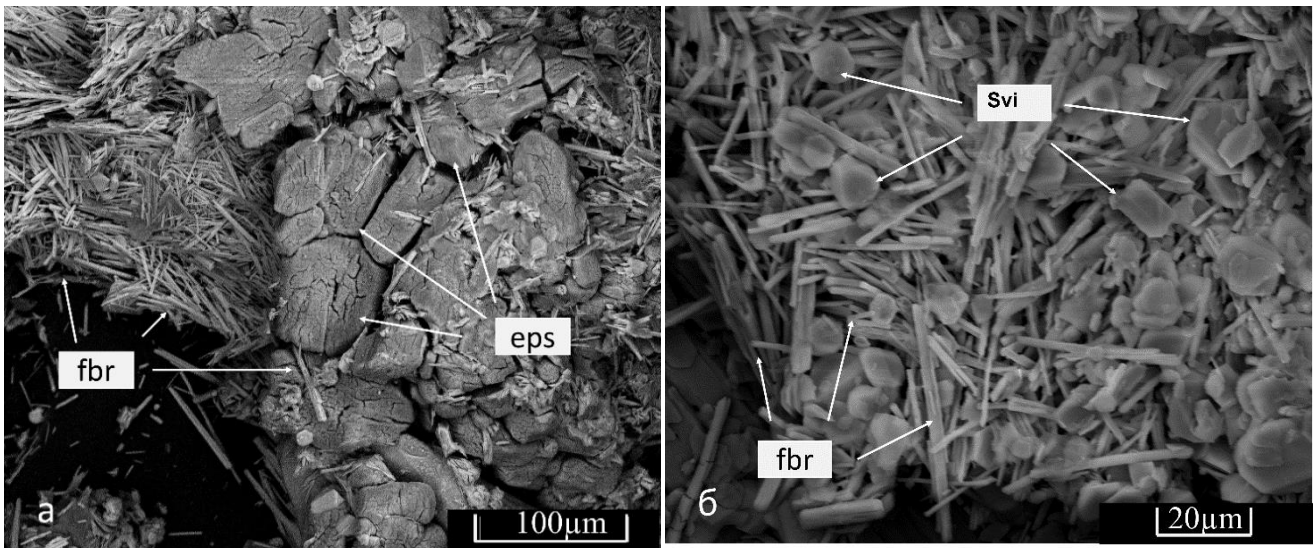


Рис. 4. Взаимоотношение минералов в флюидолите: а) зернистый агрегат эпсомита (eps) с трещинами дегидратации срстается с игольчатыми скоплениями фиброферрита (fbr); б) игольчатый агрегат фиброферрита с множественными сростками таблитчатых кристаллов славикита (svi). BSE изображение
Fig. 4. Relationship of minerals in fluidolite: a) granular epsomite aggregate (eps) with dehydration cracks fuses with needle clusters of fibroferrite (fbr); б) needle aggregate of fibroferrite with multiple accretions of tabular crystals of slavikite (svi). BSE image

В некоторых случаях слагают изолированные участки вытянутой формы до 7 мм в длину и до 2 мм в поперечнике в самой породе или ее полостях. При определении качественного состава подобных участков было выявлено обогащение их железом и серой, лишь единичные иголки содержат в своем составе железо, магний, алюминий и серу.

Рентгеновская диагностика волокнистого сульфата показала его идентичность фиброферриту [11, 12] – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (рис. 5). Редкие волокна имеют второй набор элементов, соответствующий минералу ряда галотрихит-пиккерингит – $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ [13]. В единичных случаях

среди игольчатых индивидов фиброферрита встречаются аналогичные по форме иголки гипса. Среди волокнистых скоплений фиброферрита также обнаружены мелкие изометричные в поперечном сечении, иногда псевдооктаэдрические кристаллики славикита – $(\text{H}_3\text{O}^+)_3\text{Mg}_6\text{Fe}_{15}(\text{SO}_4)_{21}(\text{OH})_{18} \cdot 98\text{H}_2\text{O}$ [14, 15], обычно уплощенные в плоскости базипинакоида (рис. 4, б; 6, а). Первоначально он ошибочно был определен как паракокимбит. После определения состава была установлено, что в нем среди катионов помимо железа еще присутствует магний, но нет натрия, который был приведен в первом описании минерала.

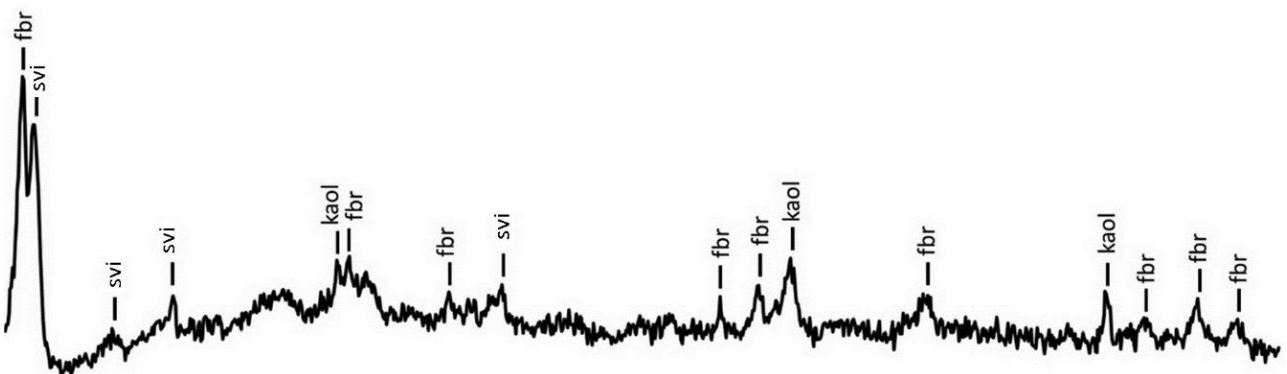


Рис. 5. Дифрактограмма игольчатого сульфата. Дифракционные отражения фиброферрита – fbr, славикита – svi, каолинита – kaol
Fig. 5. Diffractogram of needle sulfate. Diffraction reflections of fibroferrite – fbr, slavikite – slv, kaolinite – kaol

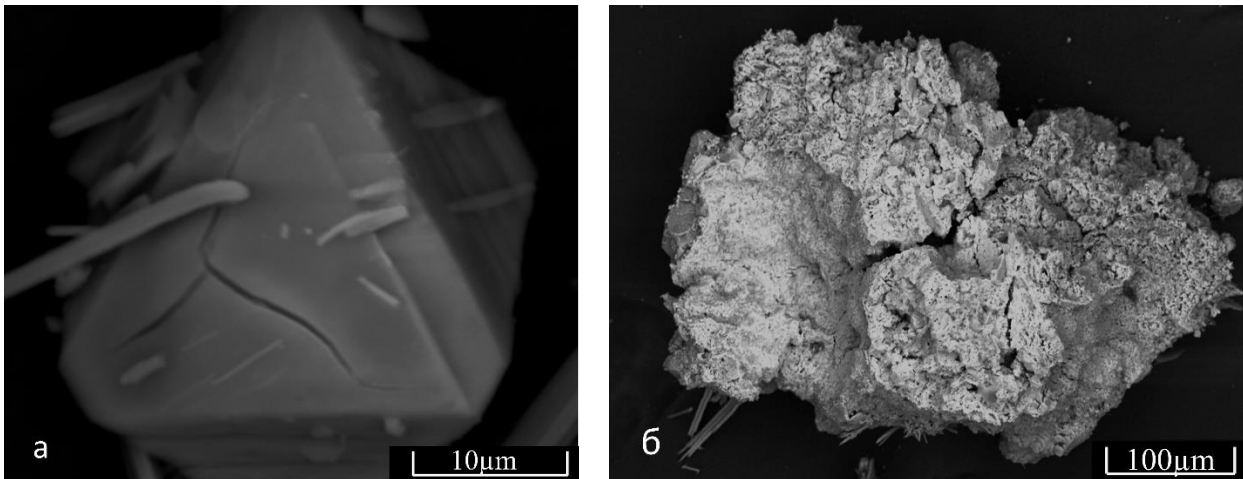


Рис. 6. Особенности строения флюидолита и морфология минералов: а) псевдооктаэдрический кристалл славикита с нарощими иголками фиброферрита; б) мелкоячеистый силикатно-сульфатный участок флюидолита. BSE-изображение

Fig. 6. Features of the structure of fluidolite and morphology of minerals: a) pseudohexagonal crystal of slavikite with overgrown needles of fibroferrite; б) fine-meshed silicate-sulfate section of fluidolite. BSE image

Присутствие славикита было подтверждено съемкой дифрактограммы игольчатого сульфата, где наряду с дифракционным спектром фиброферрита присутствуют основные отражения славикита (рис. 5). Это третья находка данного минерала в России, ранее он был определен в 1940 г. в зоне окисления оловорудного месторождения Эге-Хая (Якутия) совместно с фиброферритом и передан С.С. Смирновым в музей им. А.Е. Ферсмана. Предположительно указывался Л.Д. Герман-Русакowej в 1962 г. в списке минералов зоны окисления Блявинского медно-колчеданного месторождения [16] в прожилках фиброферрита, в приводимой формуле отсутствовал магний, но присутствовали щелочные элементы натрия и калий, которые в его составе отсутствуют. В 2015 г. определен А.В. Касаткиным по материалам сборов А.И. Тищенко в 1999 г. в Петропавловском карьере в Крыму, где славикит присутствует в зоне окисления сульфидной вкрапленности юрских вулканогенных отложений и слагает светло-желтые корки в ассоциации с алуногеном и гипсом.

Наряду с этим среди скоплений фиброферрита со славикитом присутствуют каолинит, отражения которого зафиксированы на дифрактограмме (рис. 5). Внешне кристаллы каолинита близки по форме кристаллам славикита, только, по-видимому, более уплощенные и образуют с ним сростки. Количество его существенно меньше, и он редко фиксируется при электронно-микроскопическом изучении.

В флюидолите встречаются небольшие изолированные участки овальной формы. В них вместе с сульфатами наблюдается тесное прораствание с очень мелкими выделениями силикатов, в составе которых наряду с кремнием принимают участие

алюминий и калий. Выделения силикатов в большинстве случаев имеют округлую или близкую к изометричной форму, их размеры не превышают 10 мкм. Состав их, по-видимому, представлен мусковитом, образованным из газовой фазы.

В единичных случаях в породе отмечаются белые гибкие чешуйки с перламутровым блеском. Они имеют близкое к изометричному сечению до 1 мм в поперечнике при толщине менее 0,1 мм. По оптическим константам и физическим свойствам минерал соответствует гидромусковиту, но образовавшемуся при выветривании окружающих пород.

В некоторых полостях флюидолита встречаются уплощенно-призматические кристаллы с сечением поперек уплощения, близким к ромбическому, с размером до 1,0 мм по длинной стороне ромба. Кристаллы имеют бледно-желтый цвет, низкую твердость, совершенную спайность в одном направлении, отмечаемую только под микроскопом, а по морфологии и наблюдаемым свойствам они соответствуют гипсу.

Обсуждение результатов

Как показали наши исследования, локализация вышеописанных флюидизатных образований определяется главным образом тектоническим фактором. Их проявление связывается с позднекайнозойским повторноколлизийным эпиплатформенным этапом.

В северной части Полярного Урала по геологическим, геоморфологическим параметрам отчетливо обособляется Байдарацкая структура опускания, которая прослеживается по результатам геологического картирования и дешифрирования аэрокосмических материалов. Наиболее крупными тектони-

ческими нарушениями в пределах Байдарацкого блока являются (с севера на юг) системы Приморских, Себета-Хуутинских и Малохуутинско-Лаборовских разломов. Кроме северо-западных ориентировок линеаментов, в пределах Байдарацкого аллохтонного блока выделяются субмеридиональные и частично северо-восточные линеаменты, представляющие поперечные локальные разломы сбросового типа. Системы вышеперечисленных северо-западных структур, как правило, представлены в рельефе протяженными прямолинейными линеаментами либо их параллельными сериями. Они нередко дискордантны по отношению к другим структурным элементам. Четкая выраженность в рельефе, хорошая сохранность линеаментов, их наложенный характер на пермские отложения Карской структуры (Пай-Хой) подтверждают обоснование мезозойского (с подновлением в кайнозой) возраста данных тектонических зон.

Среди горных пород в последнее время стали выделять особую группу пород под общим названием флюидолиты, не принадлежащих к осадочным, магматическим, метаморфическим и метасоматическим образованиям [17]. Их формирование связывается с функционированием водно-газовых потоков, под давлением прорывающихся из глубоких горизонтов литосферы или даже мантии. Они несут к поверхности суспензию, включающую в себя частицы захваченных по пути движения вмещающих пород или продуктов взрыва. Эта водно-газовая смесь в процессе подъема может вступать в реакции как с кислородом воздуха у поверхности, так и в глубине с содержащимися в них элементами и образовывать новые минералы [17].

Представленные выше сульфатные агрегаты можно рассматривать в качестве продуктов подобных флюидно-газовых процессов, т. е. проявления флюидолитов. Они встречаются в зонах активизации, имеют сложный полиминеральный состав, где наряду с преобладающими водными сульфатами железа и магния: магнезиокопиапитом, эпсомитом с продуктами его дегидратации и фиброферритом, присутствуют более редкие, такие как славикит и микрокристаллы точно не диагностированного сульфата, содержащего в составе магний и железо. Помимо этого, в корке встречается гипс, как в виде классических кристаллов, так и в виде мелких иголок. Некоторые иголки могут быть представлены минералами ряда галотрихит-пиккерингит. Вместе с этим в корке встречены обломки зерен кварца, гидратированных чешуек мусковита. Наряду с обломочным силикатным материалом среди игольчатых скоплений фиброферрита установлены мелкие кристаллы каолинита и встречены участки «микрочавернозного» строения, где среди сульфатов сравнительно равномерно распределен алюмосиликат-

ный тонкодисперсный материал, в котором иногда встречаются микронные скопления, в которых выявлен калий.

Природа сульфатных отложений многогранна, с одной стороны они могут быть результатом техногенной деятельности человека, находиться в мочажинах колчеданных месторождений или присутствовать в горелых отвалах угольных месторождений, с другой стороны, они обычные минералы вулканической деятельности, где участвуют в отложении фумарол или присутствуют в составе гидротермальных месторождений [18].

В данном случае основной вопрос связан с эндогенной или гипергенной природой изучаемых сульфатных корок. Рассмотрим его на примере состава конденсатов фумарольных газов вулкана Безымянный. В одной из проб этого конденсата состав следующий (в г/л): $\text{SO}_4^{2-} - 0,2680$, $\text{Cl}^- - 0,0955$, $\text{HCO}_3^- - 0,1210$, $\text{Na}^+ - 0,0360$, $\text{K}^+ - 0,0105$, $\text{Ca}^{2+} - 0,1200$, $\text{Mg}^{2+} - 0,0105$, $\text{Fe}^{3+} - 0,0068$, $\text{Al}^{3+} - 0,0104$, $\text{H}^+ - 0,0002$, $\text{H}_2\text{SiO}_3 - 0,0280$.

Большинство катионов и анионов, присутствующих в конденсате фумарольных газов, входят в состав сульфатов корки, кроме этого, в составе конденсата присутствует кремниевая кислота. В случае падения активности более реакционноспособных кислотных анионов более сильных кислот мы можем ожидать образования силикатов. Это мы наблюдаем в нашем случае, и это указывает на эндогенную природу сульфатных корок с примесью новообразованных силикатов алюминия в виде каолинита, а также, по видимому, слюды. Ничего подобного ни на колчеданных месторождениях, ни на горящих отвалах угольных месторождений не установлено.

Исследованиями различных ученых установлено преобладающее развитие среди сульфатных отложений колчеданных и техногенных объектов Урала представителей Mg^{2+} , реже других халькофильных и литофильных элементов [19–21]. На Урале магнезиокопиапит, не содержащий закисного железа, установлен в горящих угольных отвалах Копейского месторождения. В центральных частях угольных терриконов происходит плавление пород, а образование сульфатов происходит под верхней коркой пород.

В долгоживущих тектонически активных участках выделяется огромная энергия, которая помимо кинетической переходит в тепловую и может способствовать частичному плавлению пород. Газовая составляющая, образующаяся при этом, при кристаллизации расплава мигрирует по проницаемым участкам к поверхности и приводит к отложению подобных сульфатно-силикатных корок, которые трассируют их в той или иной степени.

Подобные образования установлены нами не только в оперяющих дизъюнктивах Малохуутин-

ско-Лаборовской, Себета-Хуугинской и Приморской поперечных (северо-западных) системах разломов Байдарацкого блока, но и в более южных частях Полярного Урала.

Следует отметить, что выделенные ранее низкотемпературные верхнепалеогеновые (палеогено-эоценовые по В.И. Силаеву, 1996) образования, известные как коры выветривания линейного типа [4], несут достоверные признаки наличия эндогенных сопряженных либо более молодых процессов. Это достаточно уверенно было установлено на Сафроновском месторождении, где наряду с фосфатами было выявлено золото и платиноиды гипогенного типа. Известно, что большинство установленных проявлений линейной коры выветривания на Полярном Урале приурочено к нижним ярусам рельефа, отвечающим поверхности миоцен-олигоценного пенеплена. Они расположены преимущественно в пределах эрозионно-структурных депрессий субмеридионального простирания (Нияюская, Верхнелемвинская, Пайпудынская и др.), образованных узлами сопряжения и сочленения разломов северо-западного и северо-северо-восточного направлений. Это наиболее молодые деформации мезо-кайнозоя, предопределившие современный структурно-тектонический облик региона, представляющий собой рифтогенно-блоковый тип мегаструктур. Проницаемые зоны служили подводными каналами флюидно-магматических систем, а в экзогенных условиях – наиболее благоприятными объектами формирования линейной коры выветривания. В настоящее время все более очевидным становится факт взаимосвязи линейных кор выветривания с зонами активизации, что во многом объясняет специфику металлогенически сопряженных рудно-метасоматических систем, где наряду с фосфоритами, оксидными марганцевыми рудами, присутствуют проявления и спорадические находки алмазов, их минералов-спутников, высокие концентрации редких, благородных металлов и сурьмы.

Анализ размещения рудной минерализации в пределах зоны (области) Себета-Хуугинской системы северо-западных лениаментов показал, что они контролируют проявления цеолитов (Неропейское), ртути (Сфинкс), урана (Нижнешучьинское) в Щучьинском блоке, а в Оченырском и его северном обрамлении – фосфора, урана (Нестеровское, Високосное), флюорита. При этом в непосредственной близости от системы дизъюнктивов как на западе (р-н оз. Освей-то), так и на востоке (р. Щучья) известны выбросы в скважинах газа.

Следует также иметь в виду, что данные структуры контролируют своеобразный освейский комплекс калиевых трахитов возрастом 81 млн лет, который, естественно, сопровождается поствулка-

ническими эманациями, включающими и рудную составляющую.

Заключение

Таким образом, сульфатные корки, идентифицируемые как флюидолиты, встречающиеся в зонах активизации, имеют сложный полиминеральный состав, где наряду с преобладающими водными сульфатами железа и магния: магнезиокопиапитом, эпсомитом с продуктами его дегидратации и фиброферритом, присутствуют более редкие, такие как славикит и микрокристаллы точно не диагностированного сульфата, содержащего в составе магний и железо. Помимо этого, в корке иногда находится гипс, как в виде классических кристаллов, так и в виде мелких иголок. Некоторые иголки могут быть представлены минералами ряда галотрихитпиккерингит. Вместе с этим в корке встречены обломки зерен кварца, гидратированных чешуек мусковита. Наряду с обломочным силикатным материалом среди игольчатых скоплений фиброферрита установлены мелкие кристаллы каолинита и встречены участки микроавернозного строения, где между сульфатов сравнительно равномерно распределен алюмосиликатный тонкодисперсный материал, среди которого встречаются микронные скопления, в которых выявлен калий.

Судя по имеющейся информации на протяжении всего мезозойско-кайнозойского этапа северо-западные системы дизъюнктивов контролировали проявления флюидно-магматических процессов в пределах Полярного Урала. Зародившись, по видимому, как унаследованные разломы трансформного типа, инъецированные дайковым базальт-долеритовым (яляяхский комплекс) магматизмом, эволюционировали далее в виде лампроитового (немзияхинский, марунский комплексы) и калиево-трахитового (освейский комплекс) экстрезивного вулканизма в обстановке континентального рифтогенеза (горячих точек?) и проявились далее в виде описанных флюидолитов квартера. При этом как в мезозойско-кайнозойский платформенный этап, так и в последующий позднекайнозойский повторноколлизийный период происходило образование линейных кор выветривания, накладывающихся впоследствии на флюидно-рудно-магматические, флюидно-фреатические и прочие проявления. Подобная эволюция сформировала повсеместно устанавливаемую в настоящее время гипогенно-гипергенную зональную систему минералообразования в рудах Урала.

Эту сложную комбинацию часто низкотемпературных минеральных ассоциаций необходимо уметь картировать и учитывать при проведении геологических исследований на любых стадиях геологоразведочных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криночкин В.Г., Островский Л.Я., Пенчук В.Н. Линейные тектонические зоны и оруденение Полярного Урала // Полярный Урал – новая минерально-сырьевая база России. – Тюмень; Салехард: Изд-во Тюменского Государственного университета., 1997. – С. 36–41.
2. Силаев В.И. Минералогия фосфатных кор выветривания (Полярный Урал). – СПб: Наука, 1996. – 136 с.
3. Калецкая М.С. Артемий Дмитриевич Миклухо-Маклай // Народное хозяйство Республики Коми. – 1993. – Т. 2. – № 2. – С. 259–264.
4. Bayliss P., Atencio D. X-ray powder-diffraction data and cell parameters for copiapite-group minerals // The Canadian Mineralogist. – 1985. – Vol. 23 (1). – P. 53–56.
5. Jambor J.L., Nordstrom D.K., Alpers C.N. Metal-sulfate Salts from Sulfide Mineral Oxidation // Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2000. – Vol. 40. – P. 303–350.
6. Физико-химическое и калориметрическое изучение алюминиокопиапита и термодинамические свойства минералов копиапитовой группы / Л.П. Огородова, Ю.Д. Гриценко, М.Ф. Вигасина, Д.А. Косова, Л.В. Мельчакова, Д.А. Ксенофонтов, С.К. Дедушенко // Геохимия. – 2021. – Т. 66. – № 3. – С. 281–288.
7. Majzlan J., Michallik R. The crystal structures, solid solutions and infrared spectra of copiapite group minerals // Mineralogical Magazine. – 2007. – Vol. 71 (5). – P. 553–569.
8. Süssle P. Crystal structure and hydrogen bonding of copiapite // Zeitschrift für Kristallographie. – 1972. – Bd. 135. – S. 34–55.
9. Baur W.H. The refinement of the crystal structure of MgSO₄·7H₂O (Epsomite) // Acta Crystallographica. – 1964. – Vol. 17 (11). – P. 1361–1369.
10. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) / А.В. Касаткин, С.Ю. Степанов, М.В. Цыганко, Р. Шкода, Ф. Нестола, Я. Плашил, Э. Маковицки, А.А. Агаханов, Р.С. Паламарчук // Минералогия. Часть 4: кислородные соединения. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 5–31.
11. Lombardo M. Fibroferrite: crystallographic, optical and synthesis experiments. Diss. – Canada, 2010. – 160 p.
12. Scull B.J. Development of melanterite and fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate // Cordilleran Meeting of the Mineralogical Society of America. Development of Melanterite and Fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate. Abstracts of papers submitted to the April meeting. – Los Angeles, 1951. – P. 212–231.
13. Статические и резонансные магнитные свойства галотрихита / Т.М. Васильчикова, О.С. Волкова, Г.В. Раганиян, Л.В. Шванская, А.М. Ковальский, П.Ю. Плечов, Д.С. Батаев, С.В. Таскаев, А.Н. Васильев // Челябинский физико-математический журнал. – 2022. – № 7 (2). – С. 254–262.
14. Laurence N.W. CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. – 2021. – Vol. 85 (3). – P. 291–320.
15. Parafiniuk J., et al. Slavikite revision of chemical composition and crystal structure // American Mineralogist. – 2010. – Vol. 95. – P. 11–18.
16. Герман Л.Д. Некоторые минералы зоны окисления Блявинского месторождения // Кора выветривания. – 1960. – Вып. 3. – С. 117–145.
17. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание третье, исправленное и дополненное. – СПб: Изд-во ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2009. – 200 с.
18. Белогуб Е.В. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. – М.: Наука, 2007. – 160 с.
19. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н. Исследование формирования состава подотвальных вод медноколчеданного месторождения среднего Урала // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 3. – С. 165–176.
20. Sherbakova E., Nikandrova N.G., Zvonareva G. Mössbauer spectroscopy of Fe-containing sulfates // Mitt. Oster. Miner. Ges. – 2004. – Bd. 149. – S. 90–91.
21. Алюминиокопиаптит из Дегтярского медного рудника (Средний Урал) / Ю.В. Ерохин, А.В. Захаров, П.С. Козлов, О.Л. Галахова // Вестник Уральского отделения РМО. – 2018. – № 15. – С. 66–71.

Информация об авторах

Владимир Александрович Душин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; Vladimir.Dushin@m.ursmu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9657-6324>

Сергей Геннадьевич Суставов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии, петрографии и геохимии, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; Sustavov.s@ursmu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4186-0829>

Игорь Александрович Власов, младший научный сотрудник научно-исследовательской и испытательной лаборатории вещественного состава пород и руд Уральского государственного горного университета, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; vlasovbkpost@bk.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1842-8497>

Денис Игоревич Прокопчук, младший научный сотрудник, заведующий лабораторией кафедры геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. uva9090@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.01.2024

Поступила после рецензирования: 24.05.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Krinochkin V.G., Ostrovsky L.Ya., Penchuk V.N. Linear tectonic zones and mineralization of the Polar Urals. *Polar Urals – a new mineral resource base of Russia*. Tyumen-Salekhard, Tyumen State University Publ. House, 1997. pp. 36–41. (In Russ.)
2. Silaev V.I. *Mineralogy of phosphate weathering crusts (Polar Urals)*. St. Petersburg, Nauka Publ., 1996. 136 p. (In Russ.)
3. Kaletskaya M.S. *Artemy Dmitrievich Miklukho-Maklay. National economy of the Komi Republic*, 1993, vol. 2, no. 2, pp. 259–264. (In Russ.)
4. Bayliss P., Atencio D. X-ray powder-diffraction data and cell parameters for copiapite-group minerals. *The Canadian Mineralogist*, 1985, vol. 23 (1), pp. 53–56.
5. Jambor J.L., Nordstrom D.K., Alpers C.N. Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2000, vol. 40, pp. 303–350.
6. Ogorodova L.P., Gritsenko Yu.D., Vigasina M.F., Kosova D.A., Melchakova L.V., Ksenofontov D.A., Dedushenko S.K. Physico-chemical and calorimetric study of aluminocopiapite and thermodynamic properties of minerals of the copiapite group. *Geochemistry*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 281–288. (In Russ.)
7. Majzlan J., Michallik R. The crystal structures, solid solutions and infrared spectra of copiapite group minerals. *Mineralogical Magazine*, 2007, vol. 71 (5), pp. 553–569.
8. Süsse P. Crystal structure and hydrogen bonding of copiapite. *Zeitschrift für Kristallographie*, 1972, Bd. 135, pp. 34–55.
9. Baur W.H. The refinement of the crystal structure of MgSO₄·7H₂O (Epsomite). *Acta Crystallographica*, 1964, vol. 17 (11), pp. 1361–1369.
10. Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Shkoda R., Nestola F., Plashil Ya., Makovitsky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. Mineralogy of the Vorontsov gold deposit (Northern Urals). *Mineralogy. Part 4: Oxygen compounds*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 5–31. (In Russ.)
11. Lombardo M. *Fibroferrite: crystallographic, optical and synthesis experiments*. Diss. Canada, 2010. 160 p.
12. Scull B.J. Development of melanterite and fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate. *Cordilleran Meeting of the Mineralogical Society of America. Development of Melanterite and Fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate. Abstracts of papers submitted to the April meeting*. Los Angeles, 1951. pp. 212–231.
13. Vasilchikova T.M., Volkova O.S., Raganyan G.V., Shvanskaya L.V., Kovalsky A.M., Plechov P.Yu., Bataev D.S., Taskaev S.V., Vasiliev A.N. Static and resonant magnetic properties of halotrichite. *Chelyabinsk Physico-Mathematical Journal*, 2022, no. 7 (2), pp. 254–262. (In Russ.)
14. Laurence N.W. CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 2021, vol. 85 (3), pp. 291–320.
15. Parafiniuk J. Slavikite revision of chemical composition and crystal structure. *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 11–18.
16. German L.D. Some minerals of the oxidation zone of the Blyavinsky deposit. *Weathering crust*, 1960, Iss. 3, pp. 117–145. (In Russ.)
17. *The Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, and impact formations*. 3rd ed., revised and expanded. St. Petersburg, VSEGEI Publ. house, 2009. 200 p. (In Russ.)
18. Belogub E.V. *Sulfates of the Urals: prevalence, crystal chemistry, genesis*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 160 p. (In Russ.)
19. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N. Investigation of the formation of the composition of the subsurface waters of the copper-chipped deposit of the Middle Urals. *Physico-technical problems of mineral development*, 2023, no. 3, pp. 165–176. (In Russ.)
20. Sherbakova E., Nikandrova N.G., Zvonareva G. Mössbauer spectroscopy of Fe-containing sulfates. *Mitt. Oster. Miner. Ges.*, 2004, Bd. 149, pp. 90–91.
21. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Kozlov P.S., Galakhova O.L. Aluminocopiapite from the Degtyarsky copper mine (Middle Urals). *Bulletin of the Ural branch of the Russian Mineralogical Society*, 2018, no. 15, pp. 66–71. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir A. Dushin, Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Vladimir.Dushin@m.ursmu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9657-6324>

Sergey G. Sustavov, Cand. Sc., Associate Professor, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation. Sustavov.s@ursmu.ru

Igor A. Vlasov, Junior Researcher, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; vlasovbkpost@bk.ru. <https://orcid.org/0009-0002-1842-8497>

Denis I. Prokopchuk, Junior Researcher, Head of the Laboratory, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation. uva9090@mail.ru

Received: 24.01.2024

Revised: 24.05.2024

Accepted: 31.01.2025