

ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА



№ 1 · 2023

К 250-летию юбилею старейшей горногеологической школы России <i>Ю. Б. Марин, М. А. Иванов</i>	1
НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ	
Nioboixiolite-(Mn ²⁺), $(\text{Nb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}^{2+})\text{O}_2$, a New Ixiolite-Group Mineral from the Malkhan Pegmatite Field, Transbaikal Region, Russia <i>N. V. Chukanov, I. V. Pekov, N. V. Zubkova, V. O. Yapraskurt, Yu. S. Shelukhina, S. N. Britvin, and D. Yu. Pushcharovsky</i>	8
Хасановит $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ – новый минерал из взгонов природного подземного пожара на Фан-Ягнобском угольном месторождении, Таджикистан <i>М. А. Мираков, Л. А. Паутов, О. И. Сийдра, С. Махмадшариф, В. Ю. Карпенко, П. Ю. Плечов</i>	18
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ	
Самородный кобальт на глубинных горизонтах Кольской сверхглубокой скважины <i>Т. А. Горностаева, А. В. Махов, П. М. Карташов, К. В. Лобанов</i>	37
Типоморфизм аутигенного золота рифейских песчаников Кыввожского золотороссыпного поля (Вольско-Вымская Гряда, Средний Тиман) <i>М. Ю. Сокерин, Ю. В. Глухов, Б. А. Макеев, К. Г. Пархачева, В. А. Салдин, Ю. С. Симакова, Н. В. Сокерина</i>	50
Минералы группы оливина в мелилит-нефелиновых паралавах пирометаморфических комплексов Монголии <i>В. Е. Глушкова, И. С. Перетяжко, Е. А. Савина, Е. А. Хромова</i>	61
Минералы стронция и бария в щелочных породах Большетагнинского ийолит-сиенит-карбонатитового массива (юго-западная окраина Сибирского кратона) <i>В. Б. Савельева, Е. П. Базарова, Е. А. Хромова</i>	78
Флюоборит в рудомещающих скарнах магнетит-полиметаллического месторождения Акташ в Карамазарс (северный Таджикистан) <i>У. А. Ятимов, В. В. Масленников, М. А. Рассомахин, П. В. Хворов, С. М. Лебедева</i>	102
ИСТОРИЯ НАУКИ	
Минералы, названные в честь выпускников и сотрудников Санкт-Петербургского горного университета (к 250-летию юбилею Санкт-Петербургского горного университета) <i>В. Г. Кривовичев, В. В. Смоленский</i>	110





**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМУ
ГОРНОМУ
УНИВЕРСИТЕТУ –
250 ЛЕТ**

К 250-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ СТАРЕЙШЕЙ ГОРНОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ РОССИИ

© 2023 г. Почетный член Ю. Б. Марин¹, *, д. чл. М. А. Иванов¹

¹Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

*e-mail: yubmarin@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 26.12.2022 г.

Принята к публикации 27.12.2022 г.

Статья посвящена 250-летию первого в России высшего технического учебного заведения – Санкт-Петербургского горного университета (Горного института), воспитанники и научные школы которого внесли огромный вклад в развитие горно-геологических наук и обеспечили становление минерально-сырьевой базы России. Освещены основные этапы славной истории Горного института от его возникновения в 1773 г. до наших дней. Подчеркнута постоянная тесная связь с Горным институтом Российского минералогического общества, президиум и библиотека которого уже 154 г. размещается в стенах института и где неизменно проходят заседания, годичные собрания и съезды Общества.

Ключевые слова: Санкт-Петербургский горный университет, 250-летний юбилей, Российское минералогическое общество

DOI: 10.31857/S0869605523010070, **EDN:** NHZOSD

Первому в нашей стране высшему техническому учебному заведению – Горному институту, ныне – Санкт-Петербургскому горному университету, – в 2023 г. исполняется 250 лет. Основанный в 1773 г. Горный институт снискал заслуженную славу одной из старейших мировых горных политехнических школ. Ранее были открыты лишь Высшая горная школа Норвегии в Консберге в 1757 г. и Фрейбергская горная академия в Германии в 1765 г.

За эти 250 лет Горный институт подготовил для России многие поколения горняков, геологов и металлургов. Его выпускники трудятся во многих странах. Среди воспитанников Горного института много славных имен, ставших гордостью не только отечественной, но и мировой науки. Ими созданы научные школы и новые направления исследований, обеспечившие становление минерально-сырьевой базы России – одной из основ экономического могущества страны. Около 160 профессоров и питомцев института были избраны академиками и членами-корреспондентами Российской академии наук, что убедительно свидетельствует о признании их роли в развитии и прогрессе научных горно-геологических знаний. До 1889 г. Горный был единственным горно-техническим вузом России, так что именно с деятельностью его учеников связано становление горнозаводской и металлургической промышленности нашей страны. При деятельном участии ученых Горного института в жизни страны во многих регионах возникли учебные и научные учреждения, послужившие зарождению новых горногеологических школ на Урале, в Донбассе, Сибири и в других горнопромышленных районах. По инициативе профессоров Горного института (многие из них – видные деятели Минер-

ралогического общества) в 1882 г. в нашей стране было создано первое учреждение государственной геологической службы — Геологический комитет России.

Напомним основные этапы славной истории Горного. 21 октября (1 ноября н. ст.) 1773 г. императрица Екатерина II подписала указ об основании *Горного училища*, “где бы преподавались науки, имеющие отношение до рудничного и плавильного дела” (Левинсон Л.Б. *Краткая история Горного института. В кн.: Юбилейный сборник (1773—1923 гг.). Л., 1926. с. 5.*). Одним из организаторов и первым директором училища был **Михаил Федорович Соймонов**, видный государственный деятель времен Екатерины, президент Берг-Коллегии, занимающий значительное место в истории отечественного горного дела. В Уставе Горного училища указывалось: “*Берг-Коллегия надеется, что учащиеся не оставят показать в науках успехи и, употребляя их к общей пользе, доказать усердие к услуге отечества и к пользе оного любовь — долг, которого требует от них благодарность, честность, закон и собственная их самих польза*”. В 1804 г. Горное училище было переименовано в *Горный кадетский корпус*, который в 1806 г. был уравнен в правах с университетами, т.е. был официально признан высшим учебным заведением. В 1817 г., в год основания Минералогического общества, директором Горного корпуса был назначен **Евграф Ильич Мечников**, один из тридцати трех учредителей Минералогического общества, много сделавший для развития и упрочения репутации учебного заведения и созданного при нем Горного музея.

В 1833 г. Горный корпус был переименован в *Горный институт*, а в 1834 г. — в *Институт корпуса горных инженеров*, воспитанники четырех младших классов которого назывались кадетами, двух средних — кондукторами, двух высших — офицерами. В 1866 г. вводится новый устав, в соответствии с которым институт становится гражданским открытым вузом и снова переименовывается в *Горный институт*.

Управление всей деятельностью Института по Уставу 1866 г. возлагалось на Совет, составленный из профессоров, под председательством директора Горного института. Срок обучения на двух существовавших тогда факультетах — горном и горнозаводском — был определен в 5 лет. В 1918 г. был организован геологоразведочный факультет, и в этом же году вуз стал называться *Петроградским горным институтом*.

В дальнейшем названия института еще не раз менялись: с 1924 г. он стал *Ленинградским*, с 1954 г. — *им. Г.В. Плеханова*, с 1991 г. — *Санкт-Петербургским*. С 1993 г., обретя статус технического университета, он уже *Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет)*. В 2013 г. вуз получил имя *Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”*, а с 2016 г. стал называться так, как именуется сегодня: *Санкт-Петербургский горный университет*.

За выдающиеся заслуги в области подготовки кадров для геологии, горного дела, металлургии и развитие науки Горный институт был удостоен высших наград СССР — Ордена Ленина в 1944 г., Ордена Трудового Красного Знамени в 1948 г., Ордена Октябрьской революции — в 1973 г. 30 июля 1996 г. Указом Президента России институт включен в Государственный свод особо ценных объектов культурного наследия народов РФ.

В настоящее время в вузе имеются следующие факультеты: геологоразведочный, горный, механико-машиностроительный, нефтегазовый, переработки минерального сырья, строительный, фундаментальных и гуманитарных дисциплин, экономический, энергетический. Имеется факультет аспирантуры и докторантуры, отдел по координации работы с иностранными учащимися.

Огромное значение в развитии высшего горно-геологического образования в России сыграл созданный одновременно с институтом Горный музей. Его уникальные коллекции, в которых находится более 240000 экспонатов со всех уголков нашей планеты, позволили музею войти в число лучших минералогических музеев мира.

Научные исследования в Горном университете ведутся на 47 кафедрах силами сложившихся научных школ в специально созданных учебных и научно-исследовательских лабораториях, в семи научных центрах и в научно-образовательном центре высо-

котехнологического оборудования “Центр коллективного пользования”. К научной работе активно привлекаются аспиранты и наиболее способные студенты – ассистенты профессоров.

Горный институт осуществляет подготовку кадров по многоуровневой системе: дипломированный специалист (инженер), бакалавр, магистр. Открыт ряд новых перспективных направлений и специальностей, таких как инженерная защита окружающей среды (в геологии, металлургии, горной и нефтедобывающей промышленности); прикладная геохимия, минералогия, петрология; городской кадастр; разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. Выпускники Горного востребованы на рынке труда, отличаются высоким уровнем профессиональной подготовки, отвечающим современным требованиям к высшему образованию.

Минералогическое общество со времени своего возникновения и начала активной научной деятельности прочными узами связано с Горным институтом. Достаточно сказать, что среди тридцати трех любителей и знатоков “Царства минерального”, собравшихся 19 января 1817 г. для учреждения в Санкт-Петербурге Минералогического общества, находились 4 видных деятеля Горного института – **Евграф Ильич Мечников** (несколькими днями позже назначенный директором Института и работавший в этой должности с 1817 по 1824 г.), **Яким Григорьевич Зембницкий** и будущие академики **Василий Михайлович Севергин** и **Дмитрий Иванович Соколов**.

Следует подчеркнуть, что особенно тесной связь Минералогического общества с Горным институтом становится в середине XIX в. после переезда Общества в помещение Горного института. Это случилось весной 1869 г., когда на заседании Общества его президент, профессор (а в 1872–1881 гг. – ректор) Горного института, академик **Николай Иванович Кокшаров** сообщил о готовности Горного института предоставить Минералогическому обществу помещение в здании института. Летом 1869 г. переезд состоялся. И с тех пор вот уже 154 г. все заседания, годовые собрания и съезды Минералогического общества неизменно проходят в Горном институте, где и поныне размещаются президиум и библиотека Общества (рис. 1). Здесь же ежегодно 19 января традиционно отмечается день рождения Общества.

Открывая 16 сентября 1869 г. заседание Минералогического общества, **Н.И. Кокшаров** сказал: “Мы приступаем сегодня к нашим занятиям в новом помещении, в Горном институте. Минералогическое общество уже и прежде было многим обязано этому институту... Теперь Горный институт принимает нас под свой гостеприимный кров. Начальство института, с соизволения главного управляющего Горным ведомством министра финансов, не только отвело Обществу просторное, удобное и во всех отношениях приличное помещение, но вместе с тем продолжает радушнойшим образом оказывать ему все возможные вспоможения”. В ответ на эти слова директор Горного института, профессор **Василий Гаврилович Ерофеев** (активный член Минералогического общества) сказал, что “в настоящее время институту остается радоваться предоставившейся возможности дать Обществу помещение в стенах своих и выразить искреннее желание, чтобы издавна существовавшая связь между им и Обществом крепла более и более для возможно большего успеха и развития у нас минералогических и геологических знаний” (*Записки Минералогического общества. 1870. ч. 5, с. 426.*)

И это были не просто приличествующие случаю слова. Уже в адресе Минералогического общества в связи со 100-летним юбилеем Горного института отмечалось: “Минералогическое общество, с основания своего в 1817 г., всегда было в самой тесной, самой родственной связи с Горным институтом. Бывших воспитанников Горного училища мы видим в числе учредителей Минералогического общества, и затем Горный кадетский корпус, Институт корпуса горных инженеров и, наконец, Горный институт много доставили самых усердных деятелей в наше Общество. Кроме этой духовной связи Горный департамент и Горный институт оказывали также материальную помощь Минералогическому обществу, которое и в настоящее время имеет постоян-



Рис. 1. В библиотеке Российского минералогического общества.

Fig. 1. In the library of the Russian Mineralogical Society.

ный гостеприимный приют под кровлей Горного института...” (*Описание празднования столетнего юбилея Горного института. СПб. 1874, с. 78*).

Продолжается это и поныне уже как исторически сложившаяся традиция. Особенно ярко она проявилось при праздновании 200-летнего юбилея Общества в 2017 г., когда все юбилейные мероприятия и заседания прошли в стенах Санкт-Петербургского горного университета, руководство которого во главе с ректором **В.С. Литвиненко** взяло на себя значительную долю забот по их организационному и финансовому обеспечению. Не случайно на лицевой стороне юбилейной медали Общества изображен фасад Горного университета (рис. 2).

С другой стороны, заседания, собрания и съезды Минералогического общества, а также страницы “Записок” всегда являлись и являются известной трибуной для научных выступлений преподавателей, аспирантов и даже студентов Горного института и, конечно, его питомцев, где бы они ни трудились. Вероятно, не будет преувеличением сказать, что апробация основных результатов диссертационных работ преподавателей и научных сотрудников Горного института — кристаллографов, геохимиков, минералогов, петрографов и специалистов в области изучения месторождений твердых полезных ископаемых — проходила именно на этих площадках. Можно сказать, что в отечественной истории наук о Земле взаимосвязь ученых Минералогического общества и Горного института выглядит неразрывной и в высшей степени плодотворной (рис. 3, 4).

Участвовало Минералогическое общество и в пополнении фондов библиотеки Горного института (особенно изданиями региональных отделений Общества), а также экспозиций Горного музея. Напомним, что в 60–70-х гг. девятнадцатого столетия, когда Минералогическое общество фактически возглавляло систематические геологические исследования территории России, музей Общества (“Минералогический кабинет”) существенно пополнялся коллекциями минералов, горных пород и руд, привозимых экспедициями Общества, а также привносимыми Обществу в дар. Некоторые из даров были весьма внушительны. Например, “минеральная коллекция” графа А.Г. Стро-



Рис. 2. Юбилейная медаль к 200-летию Российского минералогического общества (2017 г.).

Fig. 2. Jubilee medal for the 200th anniversary of the Russian Mineralogical Society (2017).



Рис. 3. Президент Минералогического общества Д.В. Рундквист и ректор Горного института В.С. Литвиненко на торжественном открытии после реставрации минералогических залов Горного музея (1999 г.).

Fig. 3. President of the Mineralogical Society D.V. Rundqvist and Rector of the Mining Institute V.S. Litvinenko at the grand opening after the restoration of the mineralogical halls of the Mining Museum (1999).



Рис. 4. Открытие X съезда РМО в конференц-зале Горного института (2004 г.). Слева направо Д.В. Рундквист, Ю.Б. Марин, В.С. Литвиненко, Н.П. Юшкин.

Fig. 4. Opening of the X Congress of the RMS in the conference hall of the Mining Institute (2004). From left to right D.V. Rundqvist, Yu.B. Marin, V.S. Litvinenko, N.P. Yushkin.

ганова (бывшего президентом Общества) размещалась в 13 шкафах. После переезда Общество обратилось к руководству Горного института “с просьбой принять в свое ведение поименованные коллекции” (*Записки Минералогического общества, 1870, ч. 6, с. 391*), тем самым пополнив уникальное музейное собрание Горного института – Горный музей.

С первого десятилетия существования Минералогического общества пост президента (директора) Общества занимали (после 1917 г. избирались) крупные ученые – питомцы и профессора Горного института: **Яким Григорьевич Зембницкий** (1827–1842), **Степан Семенович Куторга** (1842–1861), **Эрнст Карлович Гофман** (1861–1865), **Николай Иванович Кокшаров** (1865–1892), **Павел Владимирович Еремеев** (1892–1899), **Александр Петрович Карпинский** (1899–1936), **Александр Павлович Герасимов** (1937–1942), **Сергей Сергеевич Смирнов** (1945–1947), **Александр Николаевич Заварицкий** (1947–1952), **Виктор Арсеньевич Николаев** (1952–1960), **Анатолий Георгиевич Бетехтин** (1960–1962), **Павел Михайлович Татарин** (1962–1976), **Дмитрий Васильевич Рундквист** (1987–2014), **Юрий Борисович Марин** (2015–2021, с 2022 – почетный президент). И ныне заметное место в руководстве Общества принадлежит питомцам Горного докторам наук – **Шаукету Каимовичу Балтыбаеву**, **Юрию Леонидовичу Войтеховскому**, **Василию Федоровичу Проскурнину**, **Владимиру Владимировичу Щипцову** (члены Ученого совета и председатели комиссий Общества), а также профессорам Горного университета членам Ученого совета и президиума – **Виктору Ивановичу Алексееву**, **Юрию Леонидовичу Гульбину** и **Михаилу Александровичу Иванову**. Не имея возможности продолжить перечень достойных имен, можно лишь вслед за выдающимся профессором Горного института **Д.П. Григорьевым** повторить: “Чувство глубокой благодарности вызывает череда профессоров института и академиков, сочетавших свои многотруд-

ные служебные обязанности с добровольными заботами о жизни Общества” (*Записки ВМО. 1993, № 3, с. 5*).

Возвращаясь же к юбилейной дате, хотелось бы высказать уверенность в том, что и в дальнейшем не утратят актуальность и по-прежнему будут громко и торжественно звучать слова из приветствия Общества Горному институту 150-летней давности: “Да будут равнины Европейской России, выси Урала и других горных кряжей по-прежнему предметом неутомимых изысканий русских горных инженеров, и да процветают впредь минералогические науки в Горном институте на пользу горного дела в России” (*Описание столетнего юбилея Горного института. СПб. 1874. с. 78*).

Российское минералогическое общество поздравляет Санкт-Петербургский горный университет со славным 250-летним юбилеем, приносит глубокую благодарность за постоянную разностороннюю помощь и искренне желает Горному университету, сохранившему и даже упрочившему свои традиции в столь непростое время, дальнейшего развития и процветания на благо нашей великой Родины.

On the 250th Anniversary of the Oldest Mining and Geological School of Russia

Yu. B. Marin^{a, *} and M. A. Ivanov^a

^a*Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*

^{*}*e-mail: yubmarin@yandex.ru*

The article is devoted to the 250th anniversary of the first higher technical educational institution in Russia – Saint Petersburg Mining University (Mining Institute), whose students and scientific schools made a great contribution to the development of mining and geological sciences and ensured the formation of the mineral resource base of Russia. The main stages of the glorious history of the Mining Institute from its foundation in 1773 to the present day are described. The constant close relationship with the Mining Institute of the Russian Mineralogical Society was emphasized. The Presidium and library of RMS has been located within the walls of the Institute for 154 years and where meetings and congresses of the Society are invariably held.

Keywords: Saint Petersburg Mining University, 250th anniversary, Russian Mineralogical Society

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

NIOBOIXIOLITE-(Mn²⁺), (Nb_{2/3}Mn_{1/3})₂O₂, A NEW IXIOLITE-GROUP MINERAL FROM THE MALKHAN PEGMATITE FIELD, TRANSBAIKAL REGION, RUSSIA

© 2023 г. N. V. Chukanov^{1, 2, *}, I. V. Pekov², N. V. Zubkova², V. O. Yapaskurt², Yu. S. Shelukhina³, S. N. Britvin³, and D. Yu. Pushcharovsky²

¹Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Academician Semenov av., 1, Chernogolovka, Moscow region, 142432 Russia

²Faculty of Geology, Moscow State University, Vorobievsky Gory, Moscow, 119991 Russia

³Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7/9, Saint Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: nikchukanov@yandex.ru

Received November 3, 2022; Revised November 3, 2022; Accepted December 14, 2022

The new ixiolite-group mineral nioboixiolite-(Mn²⁺), ideally (Nb_{2/3}Mn_{1/3})₂O₂, the niobian analogue of ixiolite-(Mn²⁺), was discovered in the Sosedka granitic pegmatite vein, Malkhan pegmatite field, Zabaikalsky Krai (Transbaikal Region), Siberia, Russia. The associated minerals are albite, quartz, microcline, elbaite, beryl, bismuthinite, euxenite-(Y), zircon, rutile, cassiterite, and cannonite. Nioboixiolite-(Mn²⁺) occurs as clusters of dark brown to brown-black prismatic crystals up to 0.8 × 1.5 × 5 mm embedded in albite. The lustre is submetallic to adamantine, and the streak is brown. Cleavage is not observed. The Mohs' hardness is 4.5–5. Density calculated using the empirical formula is equal to 5.803 g cm⁻³. The IR spectrum and reflectance spectra in visible range are given. The chemical composition of nioboixiolite-(Mn²⁺) is (electron microprobe, wt %): MnO 14.94, Sc₂O₃ 1.80, Fe₂O₃ 0.20, Y₂O₃ 1.34, TiO₂ 7.66, ZrO₂ 1.74, SnO₂ 1.01, ThO₂ 0.26, UO₂ 1.44, Nb₂O₅ 42.80, Ta₂O₅ 26.77, total 99.96. The empirical formula is (Nb_{1.59}Mn_{1.04}Ta_{0.59}Ti_{0.47}Sc_{0.13}Zr_{0.07}Y_{0.06}Sn_{0.03}U_{0.03}Fe_{0.01}³⁺)_{Σ4.02}O₈ (Z = 1). The crystal structure was determined using single-crystal X-ray diffraction data and refined to R = 0.0474. The new mineral is isostructural to other ixiolite-group members. Nioboixiolite-(Mn²⁺) is orthorhombic, space group: *Pbcn*, a = 4.762(2) Å, b = 5.739(1) Å, c = 5.149(1) Å, V = 140.7(1) Å³. The strongest lines of the powder X-ray diffraction pattern [d, Å (I, %) (hkl)] are: 3.662 (29) (110), 2.984 (100) (111), 2.505 (21) (021), 1.775 (21) (130), 1.748 (28) (202), 1.726 (35) (221), 1.553 (20) (113), 1.473 (19) (023), 1.463 (30) (311, 132).

Keywords: nioboixiolite-(Mn²⁺), new mineral, ixiolite group, columbite supergroup, crystal structure, Malkhan pegmatite field

DOI: 10.31857/S0869605523010033, **EDN:** NFRPRT

1. INTRODUCTION

According to the recently approved by the Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification of the International Mineralogical Association (IMA CNMNC) nomenclature of columbite-supergroup minerals (IMA MEMORANDUM 108-SM22; Chukanov et al., 2022), the well-known mineral ixiolite got the new species name ixiolite-(Mn²⁺) and the ide-

alized formula (Ta_{2/3}Mn_{1/3}²⁺)O₂. The new mineral species nioboixiolite-(Mn²⁺), ideally (Nb_{2/3}Mn_{1/3}²⁺)O₂, described in this paper is isostructural with ixiolite-(Mn²⁺) being its Nb-dominant analogue. Nioboixiolite-(Mn²⁺) is also isostructural with other members of the ixiolite group, scrutinyite α -PbO₂ (Zaslavskiy and Tolkachev, 1952; Taggart et al., 1988), srilankite, (Ti,Zr)O₂ (Willgallis et al., 1983; Willgallis and Hartl, 1983), and seifertite, SiO₂ (Dera et al., 2002; El Goresy et al., 2008; Zhang et al., 2016). Thus, nioboixiolite-(Mn²⁺) is a niobium analogue of all these minerals belonging to the α -PbO₂ structure type.

The new mineral nioboixiolite-(Mn²⁺) and its name were approved by the IMA CNMNC (IMA No. 2021-050a). The type specimen is deposited in the collections of the Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, with registration number 5721/1.

2. EXPERIMENTAL METHODS

Fourteen electron microprobe analyses were carried out using a Jeol JSM-6480LV scanning electron microscope equipped with an INCA-Wave 500 wavelength-dispersive spectrometer (Laboratory of Analytical Techniques of High Spatial Resolution, Dept. of Petrology, Moscow State University), with an acceleration voltage of 20 kV, a beam current of 20 nA, and a 3 μ m beam diameter.

In order to obtain infrared (IR) absorption spectrum, powdered nioboixiolite-(Mn²⁺) sample has been mixed with dried KBr, pelletized, and analyzed using an ALPHA FTIR spectrometer (Bruker Optics) in the range of 360–3800 cm⁻¹ with a resolution of 4 cm⁻¹. A total of 16 scans were collected. IR spectrum of an analogous pellet of pure KBr was used as a reference.

The reflectance values were measured in air by means of the MSF-21 microspectrophotometer (LOMO, Russia) with SiC (Reflexionsstandard 474251, No. 545, Germany) as a reference material.

Powder X-ray diffraction data were collected using a Rigaku R-AXIS Rapid II diffractometer (image plate), CoK α , 40 kV, 15 mA, rotating anode with the microfocus optics, Debye-Scherrer geometry, $r = 127.4$ mm, exposure 15 min. The raw powder XRD data were collected using program suite designed by Britvin et al. (2017). Calculated intensities were obtained by means of STOE WinXPOW v. 2.08 program suite based on the atomic coordinates and unit-cell parameters.

Single-crystal X-ray studies were carried out using an Xcalibur diffractometer equipped with a CCD-detector (MoK α radiation). Crystal data, data collection information and structure refinement details are given in Table 1.

3. RESULTS

3.1. Occurrence, general appearance and physical properties. The holotype specimen of nioboixiolite-(Mn²⁺) was collected from the Sosedka granitic pegmatite vein, Malkhan pegmatite field, Krasnochikoisky District, Zabaikalsky Krai, Siberia, Russia. The new mineral forms prismatic, typically lath-like crystals up to 0.8 \times 1.5 \times 5 mm, elongated along [001] and flattened on [100]. They are commonly crude, divergent and sometimes combined in radiating clusters up to 4 mm \times 1 cm embedded in albite (Fig. 1). The other associated minerals are quartz, microcline, elbaite, beryl, bismuthinite, euxenite-(Y), zircon, rutile, cassiterite, and secondary cannonite.

Nioboixiolite-(Mn²⁺) is dark brown to brown-black, the lustre is submetallic on crystal faces and adamantine on the broken surface. The streak is brown. Cleavage is not observed. The fracture is conchoidal. The mean VHN hardness determined by micro-indentation at load of 100 g is equal to 303 kg/mm² (range 282–330 kg/mm², $n = 5$). The Mohs' hardness is 4.5–5.

Table 1. Data of the single-crystal X-ray diffraction experiment and crystal structure refinement for nioboixiolite-(Mn²⁺)**Таблица 1.** Данные монокристалльного рентгенодифракционного эксперимента и уточнения кристаллической структуры ниобоксидиолита-(Mn²⁺)

Crystal system, space group, <i>Z</i>	Orthorhombic, <i>Pbcn</i> , 4
Unit-cell dimensions, Å	<i>a</i> = 4.7559(5) <i>b</i> = 5.7318(5) <i>c</i> = 5.1344(4)
<i>V</i> , Å ³	139.97(2)
Crystal size, mm	0.06 × 0.12 × 0.42
Temperature, K	293(2)
Radiation and wavelength, Å	MoKα; 0.71073
Diffractometer	Xcalibur S CCD
Absorption correction	Gaussian
θ range for data collection, °	5.572–28.280
Reflections collected	1684
Independent reflections	174 (<i>R</i> _{int} = 0.0608)
Independent reflections with <i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)	149
Refinement method	Full-matrix least-squares on <i>F</i> ²
Number of refined parameters	16
Final <i>R</i> indices [<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)]	<i>R</i> 1 = 0.0474, <i>wR</i> 2 = 0.0957
<i>R</i> indices (all data)	<i>R</i> 1 = 0.0592, <i>wR</i> 2 = 0.1008
GoF	1.377
Largest diff. peak and hole, e/Å ³	1.96 and −0.80

Density calculated using the empirical formula and unit-cell parameters obtained from single-crystal X-ray diffraction data is equal to 5.803 g cm^{−3}.

Under the microscope in reflected light, nioboixiolite-(Mn²⁺) is gray, with strong yellowish-brown internal reflections. Bireflectance is weak, Δ*R* = 0.7% (589 nm). Anisotropism is weak. Pleochroism is not observed. Reflectance values are given in Table 2 (the reference wavelengths required by the Commission on Ore Mineralogy are given in bold type).

The IR spectrum of nioboixiolite-(Mn²⁺) (Fig. 2) is close to that of ixiolite-(Mn²⁺) (Chukanov, 2014). IR absorption in the range of 400–700 cm^{−1} and below 400 cm^{−1} is due to stretching and bending vibrations of the MO₂ octahedral pseudo-framework (*M* = Nb, Mn²⁺, Ta, Ti, etc.). Taking into account that Mn²⁺ is the main low field-strength cation in nioboixiolite-(Mn²⁺), the band at 480 cm^{−1} may be tentatively assigned to stretching vibrations of the Nb–O–Mn²⁺ fragment. The shoulder at 870 cm^{−1} and the weak band at 1100 cm^{−1} correspond to combination modes. The absence of absorption bands above 1200 cm^{−1} indicates the absence of H-, B- and C-bearing groups. The IR absorption bands of nioboixiolite-(Mn²⁺) are broad and poor-resolved which indicates disordering of cations, in agreement with the structural data (see below).

3.2. Chemical composition. Analytical data for nioboixiolite-(Mn²⁺) based on 14 spot analyses of a polished section are given in Table 3. Contents of other elements with atomic numbers higher than that of carbon are below detection limits. H₂O was not measured because no bands corresponding to H-bearing groups are observed in the IR spectrum.



Fig. 1. Aggregates of nioboixiolite-(Mn²⁺) in albite.

Рис. 1. Агрегаты ниобоксиолита-(Mn²⁺) в альбите.

The empirical formula of nioboixiolite-(Mn²⁺) calculated on the basis of 8 oxygen atoms per formula unit (*apfu*) is (Nb_{1.59}Mn_{1.04}²⁺Ta_{0.59}Ti_{0.47}Sc_{0.13}Zr_{0.07}Y_{0.06}Sn_{0.03}U_{0.03}Fe_{1.01}³⁺)_{Σ4.02}O₈ (*Z* = 1). The total number of cations in this charge-balanced formula calculated on the anionic basis is very close to 4.00 *apfu* which confirms bivalent state of Mn. The number of electrons per cation site calculated from this formula is equal to 39.2 which is close to the value of 40.5 obtained as a result of the crystal structure refinement. The relative difference between these val-

Table 2. Reflectance values of nioboixiolite-(Mn²⁺)

Таблица 2. Коэффициенты отражения ниобоксиолита-(Mn²⁺)

λ , nm	R_1	R_2	λ , nm	R_1	R_2
400	17.2	18.0	560	15.1	15.8
420	17.0	17.8	580	15.0	15.7
440	16.6	17.5	589	15.0	15.66
460	16.3	17.1	600	15.0	15.6
470	16.1	16.9	620	14.9	15.6
480	15.9	16.7	640	14.9	15.5
500	15.7	16.4	650	14.9	15.5
520	15.5	16.1	660	14.9	15.5
540	15.3	16.0	680	14.9	15.5
546	15.3	15.9	700	14.9	15.5

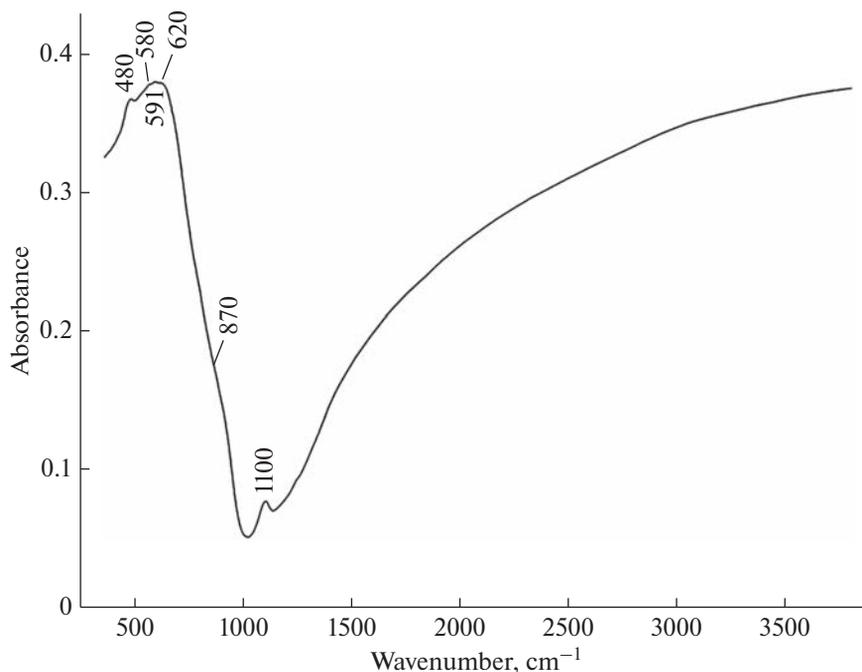


Fig. 2. Powder infrared absorption spectrum of nioboixiolite-(Mn²⁺).

Рис. 2. Инфракрасный спектр поглощения порошка ниобоксиолита-(Mn²⁺).

ues is in the frame of the standard deviations in Table 3. The simplified formula is (Nb,Mn²⁺,Ta,Ti)O₂ and the formal, idealized end-member formula is (Nb_{2/3}Mn_{1/3}²⁺)O₂.

3.3. X-ray diffraction data and crystal structure. Powder X-ray diffraction data of nioboixiolite-(Mn²⁺) are given in Table 4. The orthorhombic unit-cell parameters refined from the powder data are: $a = 4.762(2)$ Å, $b = 5.739(1)$ Å, $c = 5.149(1)$ Å, $V = 140.7(1)$ Å³.

Table 3. Chemical composition of nioboixiolite-(Mn²⁺)

Таблица 3. Химический состав ниобоксиолита-(Mn²⁺)

Constituent	Average content, wt %	Range of contents, wt %	Standard deviation	Probe Standard
MnO	14.94	13.28–16.30	0.91	Mn
Sc ₂ O ₃	1.80	1.31–2.06	0.26	Sc
Fe ₂ O ₃	0.20	0.09–0.26	0.05	Pyroxene Hyp-746
Y ₂ O ₃	1.34	0.93–2.59	0.59	Y
TiO ₂	7.66	5.43–10.16	1.56	Ti
ZrO ₂	1.74	0.51–2.66	0.73	Zr
SnO ₂	1.01	0.43–1.99	0.40	Sn
ThO ₂	0.26	0.00–0.98	0.37	ThO ₂
UO ₂	1.44	0.62–3.75	1.05	UO ₂
Nb ₂ O ₅	42.80	38.54–46.33	2.38	Nb
Ta ₂ O ₅	26.77	24.71–28.48	1.15	Ta
Total	99.96			

Table 4. Powder X-ray diffraction data of nioboixiolite-(Mn²⁺)
Таблица 4. Порошковая рентгенограмма ниобоксидолита-(Mn²⁺)

I_{obs} , %	d_{obs} , Å	I_{calc} *, %	d_{calc} ** , Å	hkl
29	3.662	31	3.660	110
100	2.984	100	2.980	111
14	2.868	7	2.866	020
14	2.573	15	2.567	002
21	2.505	17	2.502	021
8	2.380	8	2.378	200
5	2.262	2	2.259	102
9	2.217	4	2.215	121
11	2.105	9	2.102	112
7	1.916	5	1.912	022
7	1.832	5	1.830	220
21	1.775	13	1.773	130
28	1.748	15	1.745	202
35	1.726	21	1.724	221
20	1.553	13	1.550	113
7	1.492	4	1.490	222
19	1.473	8	1.469	023
30	1.463	10, 12	1.464, 1.459	311, 132
4	1.435	1	1.433	040
7	1.382	5	1.380	041
3	1.316	2	1.313	312
2	1.288	2	1.284	004
5	1.252	3	1.250	223

* For the calculated pattern, only reflections with intensities ≥ 1 are given.

** For the unit-cell parameters calculated from single-crystal data; the strongest reflections are marked in boldtype.

The crystal structure of nioboixiolite-(Mn²⁺) was refined using the SHELX software package (Sheldrick, 2015) to $R = 0.0474$ using 151 unique reflections with $I > 2\sigma(I)$ in the frame of space group $Pbcn$. The crystal data and the experimental details are presented in Table 1, atom coordinates, displacement parameters and site occupancies in Table 5. Selected interatomic distances are given in Table 6.

Nioboixiolite-(Mn²⁺) is a representative of the α -PbO₂ structure type. The structure (Fig. 3) is based on the zig-zag chains of edge-sharing octahedra MO_6 (the major M cations are Nb, Mn, Ta, and Ti), running along the c axis. Adjacent chains are linked in a direction *via* common oxygen vertices. All cations are disordered and fill a single M site.

4. DISCUSSION

The Nb-dominant structural analogue of ixiolite was described in several publications (von Knorring and Sahama, 1969; Wise *et al.*, 1998; Badanina *et al.*, 2008; Alekseev *et al.*, 2010; Zubkova *et al.*, 2020), usually as ixiolite (or its varieties, scandian ixiolite, wolframo-ixiolite, *etc.*), despite the prevailing of Nb over Ta. So-called “ashanite” initially described as a Nb-dominant analogue of ixiolite (Zhan Rubo *et al.*, 1980) has been discredited by the IMA CNMMN be-

Table 5. Coordinates and equivalent displacement parameters (U_{eq} , in \AA^2) of atoms in the structure of nioboixiolite-(Mn^{2+})

Таблица 5. Координаты позиций и параметры атомных смещений (U_{eq} , \AA^2) в структуре ниобоксиолита-(Mn^{2+})

Site	x	y	z	U_{eq}
M	0.0	0.32861(19)	0.25	0.0191(5)
O	0.7270(14)	0.1132(11)	0.4170(14)	0.021(2)

The refined number of electrons at the M site is $e_{ref} = 40.52$.

Table 6. Cation-oxygen distances (\AA) in the structure of nioboixiolite-(Mn^{2+})

Таблица 6. Расстояния катион-кислород в структуре ниобоксиолита-(Mn^{2+})

$M-O$ 1.984(7) $\times 2$

$-O$ 2.052(8) $\times 2$

$-O$ 2.137(7) $\times 2$

Mean 2.058

cause of unfair chemical data, corresponding to a mixture of several minerals, presumably ixiolite, samarskite-(Y), and uranmicrolite (Ganfu Shen, 1998; Jambor *et al.*, 1999).

An overwhelming majority of finds of ixiolite and its Nb-dominant analogue, forming a continuous isomorphous series, is related to Li-F granites and, especially, rare-element granitic pegmatites. All samples of ixiolite series minerals from these formations contain sig-

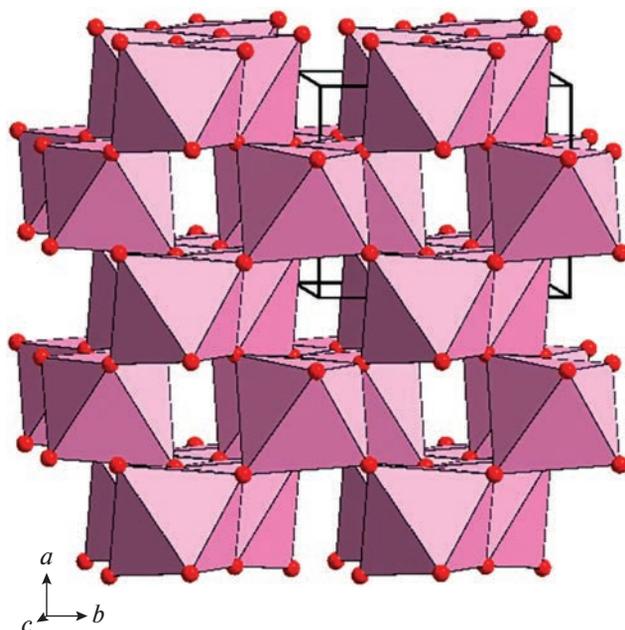


Fig. 3. The crystal structure of nioboixiolite-(Mn^{2+}). The unit cell is outlined.

Рис. 3. Кристаллическая структура ниобоксиолита-(Mn^{2+}). Показана элементарная ячейка.

Table 7. Comparative data of nioboixiolite-(Mn²⁺) and closely related minerals
Таблица 7. Сравнительные данные для ниобоиксиолита-(Mn²⁺) и родственных ему минералов

<i>Mineral</i>	Nioboixiolite-(Mn ²⁺)	Ixiolite-(Mn ²⁺)	Columbite-(Mn)
<i>Idealized formula</i>	(Nb _{2/3} Mn _{1/3} ²⁺)O ₂	(Ta _{2/3} Mn _{1/3} ²⁺)O ₂	Mn ²⁺ Nb ₂ O ₆
Crystal system Space group	Orthorhombic <i>Pbcn</i>	Orthorhombic <i>Pbcn</i>	Orthorhombic <i>Pbcn</i>
<i>a</i> , Å	4.7559	4.74–4.76	14.433
<i>b</i> , Å	5.7318	5.70–5.74	5.7637
<i>c</i> , Å	5.1344	5.10–5.16	5.0832
<i>V</i> , Å ³	139.97	138.4–140.6	422.86
<i>Z</i>	4	4	4
Strongest reflections of the powder X-ray diffraction pattern: <i>d</i> , Å (<i>I</i> , %)	3.662 (29) 2.984 (100) 2.505 (21) 1.775 (21) 1.748 (28) 1.726 (35) 1.463 (30)	3.65 (32) 2.98 (100) 2.57 (13) 2.51 (20) 1.746 (17) 1.722 (24) 1.459 (29)	3.678 (90) 2.985 (100) 2.880 (50) 2.505 (50) 1.905 (60) 1.840 (60) 1.776 (60)
Density, g cm ⁻³	5.803 (calc.)	6.94–7.23 (meas.) 7.392 (calc.)	5.20–6.65 (meas.) 5.30 (calc.)
References	This work	Nickel et al., 1963; Černý and Němec, 1995; Chukhrov and Bonshtedt-Kupletskaya, 1967	Wise and Černý, 1984; Wise et al., 1985; Mineralogy..., 2000

nificant amounts of Ta. Some of them contain U and/or Th admixtures and are partly or completely metamict.

The crystal structure of a natural niobium analogue of ixiolite was first published only recently, for an unusual Ta- and Sn-free and Ti- and Fe-rich sample from the Eifel paleovolcanic region, Germany (Zubkova et al., 2020), but a detailed investigation of this sample was not carried out because of scarcity of available material.

Synthetic Nb-dominant oxides isostructural with ixiolite are described in a number of works. In particular, the crystal structures of the compounds Fe³⁺NbO₄-II (Harrison and Cheetham, 1989), (Nb_{*x*}Fe_{*x*}³⁺Zn_{1-*x*})(O_{4*x*}F_{2-2*x*}) (with *x* from 0.75 to 1.00: Pourroy et al., 1990), and Nb₂TiZnO₈ (Baumgarte and Blachnik, 1992) have been investigated. All of them belong to the α-PbO₂ structure type.

Comparative data for nioboixiolite-(Mn²⁺) and closely related minerals are given in Table 7. Nioboixiolite-(Mn²⁺) is chemically related to columbite-(Mn), Mn²⁺Nb₂O₆, and can be considered as a cation-disordered analogue of this mineral.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out in accordance with the state task of Russian Federation, state registration number AAAA-A19-119092390076-7. The study of the crystal structure of the mineral was fulfilled using an XCalibur S CCD diffractometer (Moscow State University). The authors thank resource centers of SPbSU (Centre for X-ray Diffraction Studies, Microscopy and Microanalysis and Geomodel) for providing instrumental and computational resources.

REFERENCES

- Alekseev V.I., Gembitskaya I.M., Marin Yu.B. Wolframo-ixiolite and niobium ferberite from zinnwaldite granites of Chukotka. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2010**. Vol. 139(3). P. 72–85 (in Russian).
- Badanina E.V., Gordienko V.V., Wiechowski A., Friedrich G. Sc- and REE-bearing ixiolite and associated minerals from the Sosodka pegmatite vein in the Malkhan pegmatite field, central Transbaikalia region. *Geol. Ore Deposits*. **2008**. Vol. 50. P. 772–781.
- Baumgarte A., Blachnik R. Phase relations in the system titaniumdioxide-diniobium-zinc-hexoxide. *Mater. Res. Bull.* **1992**. Vol. 27. P. 1287–1294.
- Britvin S.N., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Krzhizhanovskaya M.G. Software for processing the X-ray powder diffraction data obtained from the curved image plate detector of Rigaku RAXIS Rapid II diffractometer. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2017**. Vol. 146(3). P. 104–107 (in Russian).
- Černý P., Němec D. Pristine vs. contaminated trends in Nb,Ta-oxide minerals of the Jihlava pegmatite district, Czech Republic. *Mineral. Petrol.* **1995**. Vol. 55. P. 117–129.
- Chukanov N.V. Infrared spectra of mineral species: Extended library. Dordrecht–Heidelberg–New York–London: Springer-Verlag GmbH, **2014**. 1716 p.
- Chukanov N.V., Pasero M., Aksenov S.M., Britvin S.N., Zubkova N.V., Yike L., Witzke T. Columbite supergroup of minerals: nomenclature and classification. *Miner. Mag.* **2022**. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.105>
- Chukhrov F.V., Bonshedt-Kupletskaya E.M. (eds.) Minerals. Vol. II. Part 3. Moscow: Nauka, **1967**. 676 p. (in Russian).
- Dera P., Prewitt C.T., Boctor N.Z., Hemley R.J. Characterization of a high-pressure phase of silica from the Martian meteorite Shergotty. *Amer. Miner.* **1967**. Vol. 87. P. 1018–1023.
- El Goresy A., Dera P., Sharp T.G., Hemley R.J. Seifertite, a dense orthorhombic polymorph of silica from the Martian meteorites Shergotty and Zagami. *Eur. J. Miner.* **2008**. Vol. 20. P. 523–528.
- Ganfu Shen. Discreditation of ashanite. *Acta Mineral. Sinica*. **1998**. Vol. 18(2). P. 230–233 (in Chinese).
- Harrison W.T.A., Cheetham A.K. Structural and magnetic properties of FeNbO₄-II. *Mater. Res. Bull.* **1989**. Vol. 24. P. 523–527.
- Jambor J.L., Puziewicz J., Roberts A.C. New mineral names. *Amer. Miner.* **1999**. Vol. 84, P. 685–688.
- von Knorring O.V., Sahama Th.G. Scandian ixiolite from Mozambique and Madagascar. *Bull. Geol. Soc. Finland*. **1969**. Vol. 41. P. 75–77.
- Mineralogy of the Urals. Oxides and Hydroxides. Part 1. Miass–Ekaterinburg: Uralian Branch RAS, 2000 (in Russian).*
- Nickel E.H., Rowland, J.F. McAdam R.C. Ixiolite – a columbite substructure. *Amer. Miner.* **1963**. Vol. 48. P. 961–979.
- Pourroy G., Lutanie E., Poix P. Transition orthorhombic ↔ rutile in $xMFeO_4-(1-x)ZnF_2$ phases ($M = Ta, Nb$ and $x > 0.7$). *J. Solid State Chem.* **1990**. Vol. 86. P. 41–49.
- Rigaku Oxford Diffraction. CrysAlisPro Software System, v. 1.171.39.46, Rigaku Corporation, Oxford, UK. **2018**.
- Sheldrick G.M. Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Cryst.* **2015**. Vol. C71. P. 3–8.
- Taggart J.E., Jr., Foord E.E., Rosenzweig A., Hanson T. Scrutinyite, natural occurrences of α -PbO₂ from Bingham, New Mexico, USA, and Mapimi, Mexico. *Canad. Miner.* **1988**. Vol. 26. P. 905–910.
- Willgallis A., Hartl H. (Zr_{0.33}Ti_{0.67})O₂ – ein natürliches Zirkonium-Titanoxid mit α -PbO₂-Struktur. *Z. Krist.* **1983**. Vol. 164. P. 59–66 (in German).
- Willgallis A., Siegmann E., Hettiaratchi T. Srilankite, a new Zr–Ti-oxide mineral. *N. Jahrbuch Mineral. Monatsh.* **1983**. P. 151–157.
- Wise M.A., Černý P. First U.S. Occurrence of wodginite from Powhatan County, Virginia. *Amer. Miner.* **1984**. Vol. 69. P. 807–809.
- Wise M.A., Turnock A.C., Černý P. Improved unit cell dimensions for ordered columbite-tantalite end members. *N. Jahrbuch Mineral. Monatsh.* **1985**. P. 372–378.
- Wise M.A., Černý P., Falster A.U. Scandium substitution in columbite-group minerals and ixiolite. *Canad. Miner.* **1985**. Vol. 36. P. 673–680.
- Zaslavskiy A.I., Tolkachev S.S. The structure of α -modification of lead dioxide. *J. Phys. Chem.* **1952**. Vol. 26. P. 743–752 (in Russian).
- Zhan Rubo, Tian Huixin, Peng Zhizhong, Ma Zhesheng, Han Fengming, Jing Zebei. A new mineral – ashanite, (Nb,Ta,U,Fe,Mn)₄O₈. *Chinese Sci. Bull. (Kexue Tongbao)*. **1980**. Vol. 25(6). P. 510–514.
- Zhang L., Popov D., Meng Y., Wang J., Ji C., Li B., Mao H.-K. In-situ crystal structure determination of seifertite SiO₂ at 129 GPa: Studying a minor phase near Earth’s core–mantle boundary. *Amer. Miner.* **2016**. Vol. 101. P. 231–234.
- Zubkova N.V., Chukanov N.V., Pekov I.V., Ternes B., Schüller W., Pushcharovsky D.Yu. Ta-free Nb-dominant ixiolite analogue from the Eifel paleovolcanic region, Germany, and its crystal structure. On the problem of “ashanite”. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149(4). P. 125–134.

НИОБОИКСИОЛИТ-(Mn²⁺) (Nb_{2/3}Mn_{1/3}²⁺)O₂ – НОВЫЙ МИНЕРАЛ ГРУППЫ ИКСИОЛИТА ИЗ МАЛХАНСКОГО ПЕГМАТИТОВОГО ПОЛЯ, ЗАБАЙКАЛЬЕ

Д. чл. Н. В. Чуканов^{a, b, *}, д. чл. И. В. Пеков^b, Н. В. Зубкова^b, В. О. Япаскурт^b,
Ю. С. Шелухина^c, д. чл. С. Н. Бритвин^c, д. чл. Д. Ю. Пушаровский^b

^aФедеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Геологический факультет, Москва, Россия

^cСанкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nikchukanov@yandex.ru

Новый минерал группы иксиолита, ниобоксиолит-(Mn²⁺) с идеализированной формулой (Nb_{2/3}Mn_{1/3}²⁺)O₂, ниобиевый аналог иксиолита-(Mn²⁺), найден в гранитном пегматите жилы Соседка (Малханское пегматитовое поле, Забайкальский край) в ассоциации с альбитом, кварцем, микроклином, эльбаитом, бериллом, висмутином, эвксенитом-(Y), цирконом, рутилом, касситеритом и каннонитом. Новый минерал образует вросшие в альбит радиальные сростки призматических кристаллов с размерами до 0.8 × 1.5 × 5 мм. Цвет ниобоксиолита-(Mn²⁺) темно-коричневый до черного, блеск металлический до алмазного, черта коричневая. Спайность не наблюдается. Твердость по шкале Мооса 4.5–5. Вычисленная плотность 5.803 г/см³. Даны ИК-спектр и спектр отражения в видимой области. Химический состав ниобоксиолита-(Mn²⁺) (по данным электронно-зондовых анализов, мас. %): MnO 14.94, Sc₂O₃ 1.80, Fe₂O₃ 0.20, Y₂O₃ 1.34, TiO₂ 7.66, ZrO₂ 1.74, SnO₂ 1.01, ThO₂ 0.26, UO₂ 1.44, Nb₂O₅ 42.80, Ta₂O₅ 26.77, сумма 99.96. Эмпирическая формула:

(Nb_{1.59}Mn_{1.04}²⁺Ta_{0.59}Ti_{0.47}Sc_{0.13}Zr_{0.07}Y_{0.06}Sn_{0.03}U_{0.03}Fe_{0.01}³⁺)_{Σ4.02}O₈ (Z = 1). Кристаллическая структура решена на монокристалле и уточнена до R = 0.0474. Ниобоксиолит-(Mn²⁺) изоструктурен с другими членами группы иксиолита. Новый минерал ромбический, пространственная группа *Pbcn*, параметры элементарной ячейки равны a = 4.762(2) Å, b = 5.739(1) Å, c = 5.149(1) Å, V = 140.7(1) Å³. Наиболее сильные линии порошковой рентгенограммы [d, Å (I, %) (hkl)]: 3.662 (29) (110), 2.984 (100) (111), 2.505 (21) (021), 1.775 (21) (130), 1.748 (28) (202), 1.726 (35) (221), 1.553 (20) (113), 1.473 (19) (023), 1.463 (30) (311, 132).

Ключевые слова: ниобоксиолит-(Mn²⁺), новый минерал, группа иксиолита, надгруппа колумбита, кристаллическая структура, Малханское пегматитовое поле

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

ХАСАНОВИТ $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ – НОВЫЙ МИНЕРАЛ ИЗ ВОЗГОНОВ ПРИРОДНОГО ПОДЗЕМНОГО ПОЖАРА НА ФАН-ЯГНОБСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ, ТАДЖИКИСТАН

© 2023 г. М. А. Мираков^{1, *}, д. чл. Л. А. Паутов¹, д. чл. О. И. Сийдра^{2, 3}, С. Махмадшариф⁴, В. Ю. Карпенко¹, д. чл. П. Ю. Плечов¹

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН,
Ленинский проспект, 18, стр. 2, Москва, 119071 Россия

²Кафедра кристаллографии, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 119034 Россия

³Кольский научный центр РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209 Россия

⁴Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ,
ул. Айни, 267, Душанбе, 734063 Таджикистан

*e-mail: mirakov.bobish@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Новый минерал хасановит $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ обнаружен в возгонах природного подземного угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении каменного угля в верховьях сая Кухи-Малик в Айнинском районе Центрального Таджикистана. Минерал назван хасановитом в честь известного петрографа Абдурахима Хасановича Хасанова (р. 1933). Хасановит встречается в виде мелких (50–200 мкм) зерен на обожженном алевролите в ассоциации с ангидритом, баритом, англезитом, молибдитом, самородным теллуром и недоизученными сульфатами Sb-K, K-Mg, Ti-V и Sn. Минерал прозрачный бесцветный со стекляннным блеском, черта белая. Хрупкий, без спайности. Микротвердость 103 (разброс от 84 до 113) кг/мм². Твердость по Мосу 3. $D_{\text{изм}} = 2.93(2)$ и $D_{\text{расч}} = 2.94$ г/см³. Хасановит в проходящем свете бесцветный, плеохроизм не наблюдается; оптически двуосный, положительный. Угол $2V = 50(3)^\circ$. Показатели преломления хасановита: $n_p = 1.584(2)$, n_m (расч.) = 1.590(3), $n_g = 1.620(2)$ (590 нм). Сильные линии в КР-спектре: 1034, 958, 916, 648, 469, 390, 273 и 232 см⁻¹. Хасановит нерастворим в воде и этаноле, но растворим в HCl. Химический состав, изученный электронно-зондовым методом (мас. %): Na₂O 4.54, K₂O 13.81, Ti₂O 1.80, MoO₃ 38.75, SO₃ 40.10, сумма 99.00. Эмпирическая формула в расчете на 10 атомов кислорода: K_{1.16}Na_{0.58}Ti_{0.03}Mo_{1.06}S_{1.98}O₁₀. Сильные линии рентгеновской порошковой дифракции [d, Å (I, %) (hkl)]: 7.30(36)(110); 6.57(48)(011); 4.34(75)(121); 3.64(100)(211); 3.44(58)(031); 3.34(74)(202, 022); 3.20(63)(212); 2.879(73)(231); 2.729(50)(140); 2.436(44)(123). Хасановит моноклинный, пр. группа $P2_1/c$, параметры элементарной ячейки: a = 9.6225(2); b = 11.4049(3); c = 8.1421(2) Å, β = 99.1790(10)°, V = 882.10(4) Å³, Z = 4. Кристаллическая структура (уточнена до R₁ = 2.7%) близка к структуре синтетического K₂(MoO₂)(SO₄)₂. Эталонный образец хасановита (голотип) хранится в фондах Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва), регистрационный номер 5568/1.

Ключевые слова: хасановит, сульфаты, молибдаты, возгоны, подземный угольный пожар, Кухи-Малик, Рават, Фан-Ягнобское угольное месторождение, Таджикистан

DOI: 10.31857/S0869605523010082, **EDN:** NHZXAW

ВВЕДЕНИЕ

Новый минерал – молибдат-сульфат калия и натрия с идеализированной формулой $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ был обнаружен в возгонах природного подземного угольного пожара урочища Кухи-Малик на Фан-Ягнобском каменноугольном месторождении в Айнинском районе Центрального Таджикистана. Новый минерал назван хасановитом в честь известного петрографа, профессора кафедры минералогии и петрографии геологического факультета Таджикского национального университета (Душанбе) Абдурахима Хасановича Хасанова (р. 1 января 1933 г.). Новый минерал и его название утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (КНМНК ММА) под номером IMA 2020-033. Эталонный образец хасановита (голотип) хранится в фондах Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва), регистрационный номер 5568/1.

МЕСТО НАХОДКИ

Природный подземный угольный пожар в верховьях урочища Кухи-Малик напротив бывшего кишлака Рават (рис. 1), где обнаружен хасановит, находится на территории Фан-Ягнобского месторождения коксующегося каменного угля в Айнинском районе Таджикистана, в 70 км к северу от г. Душанбе ($39^\circ 12' 25'' \text{ N}$, $68^\circ 33' 59'' \text{ E}$). Месторождение каменного угля приурочено к Фан-Ягнобской синклинали, в сложении которой принимают участие осадочные породы триасового возраста, угленосные толщи юрского возраста и перекрывающие их осадочные отложения мелового, палеогенового и неогенового возрастов (Ермаков, 1935; Охунов и др., 2017). По литературным данным (Новиков и др., 1989; Охунов и др., 2017), угли Фан-Ягнобского месторождения характеризуются высокой металллоносностью и могут рассматриваться как комплексное сырье на Sn, Ag, V, W, Cu. Коэффициенты концентрации последних в углях этого месторождения составляют более 5 по отношению к РФГ (региональному геохимическому фону относительно средних содержаний микроэлементов в углях Центральной Азии). Коэффициенты концентрации Mo, Pb, Zn, Sr и Be составляют более 3 по отношению к РФГ (Охунов и др., 2017). Среднее содержание молибдена в угольных пластах № 12, 13 и 14 (почти полностью выгоревших на Кухи-Маликском участке) на соседних Восточной и Западной площадях месторождения составляет 4.9 г/т при вариациях от 2.2 до 10.8 г/т (Фозилов, Алидов, 2017).

В контурах Фан-Ягнобского месторождения известны несколько угольных подземных пожаров, расположенных на разных высотных отметках в обоих бортах долины реки Ягноб. Левобережные пожары в основном низкотемпературные, и в их возгонах преобладают квасцы, нашатырь, самородная сера и органические минералы. Подземные угольные пожары на правом борту реки Ягноб, в частности, в урочище Кухи-Малик, более высокотемпературные, и в их возгонах наблюдается примечательное минеральное разнообразие. На раватских пожарах с античных времен вплоть до середины 40-х годов прошлого столетия добывали нашатырь, серу, селитру, квасцы и купоросы, которые использовали для обработки кож, опыления виноградников, изготовления пороха и в медицине (Ермаков, 1935; Вадило, 1958; Новиков, 1989). В продуктах подземных угольных пожаров на Фан-Ягнобском месторождении на сегодня установлено более 40 минеральных видов (Ермаков, 1935; Вадило, 1958; Новиков и др., 1979; Белаковский, Москалев, 1988; Белаковский и др., 1988а; Belakovski, 1990; Новиков, 1993; Шарыгин и др., 2009; Мираков и др., 2017, 2019, 2020; Паутов и др., 2019; Карпенко и др., 2021). В возгонах этих пожаров открыты шесть новых минеральных видов: раватит $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ (Nasdala, Pekov, 1993), фальгарит $\text{K}_4(\text{VO})_3(\text{SO}_4)_5$ (Pautov et al., 2020), ермаковит $(\text{NH}_4)(\text{As}_2\text{O}_3)_2\text{Br}$ (Karpenko et al., 2022), искандаровит $\text{Sb}_6\text{O}_7(\text{SO}_4)_2$ (Mirakov et al., 2022а), новиковит $(\text{NH}_4)_4(\text{Mo}_2^{6+}\text{Mo}_2^{5+})_4\text{O}_8(\text{SO}_4)_5$ (Pautov et al., 2022) и описываемый в

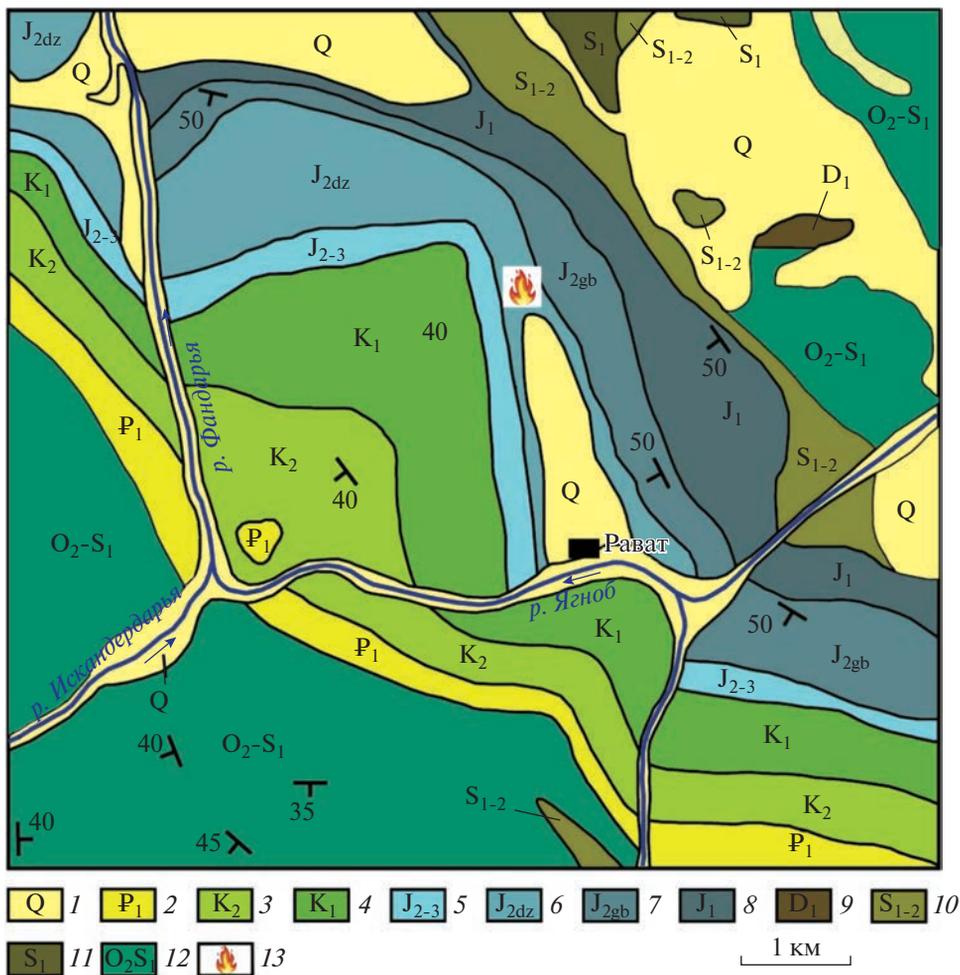


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кухи-Маликского участка Фан-Ягнобского каменноугольного месторождения. 1 – современные отложения: галечники, пески, щебень, валуны, глыбы; 2 – известняки, доломиты, мергели; 3 – песчаники, конгломераты, глины, известняки; 4 – конгломераты, песчаники, глины; 5 – конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты; 6 – угленосные отложения джижикрутской свиты. Песчаники с линзами конгломератов, алевролиты, углистые аргиллиты, пласты каменного угля; 7 – угленосные отложения габирудской свиты. Песчаники, алевролиты, аргиллиты; пласты каменного угля; 8 – аргиллиты, алевролиты, прослой известняков и углистых аргиллитов; 9 – известняки; 10 – известняки, доломиты, кремнистые и глинистые сланцы; 11 – сланцы, песчаники, известняки, кварциты; 12 – сланцы, известняки; 13 – местоположение подземного угольного пожара в верховьях сая Кухи-Малик. По материалам Р.В. Охунова и др. (2017).

Fig. 1. Geological scheme of the Kuhi-Malik area, Fan-Yagnob coal deposit.

настоящей статье хасановит $(K,Na)_2(MoO_2)(SO_4)_2$, краткие сведения о котором впервые были приведены в бюллетене КНМНК ММА (Mirakov et al., 2020a).

Хасановит был обнаружен при исследовании возгонов псевдофумарол из крупной полости, отмечавшейся в литературе под названием “Грот”, в скальном выходе в верховьях сая Кухи-Малик (рис. 2). Температура выходов газов из трещин пород в “Гро-

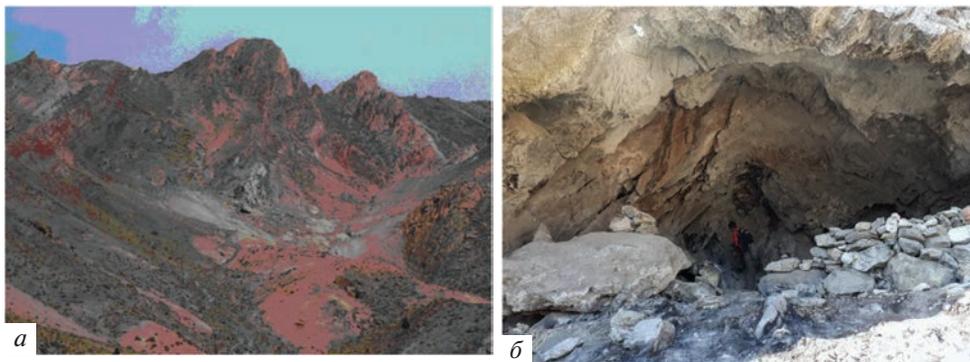


Рис. 2. Подземный природный угольный пожар в верховьях сая Кухи-Малик: *а* – вид на верховья сая. В центре снимка виден скальный выход с многочисленными выходами газов (псевдофумаролами); *б* – полость в скальном выходе, известная под названием “Грот”, в которой обнаружен хасановит.

Fig. 2. Underground coal fire at the upper reaches of the Kuhi-Malik.

те” достигает $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. При отборе образцов возгонов использовались противогазы, перчатки и длинные металлические щипцы. После остывания образцы упаковались в прочные пластиковые контейнеры с герметичными крышками.

ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хасановит встречается в виде мелких ($50\text{--}200\text{ мкм}$) зерен (рис. 3) на обожженном алевролите в ассоциации с ангидритом, баритом, англезитом, молибдитом, самородным теллуrom и недоизученными сульфатами Sb-K, K-Mg, Tl-V и Sn. Минерал прозрачный бесцветный со стекляннным блеском, черта белая. Хасановит хрупкий, без спайности. Микротвердость хасановита, измеренная на приборе ПМТ-3, тарированном по NaCl, при нагрузке 10 г по 5 замерам составляет 103 кг/мм^2 с разбросом значений от 84 до 113 кг/мм^2 , что соответствует твердости по шкале Мооса 3. Плотность, измеренная иммерсионным методом уравнивания зерен в тяжелых жидкостях (в смеси бромформа с йодистым метиленом), составила $2.93(2)\text{ г/см}^3$. Расчетная плотность для минерала состава, отвечающего эмпирической формуле, 2.94 г/см^3 . В длинно- и коротковолновом ультрафиолетовом свете минерал не люминесцирует.

Хасановит в проходящем свете бесцветный, плеохроизм не наблюдается, оптически двусный, положительный. Измеренный на столике Федорова угол $2V = 50(3)^{\circ}$. Показатели преломления хасановита, определенные методом фокального экранирования на приборе ППМ-1 конструкции В.Г. Фекличева, следующие: $n_p = 1.584(2)$, n_m (расч.) = $1.590(3)$, $n_g = 1.620(2)$ (590 нм). Минерал нерастворим в воде и этаноле, но растворим при комнатной температуре в HCl (1 : 1).

Порошковая рентгенография. Рентгенограмма с поликристаллического образца хасановита получена в камере РКУ-86 на $\text{FeK}\alpha$ -излучении с Mn-фильтром и Ge в качестве внутреннего стандарта (табл. 2). Интенсивность отражений оценивалась путем фотометрирования оптической плотности отсканированной пленки с помощью программы Pspectr (Зеленский и др., 2009). Параметры элементарной ячейки, рассчитанные по порошковым данным: $a = 9.638(9)$, $b = 11.392(5)$, $c = 8.140(6)\text{ \AA}$, $\beta = 99.14(5)^{\circ}$, $V = 882(1)\text{ \AA}^3$.

Химический состав хасановита изучался в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва) с помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe JСХА-733 фирмы JEOL, оснащенного пятью волноводисперсионными

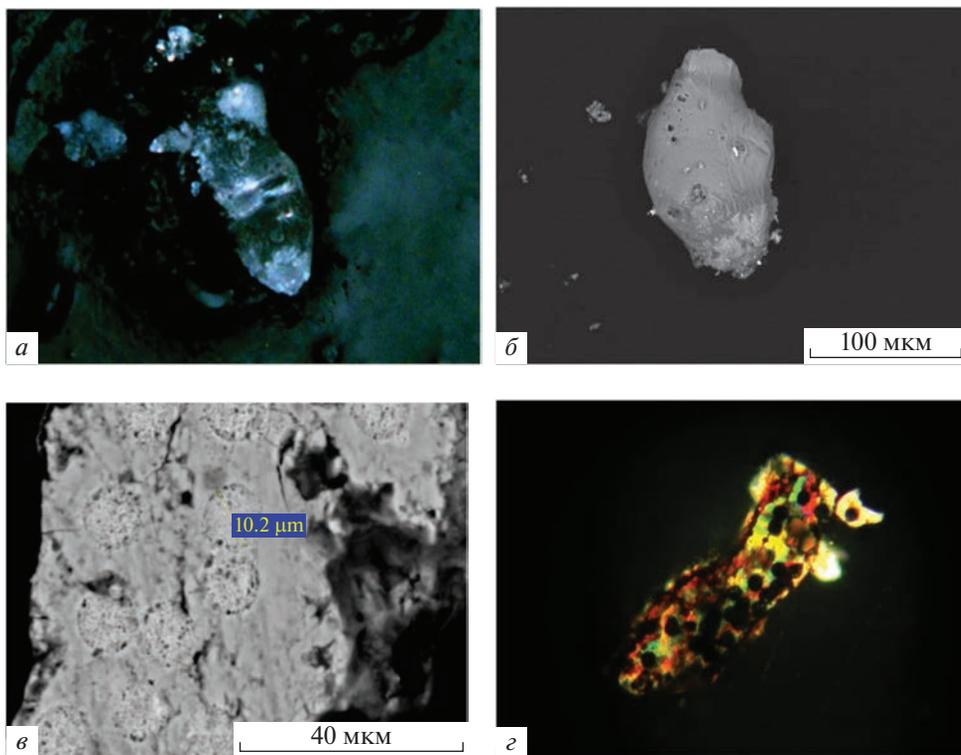


Рис. 3. *a* – вид прозрачного бесцветного зерна хасановита под бинокулярным микроскопом. Ширина поля зрения 0.5 мм; *б* – изображение зерна хасановита в режиме BSE с микровключениями в нем англезита (белые); *в, г* – круглые следы воздействия электронного зонда в местах анализа минерала, *в* – изображение в режиме отраженных электронов (BSE). В контурах круглых пятен видны многочисленные поры (черные точки), отсутствовавшие до проведения анализа; *г* – вид зерна минерала в проходящем свете при скрещенных николях. Темные круглые пятна – следы воздействия расфокусированного до 10 мкм электронного пучка – места анализов на волноводисперсионных спектрометрах.

Fig. 3. Grains of hasanovite.

ми спектрометрами и Si(Li)-энергодисперсионным спектрометром с ультратонким окном AWT-2 и системой анализа INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments. Анализы на волноводисперсионных спектрометрах (ВДС) проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 10 нА и диаметре пучка 10 мкм. В качестве стандартов использовались синтетический жадеит (Na $K\alpha$), микроклин № 107 (K $K\alpha$), TlBr (Tl $M\alpha$), CaMoO_4 (Mo $L\alpha$) и BaSO_4 (S $K\alpha$). Минерал неустойчив под электронным пучком, и на его поверхности остаются круглые следы воздействия электронного зонда в местах анализа (рис. 3, *в, г*). При анализе на волноводисперсионных спектрометрах наблюдалось занижение содержаний натрия и калия по сравнению с результатами анализов на энергодисперсионном спектрометре (ЭДС) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1 нА и диаметре пучка 10 мкм. По этой причине содержания щелочных металлов в хасановите приводятся по результатам ЭДС-анализа, а остальных компонентов – по результатам ВДС-анализа (табл. 1). Эмпирическая формула хасановита, отвечающая усредненному составу, при расчете на 10 атомов кислорода: $\text{K}_{1.16}\text{Na}_{0.58}\text{Ti}_{0.03}\text{Mo}_{1.06}\text{S}_{1.98}\text{O}_{10}$. Идеализированная формула, с учетом структурных данных, такова: $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) хасановита
Table 1. Chemical composition (wt %) of hasanovite

Компонент	мас. %	Диапазон содержаний	Стандартное отклонение	Стандарты
Na_2O^*	4.54	4.08–5.34	0.50	Жадеит синт.
K_2O^*	13.81	12.47–14.65	0.60	Микроклин 107
Ti_2O	1.80	1.30–1.96	0.35	TiBr
MoO_3	38.75	37.82–39.51	0.42	CaMoO_4
SO_3	40.10	39.00–41.51	0.32	BaSO_4
Сумма	99.00			

Примечание: * – среднее по ЭДС-анализам (минерал неустойчив под электронным пучком) (рис. 3, в, г).

КР (рамановская) спектроскопия. Спектры комбинационного рассеяния света для хасановита (рис. 4) были получены на конфокальном рамановском микроскопе JY Horiba XPlORA Jobin (кафедра петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ), оборудованного двумя лазерами (532 и 785 нм), на основе поляризационного микроскопа Olympus BX41. Рабочая температура CCD детектора (VAC Andor) -51°C , охлаждение производится с помощью элементов Пельтье. Накопление спектров проводилось при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 25 мВт (измеренная на образце 12 мВт), объективе $100\times$ (пространственное разрешение <1 мкм), размере щели спектрометра 100 мкм и конфокального отверстия 300 мкм. Съемка осуществлялась в диапазоне от 200 до 4000 см^{-1} с использованием спектральной решетки 1800Т (1800 линий на мм). Спектры накапливались на полированной поверхности кристаллов в произвольной ориентировке. Время накопления каждого окна спектра составляло 60 с. Визуальных повреждений анализируемой поверхности в этих условиях после взаимодействия с лазерным пучком не наблюдалось. Первичная обработка спектров выполнена в программе LabSpec, вер. 5.78.24 и Fityk, версия 1.3.1.

Наиболее интенсивная полоса в спектре наблюдается при 958 см^{-1} и соответствует симметричным валентным колебаниям в тетраэдрах $[\text{SO}_4]^{2-}$. Эту полосу можно деконволюировать на 4 одиночные моды ($951, 956, 959$ и 962 см^{-1}). Колебания решетки в хасановите наблюдаются при $232, 273$ и 390 см^{-1} . Полоса при 469 см^{-1} соответствует симметричному деформационному колебанию, а четыре пика при $597, 624, 647$ и 677 см^{-1} по всей видимости отражают антисимметричные деформационные колебания в $[\text{SO}_4]^{2-}$. Интенсивная полоса при 1034 см^{-1} может быть отнесена к колебаниям в Mo–O в октаэдрах (Hardcastle, Wachs, 1990). Полосы при $911, 916, 1184$ и 1263 см^{-1} не удалось однозначно интерпретировать. Отсутствие полос в интервале $1300\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ свидетельствует об отсутствии воды, гидроксильных групп и карбонатного аниона в структуре хасановита.

Монокристалльный рентгеноструктурный анализ. Монокристалл хасановита, отобранный для рентгеноструктурного анализа, был закреплен при помощи эпоксидной смолы на тонком стеклянном волокне и изучен на рентгеновском дифрактометре Bruker “Карра APEX DUO” с микрофокусной рентгеновской трубкой Mo- $\text{I}\mu\text{S}$ ($\lambda = 0.71073\text{ \AA}$), работающей при 50 кВ и 0.6 мА. Было собрано более полусферы трехмерных рентгеновских данных при сканировании по ω с шагом 0.50° и 30-секундной экспозицией. Собранные данные были проинтегрированы и скорректированы на поглощение с использованием модели мультисканирования в программном комплексе Bruker APEX. Кристаллическая структура (табл. 3) была уточнена в пространственной группе $P2_1/c$

Таблица 2. Рентгеновская порошковая диаграмма хасановита (d в Å)
Table 2. X-ray powder diffraction data (d in Å) for hasanovite (br = broad; vbr = very broad)

I_{meas}	d_{meas}	d_{calc}	I_{calc}	hkl		
3vbr	9.47	9.499	4	1	0	0
36	7.30	7.299	46	1	1	0
48	6.57	6.570	100	0	1	1
7	5.69	5.702	9	0	2	0
		4.889	14	1	2	0
40vbr	4.79	4.750	35	2	0	0
30br	4.63	4.651	27	0	2	1
75	4.34	4.338	46	1	2	1
31	4.03	4.033	10	1	2	1
		3.650	15	2	2	0
100	3.64	3.631	95	2	1	1
31	3.53	3.529	9	1	3	0
		3.506	13	1	0	2
58	3.44	3.437	50	0	3	1
74	3.34	3.342	58	2	0	2
		3.285	26	0	2	2
63br	3.20	3.207	23	2	1	2
		3.180	10	2	2	1
13	3.01	3.010	1	3	1	1
		2.883	10	2	2	2
73	2.879	2.879	37	2	3	1
		2.734	13	1	3	2
50br	2.729	2.731	5	1	4	0
		2.717	12	3	1	1
13br	2.624	2.623	10	1	4	1
		2.621	3	1	1	3
40vbr	2.571	2.577	17	1	3	2
		2.551	12	2	2	2
8br	2.513	2.512	6	3	2	1
44	2.436	2.435	6	1	2	3
		2.433	10	3	3	0
5br	2.388	2.412	6	3	3	1
		2.394	2	2	4	1
23br	2.341	2.333	12	4	1	1
19br	2.273	2.272	8	1	2	3
28	2.205	2.204	3	3	3	2
		2.204	2	4	0	2
24br	2.162	2.164	2	4	1	2
12	2.096	2.095	8	2	3	3
11	2.059	2.056	6	4	2	2
8vbr	2.002	2.001	3	1	1	4

Таблица 2. Окончание

I_{meas}	d_{meas}	d_{calc}	I_{calc}	hkl		
		1.9970	3	3	4	1
30	1.972	1.9732	6	$\bar{1}$	5	2
		1.9666	7	$\bar{2}$	0	4
22	1.909	1.9098	4	$\bar{4}$	1	3
8	1.851	1.8508	5	3	5	0
6	1.825	1.8248	2	4	4	0
9	1.800	1.8033	5	1	6	1
16	1.744	1.7440	6	$\bar{3}$	5	2
9vbr	1.715	1.7129	2	$\bar{5}$	3	1
4	1.671	1.6711	1	$\bar{4}$	0	4
		1.6521	2	$\bar{5}$	3	2
17	1.650	1.6520	5	$\bar{3}$	3	4
10	1.626	1.6245	2	3	5	2
5br	1.608	1.6058	2	1	7	0
23vbr	1.592	1.5918	5	0	1	5
		1.5870	4	$\bar{6}$	1	1
9vbr	1.573	1.5723	2	3	6	1
		1.5709	2	3	1	4
3	1.551	1.5530	4	$\bar{1}$	6	3
3vbr	1.534	1.5283	2	$\bar{2}$	7	1
		1.5255	4	6	2	0
5	1.517	1.5176	4	$\bar{1}$	5	4
3br	1.501	1.5050	1	$\bar{6}$	2	2
		1.4954	2	6	1	1
4	1.484	1.4840	3	4	6	0
		1.4829	4	$\bar{3}$	2	5
4	1.464	1.4638	2	3	3	4
5	1.446	1.4484	3	$\bar{5}$	4	3
		1.4461	1	$\bar{3}$	6	3
7	1.429	1.4294	2	$\bar{3}$	5	4
3vbr	1.410	1.4140	2	$\bar{1}$	4	5
7vbr	1.396	1.3958	2	$\bar{3}$	7	2
		1.3833	1	4	2	4
3br	1.383	1.3831	1	1	8	1
6vbr	1.365	1.3654	3	2	8	0
3vbr	1.353	1.3570	1	7	0	0
		1.3504	3	$\bar{5}$	6	1

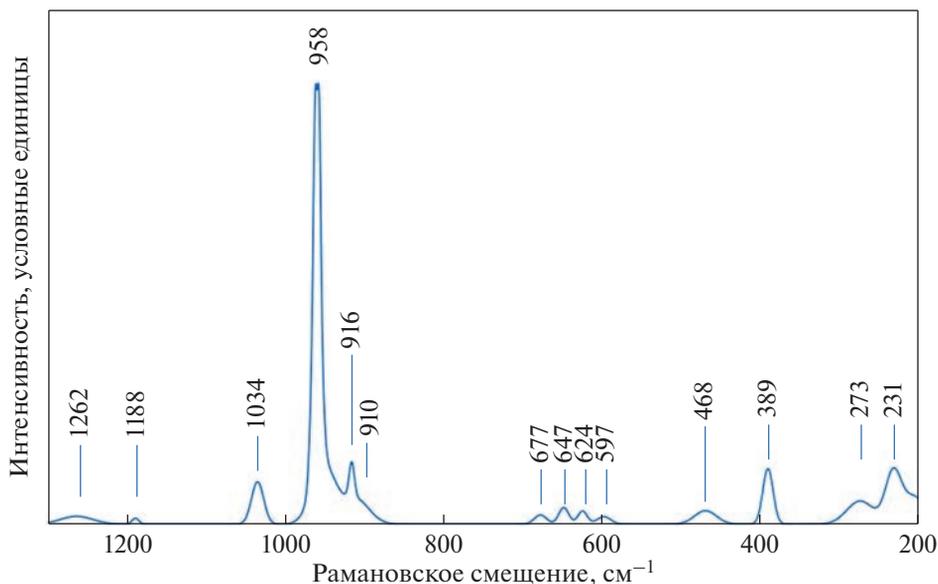


Рис. 4. КР-спектр хасановита.

Fig. 4. Raman spectrum of hasanovite.

[$a = 9.6225(2)$, $b = 11.4049(3)$, $c = 8.1421(2)$ Å, $\beta = 99.179(1)^\circ$, $V = 882.10(4)$ Å³, $Z = 4$; $R_1 = 2.7\%$ для 3698 независимых рефлексов с $|F_o| \geq 4\sigma F$] с помощью комплекса программ SHELXL (Sheldrick, 2015). Все атомы были уточнены анизотропно. Координаты атомов, параметры их смещений, некоторые длины связей и суммы валентных усилий приведены в табл. 4, 5, 6 и 7 соответственно. Суммы валентных усилий рассчитаны с использованием параметров из работы (Gagné, Hawthorne, 2015). Файл со структурной информацией по кристаллической структуре хасановита депонирован в базу данных CCDC под номером 2210217.

Кристаллическая структура хасановита содержит одну симметрично-независимую позицию Mo, две позиции S и две позиции A ($A =$ щелочной металл) (рис. 5). Каждая из позиций S^{6+} тетраэдрически координируется четырьмя атомами кислорода. Атом молибдена имеет искаженную октаэдрическую координацию четырьмя атомами кислорода общими с группами SO_4 и двумя концевыми кислородными лигандами (позиции O9 и O10). Расстояния Mo-O₇ до атомов O9 и O10 составляют 1.6684(16) и 1.6786(18) Å соответственно. Эти кислородные лиганды молибдениловой группы находятся в *цис*-ориентации один относительно другого; угол O-Mo-O составляет 104.1°.

Позиции щелочных металлов A имеют высокие координационные числа. Позиция K1 совместно заселена калием и таллием: $K_{0.9697(6)}Tl_{0.0303(6)}$, тогда как позиция Na1 заселена натрием и калием в таком соотношении: $Na_{0.772(7)}K_{0.228(7)}$. Уточненные заселенности данных позиций по данным рентгеноструктурного анализа находятся в хорошем соответствии с данными химического анализа (см. выше).

Октаэдры MoO_6 и тетраэдры SO_4 объединяются друг с другом через общие кислородные вершины с образованием слоев, показанных на рис. 6. Слои сильно гофрированы и имеют большие полости (рис. 7), так что образуются каналы, параллельные

Таблица 3. Кристаллографические параметры и параметры уточнения кристаллической структуры хасановита**Table 3.** Crystal data and refinement parameters for hasanovite

Кристаллографические данные	
Формула по результатам уточнения	$\text{K}_{1.19}\text{Na}_{0.78}\text{Ti}_{0.03}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$
Пространственная группа	$P2_1/c$
Параметры a, b, c (Å); β (°)	9.6225(2), 11.4049(3), 8.1421(2) 99.179(1)
Объем эл. ячейки (Å ³)	882.10(4)
Z	4
Рассчитанная плотность (г/см ⁻³)	2.943
Коэффициент поглощения (мм ⁻¹)	3.148
Размеры кристалла (мм)	0.2 × 0.2 × 0.2
Условия эксперимента	
Температура (К)	293
Излучение, длина волны (Å)	Mo $K\alpha$, 0.71073
$F(000)$	751
область θ (°)	2.144–37.751
h, k, l	–16→16, –19→18, –14→14
Всего отражений	15867
Независимых отражений (R_{int})	4558 (0.02)
Независимых отражений с $F > 4\sigma(F)$	3698
Уточнение структуры	
Метод уточнения	Метод наименьших квадратов в полноматричном приближении F^2
Весовая схема a, b	0.023300, 0.874600
$R_1 [F > 4\sigma(F)]$, $wR_2 [F > 4\sigma(F)]$	0.027, 0.065
R_1 all, wR_2 all	0.038, 0.061

оси a . Калий-доминантные позиции располагаются между слоями, в то время как позиции A , заселенные преимущественно натрием, находятся под выступами в гофрированном слое.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В возгонах природного подземного угольного пожара на Фан-Ягнобском каменноугольном месторождении в урочище Кухи-Малик обнаружен новый безводный молибдат-сульфат калия и натрия хасановит $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$. Он является К-Na-упорядоченным аналогом известного синтетического соединения $\text{K}_2\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2$ (Noerbygaard et al., 1998) (табл. 8). До открытия хасановита безводных молибдат-сульфатов щелочных металлов среди минералов не было известно. Синтетические соединения схожего состава, но со стехиометрией, отличной от хасановита, были описаны ранее:

Таблица 4. Координаты (x , y , z) и параметры смещений ($U_{\text{экв}}$, \AA^2) атомов в кристаллической структуре хасановита**Table 4.** Coordinates and equivalent displacement parameters (\AA) of atoms in hasanovite

Атом	Позиция Вайкоффа	x	y	z	U_{eq}
Мо1	4e	0.25421(2)	0.05120(2)	-0.00051(2)	0.02232(4)
S1	4e	0.35121(4)	0.18896(4)	-0.32156(5)	0.02069(7)
S2	4e	-0.07592(5)	0.11173(4)	-0.22126(6)	0.02612(9)
K1*	4e	0.64614(5)	0.15800(4)	-0.56423(6)	0.03997(15)
Na1**	4e	-0.07637(9)	-0.13844(7)	-0.39490(11)	0.0398(3)
O1	4e	0.24351(13)	0.28323(13)	-0.35951(17)	0.0275(3)
O2	4e	0.34807(14)	0.15826(12)	-0.14073(15)	0.0258(2)
O3	4e	-0.11485(15)	-0.00623(13)	-0.15163(18)	0.0301(3)
O4	4e	0.49056(13)	0.23132(15)	-0.32957(18)	0.0333(3)
O5	4e	0.06038(16)	0.14647(15)	-0.1243(2)	0.0385(4)
O6	4e	0.31037(18)	0.08829(15)	-0.42522(19)	0.0373(3)
O7	4e	-0.0638(2)	0.08896(18)	-0.39272(19)	0.0457(4)
O8	4e	-0.18053(19)	0.19787(16)	-0.2031(3)	0.0489(4)
O9	4e	0.39737(17)	0.00717(18)	0.1279(2)	0.0464(4)
O10	4e	0.2207(3)	-0.05901(16)	-0.1378(3)	0.0595(6)

* $\text{K}_{0.9697(6)}\text{Ti}_{0.0303(6)}$;** $\text{Na}_{0.772(7)}\text{K}_{0.228(7)}$.**Таблица 5.** Анизотропные тепловые параметры атомов в кристаллической структуре хасановита**Table 5.** Anisotropic displacement parameters (\AA) of atoms in hasanovite

Атом	U^{11}	U^{22}	U^{33}	U^{23}	U^{13}	U^{12}
Мо1	0.02593(7)	0.01897(6)	0.02251(6)	0.00301(5)	0.00521(5)	0.00305(5)
S1	0.01830(15)	0.02718(19)	0.01664(14)	0.00120(14)	0.00295(11)	0.00368(13)
S2	0.02181(17)	0.0296(2)	0.02466(18)	0.00948(16)	-0.0031(1)	-0.0031(2)
K1	0.0370(2)	0.0465(3)	0.0378(2)	0.00731(18)	0.00990(16)	0.00933(18)
Na1	0.0500(5)	0.0240(4)	0.0489(5)	-0.0019(3)	0.0183(4)	-0.0010(3)
O1	0.0206(5)	0.0309(7)	0.0318(6)	0.0109(5)	0.0064(5)	0.0069(5)
O2	0.0309(6)	0.0290(6)	0.0176(5)	0.0026(5)	0.0040(4)	0.0001(5)
O3	0.0262(6)	0.0295(7)	0.0346(7)	0.0104(6)	0.0048(5)	-0.0031(5)
O4	0.0179(5)	0.0505(9)	0.0319(7)	0.0094(6)	0.0054(5)	0.0026(5)
O5	0.0289(7)	0.0392(8)	0.0413(8)	0.0145(7)	-0.0133(6)	-0.0101(6)
O6	0.0462(9)	0.0370(8)	0.0270(6)	-0.0101(6)	0.0004(6)	0.0034(7)
O7	0.0600(11)	0.0510(10)	0.0242(7)	0.0072(7)	0.0015(7)	-0.0157(9)
O8	0.0389(9)	0.0382(9)	0.0700(12)	0.0167(9)	0.0099(8)	0.0095(7)
O9	0.0317(7)	0.0574(11)	0.0516(10)	0.0288(9)	0.0108(7)	0.0201(7)
O10	0.1002(18)	0.0294(9)	0.0545(12)	-0.0158(8)	0.0294(12)	-0.0137(10)

Таблица 6. Некоторые межатомные расстояния (Å) в кристаллической структуре хасановита
Table 6. Selected interatomic distances (Å) in hasanovite

Mo1-O9	1.6684(16)	K1-O8	2.714(2)
Mo1-O10	1.6786(18)	K1-O4	2.7331(16)
Mo1-O2	1.9846(13)	K1-O4	2.7392(15)
Mo1-O3	2.0313(14)	K1-O6	2.8433(18)
Mo1-O1	2.2208(13)	K1-O7	3.019(2)
Mo1-O5	2.2530(15)	K1-O10	3.130(2)
		K1-O8	3.173(2)
S1-O4	1.4366(14)		
S1-O6	1.4419(16)	Na1-O7	2.4234(19)
S1-O1	1.4911(13)	Na1-O5	2.4613(18)
S1-O2	1.5184(13)	Na1-O6	2.5476(19)
		Na1-O3	2.5628(18)
S2-O8	1.4310(19)	Na1-O7	2.596(2)
S2-O7	1.4428(17)	Na1-O1	2.8785(17)
S2-O5	1.4730(14)	Na1-O1	2.9561(16)
S2-O3	1.5295(15)	Na1-O8	3.099(2)
		Na1-O10	3.386(3)

Таблица 7. Расчет валентных усилий в кристаллической структуре хасановита
Table 7. Bond-valence values (*v.u.*) for hasanovite

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	Σv_c
Mo	0.40	0.79	0.69		0.37				1.96	1.90	6.11
K1		0.02		$0.18 \times 2 \rightarrow \downarrow$		0.14	0.09	0.19 0.06		0.07	0.93
Na1	0.06 0.05		0.13		0.16	0.13	0.18 0.12	0.04			0.87
S1	1.43	1.34		1.64		1.61					6.02
S2			1.30		1.49		1.61	1.66			6.06
Σv^a	1.94	2.15	2.12	2.00	2.02	1.88	2.00	1.95	1.96	1.97	

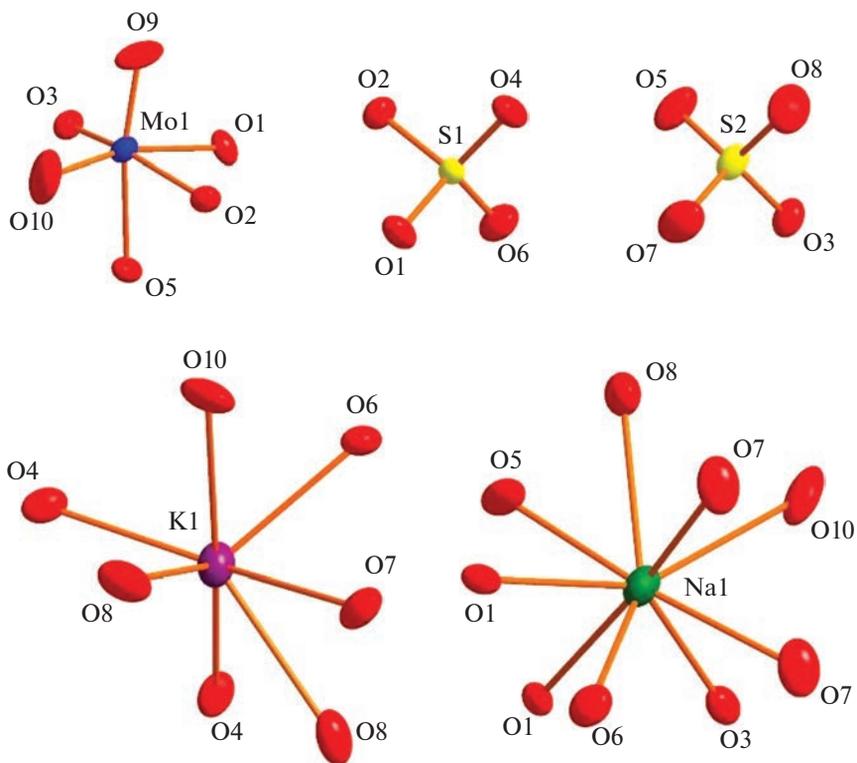


Рис. 5. Координация катионов в структуре хасановита.

Fig. 5. Cation coordination environments in the structure of hasanovite.

$\text{K}_4\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_3$ и $\text{Na}_4\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_3$ (Cline Schaeffer, Berg, 2008a, b). Помимо этого, известно несколько синтетических полиморфов безводного $\text{MoO}_2(\text{SO}_4)$ (Christiansen et al., 2001; Betke, Wickleder, 2011).

Таблица 8. Сравнение кристаллографических параметров хасановита и синтетического соединения $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ (Noerbygaard et al. 1998)

Table 8. Crystallographic data for hasanovite and synthetic $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ (Noerbygaard et al., 1998)

	Хасановит	$\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$
Пространственная группа	$P2_1/c$	$P2_1/c$
$a(\text{Å})$	9.6225(2)	9.0144(3)
$b(\text{Å})$	11.4049(3)	12.4540(4)
$c(\text{Å})$	8.1421(2)	8.8874(3)
β (°)	99.179(1)	112.194(1)
Объем эл. ячейки (Å^3)	882.10(4)	923.82
Z	4	4

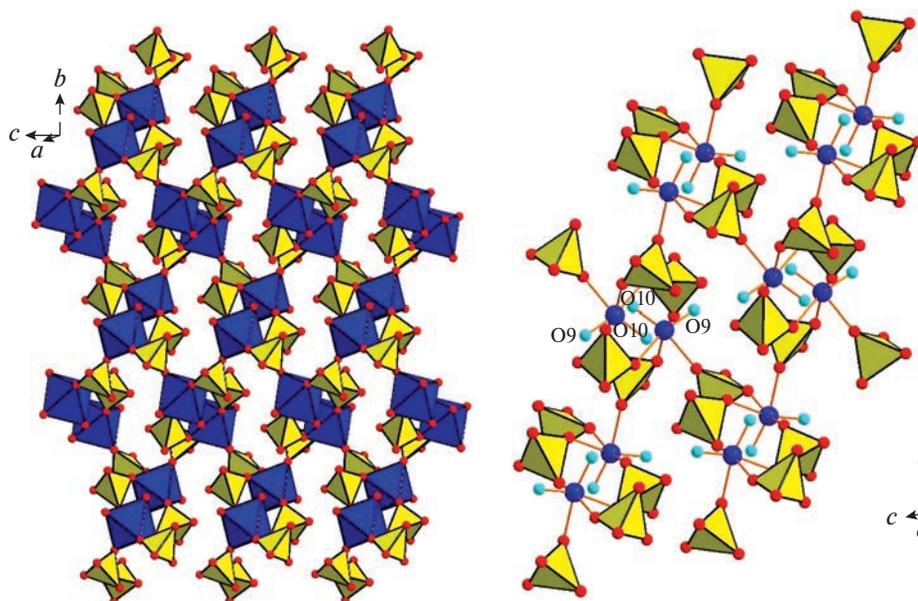


Рис. 6. Полиэдрическое представление слоя $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ в структуре хасановита (октаэдры MoO_6 = синие, тетраэдры SO_4 = желтые) (слева). Увеличенный фрагмент слоя с отмеченными голубым цветом атомами O9 и O10, принадлежащими молибдениловым катионам.

Fig. 6. Polyhedral representation of $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ layer in hasanovite (MoO_6 octahedra = blue, SO_4 tetrahedra = yellow) (left). Enlarged fragment of the layer highlighting unshared with SO_4 tetrahedra O9 and O10 oxygen atoms (marked by light-blue).

Хасановит образуется из газа при температуре выше 300°C . Молибденовая минерализация широко развита в возгонах подземного пожара на Фан-Ягнобском угольном месторождении. В полевых условиях ее часто можно распознать по характерному посинению только что извлеченных из горячей зоны образцов при их остывании на воздухе. По литературным данным, методами рентгенофлуоресцентного и спектрального анализов молибден в повышенных содержаниях установлен во вмещающих угольные пласты железистых песчаниках и алевролитах (Новиков, Супрычев, 1986; Новиков и др., 1989). Из собственных минералов молибдена, кроме молибдита, MoO_3 , новиковита $(\text{NH}_4)_4(\text{Mo}_2^{6+}\text{Mo}_2^{5+})_4\text{O}_8(\text{SO}_4)_5$ (Pautov et al., 2022) и хасановита, $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$, в образцах возгонов этого подземного пожара нами также обнаружены другие молибдат-сульфатные фазы, которые в настоящее время находятся в стадии исследования. Представляется возможным предположить, что распространенности сульфатных минералов в возгонах угольных пожаров Кухи-Малика способствует каталитическая роль соединений молибдена в окислении SO_2 в SO_3 .

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ Ш.Ё. Ёрова, А.Р. Файзиева и М.А. Шодибекова и ресурсный центр СПбГУ “Рентгенодифракционные методы исследования” за техническую поддержку при выполнении структурных исследований хасановита.

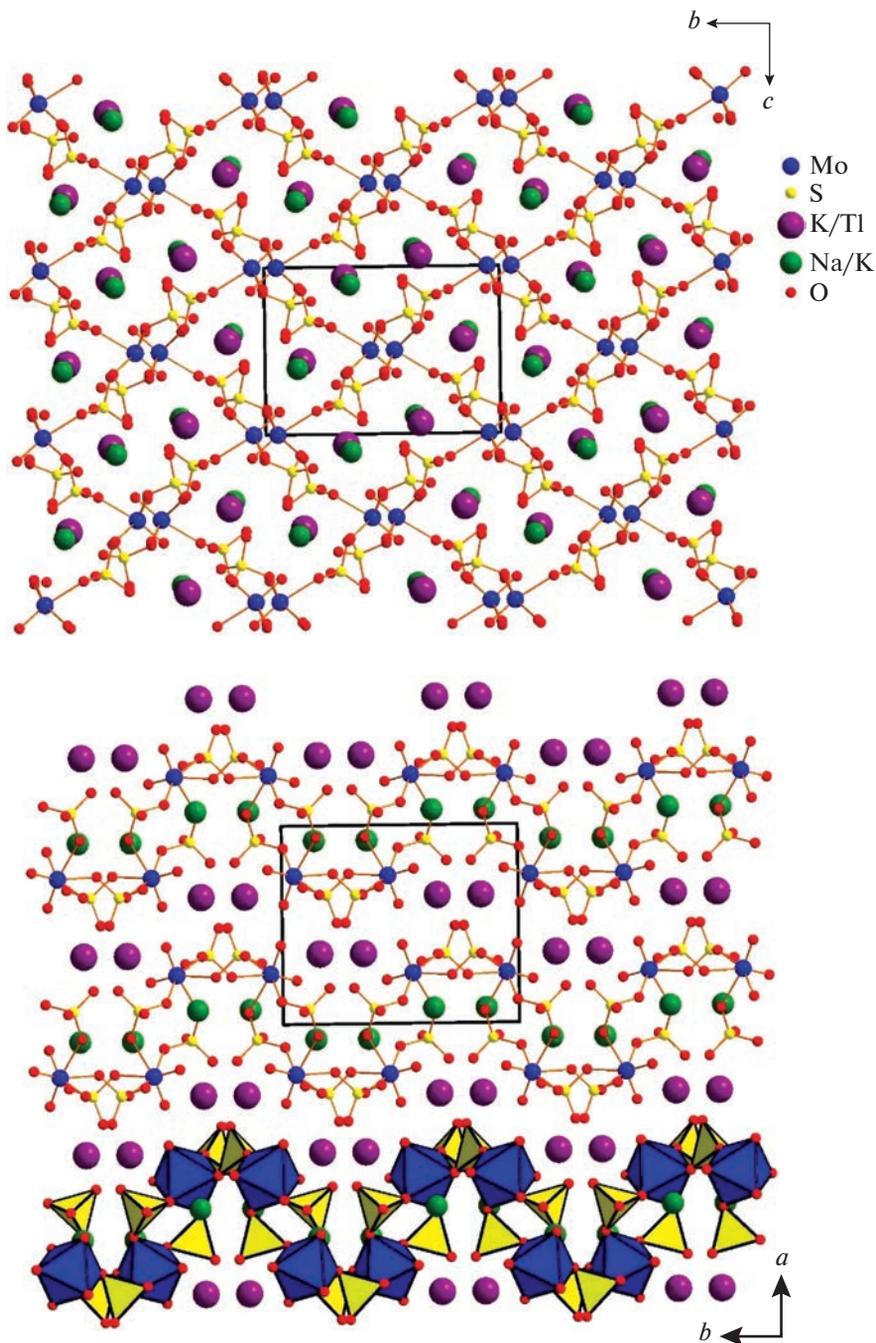


Рис. 7. Проекция кристаллической структуры хасановита вдоль оси a (вверху) и оси c (внизу). Показана элементарная ячейка.

Fig. 7. General projection of the crystal structure of hasanovite along the a axis (above) and c axis (below). The unit cell is outlined.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белаковский Д.И., Москалев И.В.* Аммониевая селитра из продуктов угольного пожара в урочище Кухи-Малик (Центральный Таджикистан) // Новые данные о минералах. **1988**. Вып. 35. С. 191–194.
- Белаковский Д.И., Новиков В.П., Паутов Л.А., Супрычев В.В.* Первая находка летовицита на территории СССР (Центральный Таджикистан) // Докл. АН Таджикской ССР. **1988**. Т. 31. № 9. С. 603–606.
- Вадило П.С.* Подземный пожар в Центральном Таджикистане // Природа. **1958**. № 8. С. 88–91.
- Ермаков Н.П.* Пасруд-Ягнобское месторождение углей и горящие копи г. Кан-Таг // К геологии каменноугольных месторождений Таджикистана (под ред. А.Р. Бурачека и П.П. Чуенко). Материалы Таджикско-Памирской экспедиции 1933 г. Вып. XII. Л: Химтеорет, **1935**. С. 47–66.
- Зеленский М.Е., Мацеевский А.Б., Пеков И.В.* Программа Qsрestrq для автоматической обработки дебаграмм // ЗРМО. **2009**. Т. 138. № 4. С. 103–112.
- Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Мираков М.А., Сийдра О.Й., Махмадишариф С., Шодибеков М.А., Плечов П.Ю.* Находка бонанциита и алакранита в возгонах природного подземного угольного пожара в урочище Кухи-Малик, Таджикистан // Новые данные о минералах. **2021**. Вып. 55. Вып. 4. С. 82–93.
- Мираков М.А., Файзиев А.Р., Паутов Л.А.* Самородный селен в продуктах подземного пожара Фан-Ягнобского угольного месторождения (Центральный Таджикистан) // Докл. АН Респ. Таджикистан. **2017**. Т. 60. № 9. С. 456–460.
- Мираков М.А., Паутов Л.А., Махмадишариф С., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р.* Пауфлерит $\beta\text{-VO}(\text{SO}_4)$ в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик (Рават) на Фан-Ягнобском угольном месторождении, Таджикистан // Новые данные о минералах. **2019**. Вып. 53(4). С. 114–121.
- Мираков М.А., Паутов Л.А., Карпенко В.Ю., Махмадишариф С., Шодибеков М.А.* Первая находка ртутных минералов – тиманнита и киновари в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан) // Новые данные о минералах. **2020**. Вып. 54(4). С. 96–106.
- Новиков В.П., Супрычев В.В., Бабаев М.А.* Нашатырь из возгонов подземного пожара на Раватском угольном месторождении (Центральный Таджикистан) // Докл. АН Таджикской ССР. **1979**. Т. 22. № 11. С. 687–690.
- Новиков В.П., Супрычев В.В.* Условия современного минералообразования в процессе подземного горения углей на Фан-Ягнобском месторождении // Минералогия Таджикистана. **1986**. № 7. С. 91–104.
- Новиков В.П., Супрычев В.В., Салихов Ф.С.* Некоторые геохимические особенности гипергенного минералообразования в условиях современного угольного пожара на примере Фан-Ягнобского месторождения // Минералогия Таджикистана. **1989**. № 8. С. 107–118.
- Новиков В.П.* Пожар, которому тысяча лет // Наука и жизнь. **1989**. № 9. С. 30–32.
- Новиков В.П.* Органические производные угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении // Изв. АН Респ. Таджикистан. Отделение наук о Земле. **1993**. № 4(7). С. 51–58.
- Охунов Р.В., Ёров З.Ё., Негматов И.И.* Атлас-справочник угольного месторождения Фан-Ягноб // Душанбе. **2017**. 170 с.
- Паутов Л.А., Мираков М.А., Махмадишариф С., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р.* Находка самородного теллура в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан) // Новые данные о минералах. **2019**. Вып. 53(4). С. 95–99.
- Фозилов Дж.Н., Алидодов Б.А.* Элементы-примеси в углях каменноугольного месторождения Фан-Ягноб // Изв. АН Респ. Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. **2017**. Т. 167(2). С. 101–110.
- Хасанов А.Х.* Геотектонические условия образования субщелочнобазальтоидных трубок взрыва в складчатых областях (на примере Гиссаро-Алая) // Докл. АН СССР. **1972**. Т. 203(5). С. 1195–1197.
- Хасанов А.Х.* Геология и возраст метаморфических формаций Гарм-Хайтской зоны (Центральный Таджикистан) // Изв. АН Тадж. ССР. Отд. физ.-мат. и геол.-хим. наук. **1978**. Т. 3. С. 106–109.
- Хасанов А.Х.* Изотопный состав углерода графита в связи с возрастом метаморфических комплексов Гармского массива (Южный Тянь-Шань) // Вестник Таджикск. национ. ун-та. Серия естественных наук. **2015**. Т. 1/1(156). С. 294–299.
- Шарыгин В.В., Сокол Э.В., Белаковский Д.И.* Фаялит-секанинаитовые паралавы Раватского угольного пожара (Центральный Таджикистан) // Геология и геофизика. **2009**. Т. 50(8). С. 910–932.

Hasanovite $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$, a New Mineral from Natural Underground Coal Fires at the Fan-Yagnob Coal Deposit, Tajikistan

M. A. Mirakov^{a, *}, L. A. Pautov^a, O. I. Siidra^{b, c},
S. Makhmadsharif^d, V. Yu. Karpenko^a, and P. Yu. Plechov^a

^aFersman Mineralogical Museum, RAS,
Leninskiy pr., 18-2, Moscow, 119071 Russia

^bDepartment of Crystallography, Saint Petersburg State University,
University Emb., 7/9, Saint Petersburg, 119034 Russia

^cKola Science Center, RAS, Apatity, Murmansk Region, 184209 Russia

^dInstitute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, Academy of Sciences
of the Republic of Tajikistan, st. Aini, 267, Dushanbe, 734063 Tajikistan

*e-mail: mirakov.bobish@mail.ru

The new mineral hasanovite $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ was discovered in sublimates of a natural underground coal fire at the Fan-Yagnob coal deposit in the upper reaches of the Kuhi-Malik ravine in the Aini district, Central Tajikistan. The mineral is named in honor of the petrographer Abdurahim Hasanovich Hasanov (born 1933). Hasanovite occurs as small (50–200 μm) grains on a burnt siltstone in association with anhydrite, baryte, anglesite, molybdenite, native tellurium, and understudied Sb-K, K-Mg, Tl-V, and Sn sulfates. The mineral is transparent, colourless with a vitreous luster and white streak. It is brittle, with no cleavage. VHN 103 (range from 84 to 113). The Mohs' hardness is 3. $D_{\text{meas}} = 2.93(2)$ and $D_{\text{calc}} = 2.94 \text{ g/cm}^3$. Hasanovite is colourless in transmitted light, pleochroism is not observed; it is optically biaxial (+), $2V = 50(3)^\circ$, $\alpha = 1.584(2)$, $\beta(\text{calc.}) = 1.590(3)$, $\gamma = 1.620(2)$ (590 nm). Strong lines in the Raman spectrum are as follows: 1034, 958, 916, 648, 469, 390, 273 and 232 cm^{-1} . Hasanovite is insoluble in water and ethanol but soluble in HCl. The chemical composition studied by electron microprobe (wt %) is: Na_2O 4.54, K_2O 13.81, Tl_2O 1.80, MoO_3 38.75, SO_3 40.10, total 99.00. The empirical formula, calculated on the basis of O = 10 atoms per formula unit, is $\text{K}_{1.16}\text{Na}_{0.58}\text{Tl}_{0.03}\text{Mo}_{1.06}\text{S}_{1.98}\text{O}_{10}$. The strongest lines in the powder X-ray diffraction pattern are [d, Å(I, %)(hkl)]: 7.30(36)(110); 6.57(48)(011); 4.34(75)(121); 3.64(100)(211); 3.44(58)(031); 3.34(74)(202, 022); 3.20(63)(212); 2.879(73)(231); 2.729(50)(140); 2.436(44)(123). Hasanovite is monoclinic, space group is $P2_1/c$, $a = 9.6225(2)$, $b = 11.4049(3)$, $c = 8.1421(2)$ Å, $\beta = 99.1790(10)^\circ$, $V = 882.10(4)$ Å³, $Z = 4$. The crystal structure ($R_1 = 2.7\%$) is close to the structure of synthetic $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$. The holotype specimen of hasanovite is deposited in the collection of the Fersman Mineralogical Museum of RAS (Moscow), registration number 5568/1.

Keywords: hasanovite, sulfates, molybdates, sublimates, underground coal fire, Kukhi-Malik, Ravat, Fan-Yagnob coal deposit, Tajikistan

REFERENCES

- Betke U., Wickleder M.S. Sulfates of the refractory metals: crystal structure and thermal behavior of $\text{Nb}_2\text{O}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{MoO}_2(\text{SO}_4)$, $\text{WO}(\text{SO}_4)_2$, and two modifications of $\text{Re}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2$. *Inorg. Chem.* **2011**. Vol. 50. P. 858–872.
- Belakovski D. Die Mineralien der brennenden Kohleflöze von Ravat in Tadzhikistan. *Lapis.* **1990**. Jg. 15(12). S. 21–26 (in German).
- Belakovskiy D.I., Moskalyov I.V. Ammonia nitrate from the products of coal fire at the Kih-Malik tract (Central Tadzhikistan). *New data on minerals.* **1988**. Vol. 35. P. 191–194 (in Russian).
- Belakovskiy D.I., Novikov V.P., Pautov L.A., Suprychev V.V. The first find of letovicite on the territory of the USSR (the Central Tajikistan). *Doklady Tadzhik. Acad. Sci.* **1988**. Vol. 31(9). P. 603–606 (in Russian).
- Christiansen A.F., Fjellvag H., Kjekshus A., Klewe B. Synthesis and characterization of molybdenum(VI) oxide sulfates and crystal structures of two polymorphs of $\text{MoO}_2(\text{SO}_4)$. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* **2001**. Iss. 6. P. 806–815.

Cline Schaeffer S.J., Berg R.W. Catena-Poly[tetrasodium [[cis-dioxido-trans-bis(sulfato-kappaO)molybdate(VI)]-mu-sulfato-kappa(2)O:O']]]. *Acta Cryst.* **2008a**, E64, i73.

Cline Schaeffer S.J., Berg R.W. Tetrapotassium cis-dioxido-trans-bis(sulfato-kappa O)sulfato(kappa(2)O,O') molybdate (VI). *Acta Cryst.* **2008b**, E 64, i20.

Ermakov N.P. Pasrud-Yagnobskoye coal deposit and firing mines of the Kan-Tag mountain. In: On geology of coal deposits of Tadzhikistan. In: *Materials of Tajik-Pamir Expedition 1933*. **1935**. XII. P. 47–66 (in Russian).

Fozilov Dj.N., Alidodov D.A. Elements of the impurities in coal coalfield background Yagnob. *News Acad. Sci. of the Republic of Tajikistan*. **2017**. Vol. 167. P. 101–110 (in Russian).

Hardcastle F.D., Wachs I.E. Determination of molybdenum–oxygen bond distances and bond orders by Raman spectroscopy. *J. Raman spectr.* **1990**. Vol. 10. P. 683–691.

Hasanov A.H. Geotectonic conditions of formation of subalkaline basaltoid explosion tubes in the orogeny areas (on the example of Gissaro-Alai). *Doklady USSR Acad. Sci.* **1972**. Vol. 203(5). P. 1195–1197 (in Russian).

Hasanov A.H. Geology and age of the metamorphic formations of the Garm-Hoit zone. *Proc. Tadjhik. Acad. Sci. Dep. Phys.-Math. and Geol.-Miner. Sci.* **1978**. Vol. 3. P. 106–109 (in Russian).

Hasanov A.H. Isotopic composition of graphitic carbon and age of metamorphic complexes of Garm rock massif (South Tien-Shan). *Harold Tadjhik. National Univers. Ser. Natur. Sci.* **2015**. Vol. 1/1(156). P. 294–299 (in Russian).

Karpenko V.Yu., Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Makhmadsharif S., Shodibekov M., Plechov P.Yu. Bonazziite and alacranite from sublimates of the natural underground coal fire at Kukhi-Malik tract, Tajikistan. *New data on minerals*. **2021**. Vol. 54(4). P. 82–93 (in Russian).

Karpenko V.Y., Pautov L.A., Siidra O.I., Mirakov M.A., Zaitsev A.N., Plechov P.Yu., Makhmadsharif S. Ermakovite $(\text{NH}_4)(\text{As}_2\text{O}_3)_2\text{Br}$, a new exhalative arsenite bromide mineral from the FanYagnob coal deposit, Tajikistan. *Miner. Mag.* **2022** (in press).

Mirakov M.A., Pautov L.A., Siidra O.I., Makhmadsharif S., Karpenko V.Y., Plechov P.Y. Hasanovite. IMA 2020-033. CNMNC Newsletter No. 57. *Eur. J. Miner.* **2020a**. Vol. 32. P. 495–499.

Mirakov M.A., Pautov L.A., Siidra O.I., Karpenko V.Y., Plechov P.Y., Borisov A.S.: Iskandarovite, IMA 2022-034, in: CNMNC Newsletter 68, *Eur. J. Miner.* **2022a**. Vol. 34.

Mirakov M.A., Faiziev A.R., Pautov L.A. Native selenium in products of the underground fire of the Fan-Yagnob coal field (the Central Tajikistan). *Doklady Acad. Sci. Tadjhik. Republic.* **2017**. Vol. 60(9). P. 456–460 (in Russian).

Mirakov M.A., Pautov L.A., Karpenko V.Yu., Faiziev A.R., Mahmasharif S. Pauflerite $\beta\text{-VO}(\text{SO}_4)$ from sublimates of the natural underground fire in the Kukhi-Malik (Ravat) tract, Fan-Yagnob coal deposit, Tadzhikistan. *New data on minerals*. **2019**. Vol. 53(4). P. 114–120 (in Russian).

Mirakov M.A., Pautov L.A., Mahmasharif S. Karpenko V.Yu., Shodibekov M.A. The first find of mercury minerals - tiemannite and cinnabar in the sublimates of a natural underground fire in the Kuhi-Malik tract at the Fan-Yagnob coal. *New data on minerals*. **2020**. Vol. 54(4). P. 96–106 (in Russian).

Nasdala L., Pekov I.V. Ravatite $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$, a new organic mineral species from Ravat, Tadzhikistan. *Eur. J. Miner.* **1993**. Vol. 5. P. 699–706.

Noerbygaard T., Berg R.W., Nielsen K. The reaction between MoO_3 and molten $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ forming $\text{K}_2\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2$, studied by Raman and IR spectroscopy and X-ray crystal structure determination. *Electrochem. Soc. Proc.* **1998**. Vol. 98. P. 553–573.

Novikov V.P. The organic derivatives of the coal fire at Fan-Yagnobskoye deposit. *Proc. Tadjhik. Acad. Sci. Dep. Earth Sci.* **1994**. Vol. 4(7). P. 51–58 (in Russian).

Novikov V.P. The fire, that is a thousand years. *Nature and Life*. **1989**. N 9. P. 30–32 (in Russian).

Novikov V.P., Suprychev V.V. Conditions of the modern mineral genesis at the underground firing coals at Fan-Yagnobskoye deposit. *Mineralogy of Tadzhikistan*. **1986**. Vol. 7. P. 91–104 (in Russian).

Novikov V.P., Suprychev V.V., Babayev M.A. Salammoniac from sublimates of the underground coal fire at the Ravat coal deposit (Central Tadzhikistan). *Doklady Tadjh. SSR Acad. Sci.* **1979**. Vol. 12. P. 687–690 (in Russian).

Novikov V.P., Suprychev V.V., Salikhov F.S. Some geochemical specific of the supergene mineral origin in the conditions of the modern coal fire on the example of Fan-Yagnobskoye deposit. *Mineralogy of Tadzhikistan*. **1989**. Vol. 8. P. 107–118 (in Russian).

Okhunov R.V., Yorov Z.Yo., Negmatov I.I. Reference atlas of the Fan-Yagnob coal deposit. Dushanbe, **2017**. 170 p. (in Russian).

Pautov L.A., Mirakov M.A., Mahmadsarif S., Karpenko V.Yu., Faiziev A.R. The find of native tellurium in the sublimate of a natural underground fire at the Fan-Yagnob coal deposit (Tadzhikistan). *New data on minerals*. **2019**. Vol. 53(4). P. 95–99 (*in Russian*).

Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Faiziev A.R., Nazarchuk E.V., Karpenko V.Y., Makhmadsharif S. Falgarite, $K_4(VO)_3(SO_4)_5$, a new mineral from sublimate of a natural underground coal fire at the tract of Kukhi-Malik, Fan-Yagnob coal deposit, Tajikistan. *Miner. Mag.* **2020**. Vol. 84(3). P. 455–462.

Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Chukanov N.V., Borisov A.S., Karpenko V.Y., Plechov, P.Y., Makhmadsharif, S. Novikovite, IMA 2022-067. CNMNC Newsletter 70, *Eur. J. Miner.* **2022**. 34.

Sharygin V.V., Sokol E.V., Belakovskii D.I. Fayalite-sekaninaite paralava from the Ravat coal fire (central Tajikistan). *Russian Geol. Geophys.* **2009**. Vol. 50(8). P. 910–932 (*in Russian*).

Vadilo P.S. The underground fire in Central Tadzhikistan. *Priroda*. **1958**. N 8. P. 88–91 (*in Russian*).

Zelensky M.E., Matseevsky A.B., Pekov I.V. The computer program QSPECTR for processing X-ray powder diffraction films, obtained from the Debye-Scherrer camera. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. Vol. 138(4). P. 75–80 (*in Russian*).

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

САМОРОДНЫЙ КОБАЛЬТ НА ГЛУБИННЫХ ГОРИЗОНТАХ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ

© 2023 г. Т. А. Горностаева¹, *, д. чл. А. В. Мохов¹, П. М. Карташов¹, К. В. Лобанов²

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

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

*e-mail: tagorn8@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 13.12.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Комплексом локальных аналитических методов (аналитическая сканирующая электронная микроскопия, EBSD) в образце амфиболита Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) с глубины 9630 м диагностирован самородный кобальт. Амфиболит имеет мелкозернистую структуру и сложен роговой обманкой, отвечающей по составу магнезиоферригорнблендиту. Для него характерна разнообразная акцессорная самородная, теллуридная, сульфотеллуридная и сульфидная (Au, Ag, Pd, Bi, Cu, Pb, Zn, Sb, Fe) минерализация. В амфиболите заключен ксенокласт клинопироксена, несущий принципиально иной набор аксессуаров – бедный сульфидами и включающий самородный кобальт. Установлено отсутствие в самородном кобальте каких-либо значительных примесей и определена его принадлежность к гексагональной α -модификации. Самородный кобальт, вероятно, образовался не только до этапа ретроградного метаморфизма и последующей гидротермальной переработки вмещающего его амфиболита, но, вероятно, и задолго до образования вулканогенно-осадочного протолита этой породы. Предполагается, что самородный кобальт относится к ранним высокотемпературным минеральным фазам, унаследованным от пород, образовавшихся в ходе древнего протерозойско-архейского основного вулканизма, тогда как время образования данного прослоя амфиболитов датируется возрастом 2.4 млрд лет.

Ключевые слова: Кольская сверхглубокая скважина, СГ-3, самородный кобальт, аналитическая электронная микроскопия, СЭМ, ЭДС, FIB, EBSD

DOI: 10.31857/S0869605523010057, EDN: NFXGCU

ВВЕДЕНИЕ

Кольская сверхглубокая скважина (государственный индекс – СГ-3), выдающееся достижение советской науки и техники, заложена в северо-западной части Кольского полуострова на территории древнейших на Земле рудоносных тектонических структур раннего протерозоя и архея. СГ-3 пробурена в рамках программы “Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение” (Повалихин, 2020). Главной ее задачей считалась возможность получить непосредственно с больших глубин фактический материал, крайне необходимый для познания эндогенных процессов и связанных с ними месторождений полезных ископаемых. Технологии, использованные при бурении этой скважины, были разработаны отечественными инженерами и учеными и до настоящего времени не имеют аналогов в мире. Беспрецедентное в мировой практике бурение с полным отбором

керна заняло более 20 лет – с 1970 по 1992 год – и позволило получить образцы с глубин до 12262 м (Повалихин, 2020; Лобанов и др., 2021а).

Исследования проводились на образцах керна, переданных в ИГЕМ АН СССР (в настоящее время – ИГЕМ РАН) представителями Кольской геологоразведочной экспедиции НПО “Недра” Мингео СССР с составлением специальных актов на всем интервале бурения до 12 км. Эти акты включали специализированную документацию многих сотен образцов керна. В ИГЕМ РАН, после завершения бурения в 1992 г., была создана тематическая группа, в которую вошли сотрудники отделов эндогенных рудных месторождений, петрографии, метасоматизма и метаморфизма, рентгеноспектральной лаборатории и лаборатории изотопных исследований. Работы были направлены на изучение эндогенных процессов в глубинных зонах земной коры, прежде всего процессов рудообразования. Они включали специализированную документацию керна, изучение типоморфизма минералов, минеральных парагенезисов горных пород и руд, наблюдения за внутренним строением разрывных нарушений, соотношениями между деформациями горных пород, их метаморфизмом и петрофизическими свойствами.

В ходе работ были выбраны рациональные методы изучения керна и построения специализированных разрезов. Была составлена собственная документация разреза Кольской сверхглубокой скважины с указанием всех отобранных и изученных образцов пород и руд. Главным направлением исследований в ИГЕМ было изучение взаимосвязи между метаморфизмом, тектоническими деформациями, петрофизическими свойствами пород и рудной минерализацией в разрезе СГ-3.

Уникальность полученной информации при изучении керна СГ-3 состоит в том, что на глубоких горизонтах обнаружены рудные минералы, происхождение которых связано не только с магматическими процессами, но и с формированием оруденения в зонах дислокационного метаморфизма до глубины 12 км. Одним из первых результатов изучения СГ-3 стало открытие повышенных содержаний золота в интервале 9500–11000 м (Козловский и др., 1988). Позже применение современных методов электронной микроскопии позволило обнаружить не только тонкодисперсную форму выделения золота, но и определить содержание в нем примесей. Кроме того, в образцах с глубины 9630 м удалось установить разнообразную благороднометалло-редкоэлементную минерализацию (Лобанов и др., 2019). В дальнейшем использование метода дифракции электронов на отражение впервые для глубоких горизонтов СГ-3 (9630 м) позволило обнаружить и диагностировать собственный палладиевый минерал – меренскиит $\text{Pd}(\text{Te}, \text{Bi})_2$ (Лобанов и др., 2021б).

Учитывая ценность материалов СГ-3, сравнимых по уникальности с образцами лунного грунта, требовалось предельно тщательно изучить фрагмент керна с ранее обнаруженной минерализацией и провести поиск рудных фаз с максимально возможной локальностью. Задачей исследования являлось осуществление поиска и диагностики субмикронных выделений рудных минералов методами сканирующей электронной микроскопии с применением современных аппаратных возможностей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подготовки к исследованиям предварительно механически отполированного фрагмента шлифа для вскрытия интересующих фаз применялась установка GATAN PECS II с использованием ионов аргона с энергией пучка 8 кэВ и углами между ионным пучком и поверхностью образца 15 градусов. Поиск и первичная диагностика фаз выполнялись на аналитическом сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-5610LV с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford X-Max100 Aztec. Для точной структурной идентификации фаз возникла необходимость использовать дифракцию электронов на отражение, для чего использовался Tescan MIRA с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford X-Max100 Aztec, дополнительно оснащенный системой

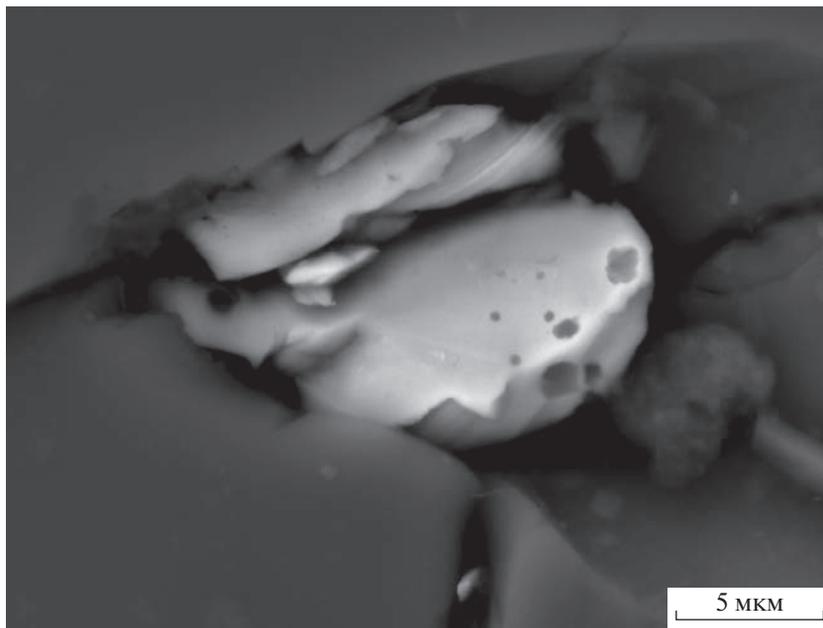


Рис. 1. Наиболее крупная частица самородного кобальта в амфиболе. СЭМ-изображение в режиме отраженных электронов.

Fig. 1. The largest particle of native cobalt inside amphibole. SEM image in regime of back-scattered electrons (BSE).

дифракции на отражение (EBSD) AZtecCrystal. Применение этого метода требует особо чистой поверхности изучаемого образца, что вызвало необходимость предварительного травления и полировки его ионным пучком на двухпучковом электронном микроскопе (FIB) Tescan AMBER. Травление ионами галлия было выполнено при напряжении 15 кВ, токе 5 нА и угле 10 градусов к поверхности образца на протяжении 4 ч. Полировка осуществлялась в течение 2 ч при напряжении 5 кВ, токе 1.4 нА, углом наклона к плоскости образца 10 градусов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении благороднометалльной минерализации в образце зерна амфиболита с глубины 9630 м возникла необходимость ионной полировки зерна меренскиита (Лобанов и др., 2021б). При этом была захвачена область аншлифа, находящаяся приблизительно в 0.3 мм от изучаемого кристалла. В результате этой ионной полировки в пироксеновой матрице была частично вскрыта частица самородного кобальта, которая имела размер около 15×8 мкм (рис. 1). Качество вскрытой поверхности кобальтового зерна оказалось недостаточным для получения дифракционных картин, пригодных для расшифровки. С целью получения качественной поверхности была использована полировка и шлифовка образца ионами галлия на микроскопе FIB Tescan AMBER с непосредственным визуальным контролем процесса. Такая обработка позволила дополнительно вывести на поверхность несколько частиц кобальта, которые были вскрыты вместе с тонкой трещинкой (рис. 2). В составе самой крупной частицы, кроме самородного кобальта, была зафиксирована примесь марганца с содержанием 0.2 мас. %. Наличие в полученном ЭД спектре (рис. 3) пиков железа, скорее всего, вызвано флюоресцентным возбуждением окружающей железосодержащей авгитовой матрицы, пики остальных

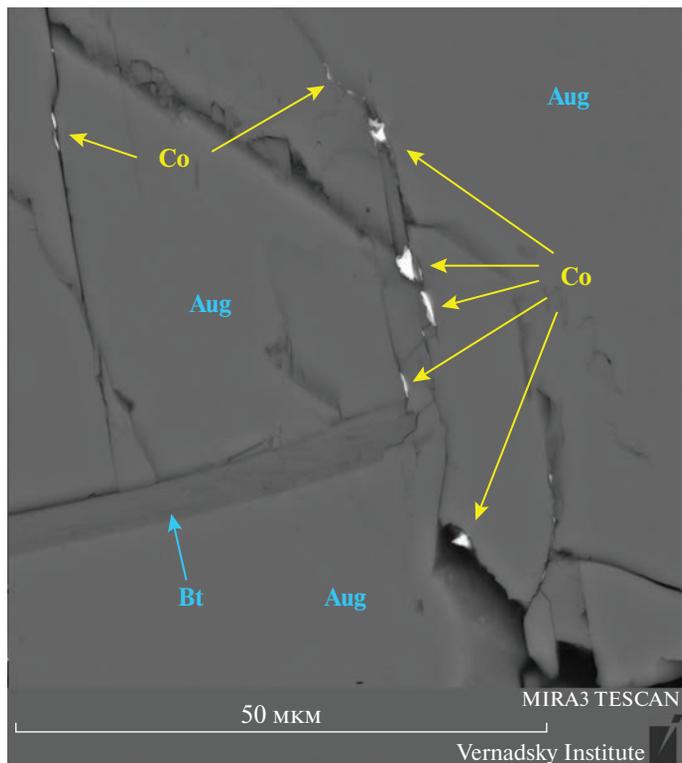


Рис. 2. Частицы самородного кобальта, вскрытые повторной ионной полировкой. Aug – авгит, Bt – биотит. СЭМ-изображение в режиме отраженных электронов.

Fig. 2. Particles of native cobalt recovered by repeated ionic polishing. Aug – augite, Bt – biotite. BSE image.

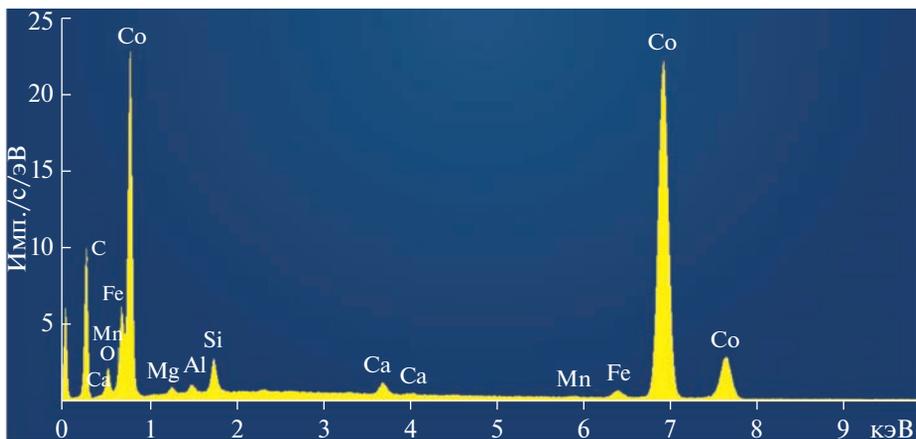


Рис. 3. ЭД-спектр характеристического рентгеновского излучения от частицы кобальта.

Fig. 3. ED-spectrum of characteristic X-ray emission from the cobalt particle.

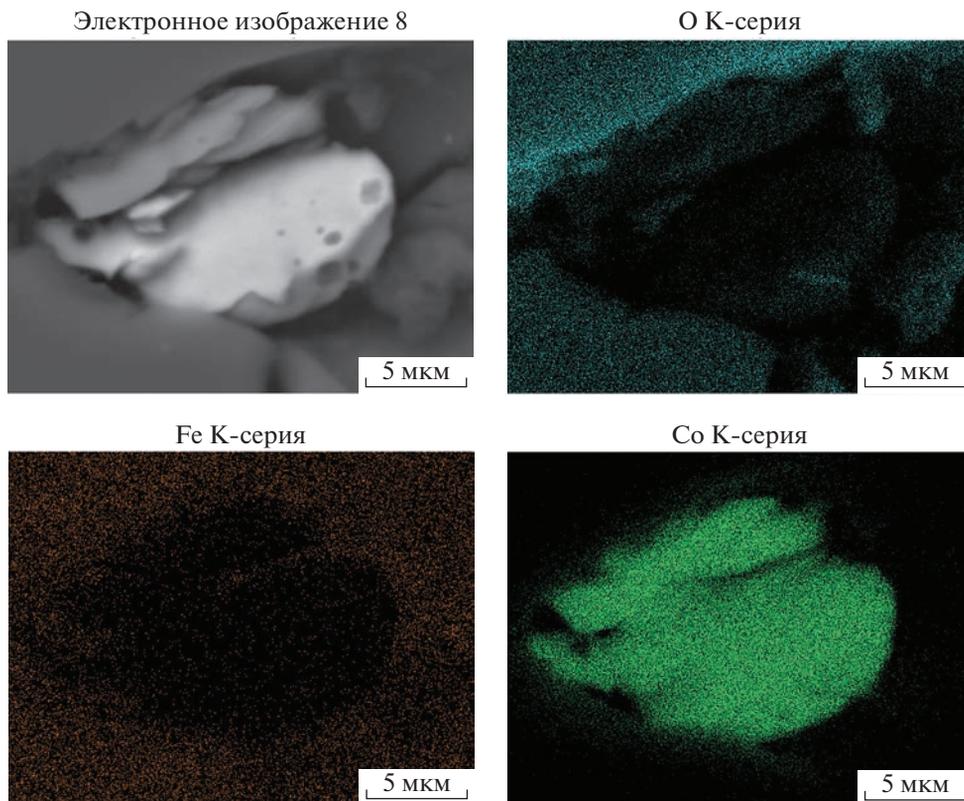


Рис. 4. Карты распределения элементов (в характеристическом рентгеновском излучении) по площади частицы самородного кобальта.

Fig. 4. Maps of distribution of elements over the native cobalt particle.

элементов которой (Mg, Al, Si и Ca) также присутствуют в спектре. В составе мелких частиц самородного кобальта примеси марганца (выше предела чувствительности метода) не было обнаружено.

Для области препарата с самой крупной частицей, представленной на рис. 1, были получены карты распределения кислорода, кремния, железа и кобальта по площади. Они подтвердили отсутствие в частице самородного кобальта кислорода, а также локализацию железа исключительно в окружающем самородный кобальт силикате (рис. 4).

Для всех обнаруженных частиц самородного кобальта были получены картины дифракции на отражение с использованием детектора EBSD. Наиболее отчетливую картину удалось получить для небольшой, около 3 мкм длиной, частицы, вытянутой вдоль трещины (рис. 5). Обработка и поиск по структурным базам, выполненные в программе AZtecCrystal, подтвердили металлическое (самородное) состояние кобальтовой частицы с удовлетворительным фактором достоверности – средним угловым отклонением $CUO = 0.96$, значение которого менее 1.0 считается показателем качественно диагностированной структуры. Обнаруженная фаза оказалась гексагональной α -модификацией кобальта (рис. 6), устойчивой до температуры 427°C , выше которой происходит полиморфный переход в кубическую β -модификацию, стабильную вплоть до температуры плавления металла при 1495°C .

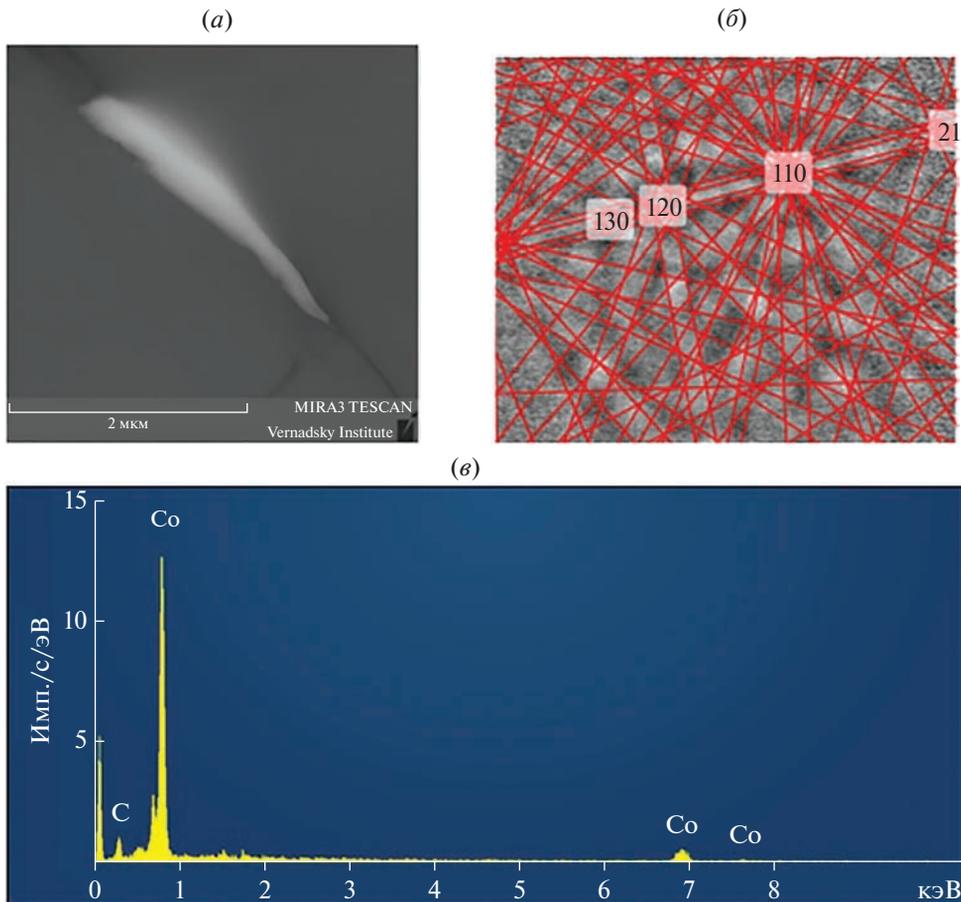


Рис. 5. Частица самородного кобальта (а), дифракционная картина на отражение (б) и ЭД-спектр (в).
Fig. 5. Particle of native cobalt (a), diffraction picture on reflection (b) and its ED-spectrum (c).

Дифракционные картины от остальных частиц имели похожий набор полос, что указывает на одинаковую для них всех кристаллографическую ориентацию. Однако их качество было хуже, и программная обработка не была столь успешной. Таким образом, найденные частицы однозначно диагностируются как металлический кобальт.

Дифракционные картины от основной силикатной фазы аншлифа (рис. 7) однозначно интерпретируются с $СУО = 0.18$ как роговая обманка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отличие от восстановленных фаз на основе железа и никеля, сравнительно широко представленных как в земных (Logand, Pinet et al., 1983; Challis, 1975; Новгородова, 1994), так и в космогенных (Юдин, 1987; Ниа, 1995; Иванов и др., 2019) объектах, их аналоги на основе кобальта встречаются значительно реже. В настоящее время достоверно известно об обнаружении самородного кобальта на Луне (Мохов и др., 2020). На Земле описывались всего две металлических фазы с высоким содержанием кобальта – самородный кобальт (Новгородова, 1983) и более распространенный вайраунит $CoFe$ (Chal-

Описание	
Имя:	Co
Ссылка:	Fiz. Met. Metalloved. [FMMТАК], (1968), Т. 26, страницы 140–143
Структура	
Кристаллическая система:	Hexagonal - High
Группа Лауэ:	9(6/mmm)
Пространственная группа:	194 (P 6 ₃ /m m c)
Элементарная ячейка	
a [Å]:	2.506
b [Å]:	2.506
c [Å]:	4.069
Альфа [°]:	90
Бета [°]:	90
Гамма [°]:	120
База данных	
База данных:	Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)
Изнач. ввод БД:	ICSD[52935]
Семейство баз данных:	228
Лучшее из семейства БД:	True
Состав:	
Co = 100 %	

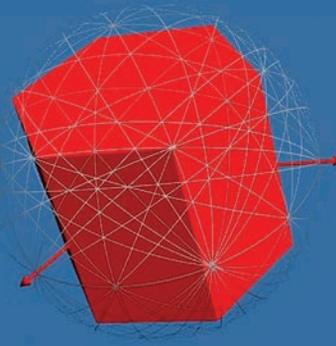


Рис. 6. Результат автоматической диагностики фазы по дифракционной картине самородного кобальта.

Fig. 6. Result of automatic diagnostics of the phase by the diffraction picture of native cobalt.

lis, Long, 1964; Lorand, Pinet et al., 1983). В природных условиях на Земле эффективная дифференциация никеля, кобальта и железа осуществляется лишь в относительно низкотемпературных условиях при участии водных флюидов и даже атмосферного кислорода (Challis, 1975; Новгородова, 1983, 1994). Таким образом, практически все находки металлических фаз на основе кобальта на Земле связаны с гидротермальными процессами в ходе серпентинизации гипербазитовых массивов и взаимодействием хромитов с восстановленными глубинными флюидами.

Амфиболит с глубины 9630 м из СГ-3 представляет собой мелкозернистую меланократовую горную породу, сложенную главным образом роговой обманкой (табл. 1, ан. 1) отвечающей магнезио-ферри-горнблендиту по классификации (Leake et al., 2004). В подчиненных количествах в состав породы входят биотит (табл. 1 ан. 2), плагиоклаз (альбит с содержанием CaO менее 0.6 мас. %), переходный к омфациту жадеит (табл. 1 ан. 4) и интерстициальный (очевидно, наложенный) кварц. Порода несет разнообразную полиметаллическую (Cu, Zn, Pb), благороднометалльную (Au, Ag, Pd, Pt) и редкометалльную (Bi, Te, Sb) акцессорную минерализацию (Лобанов и др., 2021б).

В амфиболит заключен изометричный макроскопически мономинеральный кластер размером 3 × 5 мм, сложенный среднезернистым клинопироксеном, состав которого отвечает низкокальциевому авгиту (табл. 1, ан. 5), переходному к пижониту. По межзерновым границам этот клинопироксен корродирован магнезиальным биотитом. Состав последнего (табл. 1, ан. 3) практически идентичен составу биотита из вмещающего амфи-

Описание	
Имя:	Hornblende
Ссылка:	American Mineralogist, (1989), Т. 74, страницы 1097–1105
Структура	
Кристаллическая система:	Monoclinic
Группа Лауэ:	2 (2/m)
Пространственная группа:	12 (C 2/m)
Элементарная ячейка	
a [Å]:	9.829
b [Å]:	18.060
c [Å]:	5.304
Альфа [°]:	90
Бета [°]:	104.7
Гамма [°]:	90
База данных	
База данных:	American Mineralogist (AM)
Изнач. ввод БД:	
Семейство баз данных:	419
Лучшее из семейства БД:	True
Состав:	
O = 61%, Na = 1%, Mg = 9%, Al = 3%, Si = 18%, Ca = 4%, Fe = 4%	

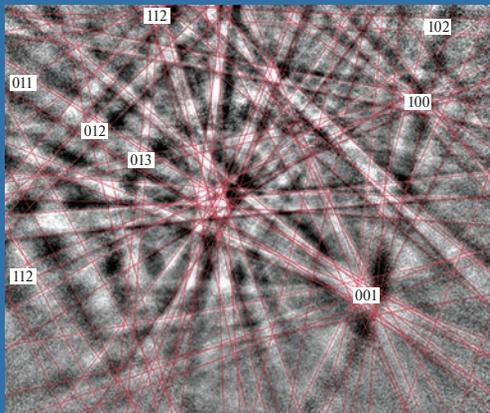


Рис. 7. Результат автоматической диагностики фазы по дифракционной картине от силикатной матрицы шлифа с частицами кобальта.

Fig. 7. Result of automatic diagnostics of the phase by the diffraction picture from the main silicate phase in thin section with cobalt particles.

болита, отличаясь лишь несколько повышенной железистостью. Вероятно, и это авгитовое включение, и амфиболитовая матрица подверглись биотитизации одновременно на этапе ретроградного метаморфизма. От вмещающей породы авгитовый фрагмент отличается бедным составом акцессорной минерализации. Она представлена фторапатитом и цирконом, составы которых близки к идеальным, ильменитом состава $(\text{Fe}_{0.93}\text{Mn}_{0.06}\text{Mg}_{0.01})\text{TiO}_3$ и одиночным микроскопическим зерном сульфида состава $(\text{Fe}_{0.82}\text{Cu}_{0.10}\text{Ni}_{0.08})_{1.00}\text{S}_{1.10}$ (пирротин или макинавит – единственная Ni-содержащая фаза во всем изученном образце амфиболита). Именно в краевой части этого авгитового нодуля и были вскрыты включения самородного кобальта.

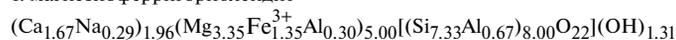
По опубликованным данным (Минералы, 1981), низкокальциевый авгит такого состава образуется при повышенных температурах в закалочных условиях и характерен для мегакристов основных и, реже, средних эффузивов. С учетом сказанного, можно предполагать, что прослой амфиболитов с глубины 9630 м возник в результате метаморфизма эффузивно-осадочной толщи основного состава, сложенной фрагментами пород разного размера. При метаморфизме материала песчаной размерности образо-

Таблица 1. Усредненный химический состав породообразующих силикатов амфиболита
Table 1. Averaged chemical composition of rock-forming silicates in the amphibolites (*n* – number of analyses)

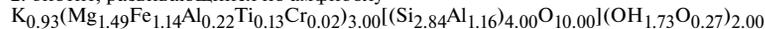
Номер анализа	Амфибол	Слюды		Пироксены	
	1	2	3	4	5
SiO ₂	51.80	37.50	37.04	57.19	51.97
TiO ₂	н.о.	2.28	2.07	н.о.	0.35
Al ₂ O ₃	5.82	15.46	14.77	15.77	4.98
Cr ₂ O ₃	н.о.	0.33	н.о.	н.о.	н.о.
MgO	15.88	13.20	12.03	4.22	14.31
CaO	11.01	н.о.	н.о.	5.87	13.18
MnO	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.31
FeO	11.41	18.00	20.36	4.44	13.70
Na ₂ O	1.06	н.о.	н.о.	11.50	0.69
K ₂ O	н.о.	9.62	10.09	н.о.	0.21
Сумма	96.98	96.39	96.39	98.99	99.70
Число анализов	11	7	3	5	7

Примечание. Фтор во всех анализах не обнаружен. Результаты расчета формул минералов катионным методом (анализ 1 на 12 катионов, анализ 2 на 7 катионов, анализы 3 и 4 на 4 катиона):

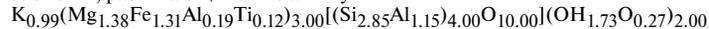
1. магнезиоферригорнблендит



2. биотит, развивающийся по амфиболу



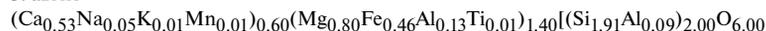
3. биотит, развивающийся по авгиту



4. жадеит



5. авгит



вался основной объем амфиболитовой матрицы, а авгитовый кристаллокласт остался неизменным, сохранив внутри себя исходный набор аксессуарных фаз. В дальнейшем при ретроградном метаморфизме (биотитизации) и гидротермальной переработке амфиболитовой толщи авгитовый кластер сохранил свою целостность и непроницаемость для флюидов, о чем говорит разительное отличие в наборах аксессуарной минерализации между авгитовым нодулом и амфиболитовой матрицей.

Таким образом, обнаруженный нами самородный кобальт, вероятно, относится к ранним высокотемпературным фазам древнего протерозойско-архейского основного вулканизма (данный прослой амфиболитов датируется возрастом 2.4 млрд лет – раннекарельской эрой). Благодаря своему инертному к агентам метаморфизма составу и несовершенной спайности авгитовый кластер сохранил самородный кобальт от контакта с агрессивными флюидами и позднейших трансформаций. Трудно сказать, в ходе какого процесса происходило столь глубокое фракционирование кобальта от никеля и железа в протерозойско-архейской коре, однако можно утверждать, что его частицы были захвачены уже в твердом состоянии (температура плавления металлического кобальта составляет 1495°C) краевой зоной растущего из магматического расплава кристалла авгита. Таким образом, самородный кобальт является одной из наиболее ранних минеральных фаз изученного амфиболита.

Подчеркивая важность сделанной находки, следует заметить, что впервые индивидуальности самородного кобальта обнаружены на Земле не в протолочных пробах или при по-

лировке аншлифа абразивами, а вырезаны пучком ионов из целостной, механически не поврежденной и химически не измененной силикатной матрицы. Факт их вскрытия из-под поверхности аншлифа ионными пучками исключает возможность контаминации образца техногенным материалом. При этом надо учитывать, что при разработке и создании бурового оборудования для сверхглубокого бурения конструкторами были осуществлены специальные мероприятия по недопущению техногенного воздействия и сохранению керна. В частности, было снижено давление на забой бурового инструмента, понижена до 100–200 об./мин скорость вращения коронки, осуществлено дополнительное охлаждение омывающего ее бурового раствора, состоящего из водной эмульсии глинистых минералов с добавлением барита и органических компонентов (Повалихин, 2020). Максимальная температура в скважине достигала 250°C градусов, а оцениваемая температура коронки, согласно технологической документации СГ-3, не превышала 1000°C. Таким образом, расплавления кобальта, возможно, присутствовавшего в буровой коронке, произойти не могло. Возможность загрязнения путем проникновения компонентов бурового раствора и фрагментов буровых инструментов при проходке СГ-3 по трещинам подробно рассматривалось в работе (Казанский и др., 1989). Авторы привели список возможных контаминантов, в котором кобальт отсутствует.

Следует подчеркнуть и факт единой кристаллографической ориентации всей группы обнаруженных частиц кобальта. Это означает, что мы имеем дело с единым дендритовым скелетным монокристаллом, а не с группой произвольно ориентированных зерен. Происхождение микротрещины, вмещающей агрегат кобальта, эпигенетическое и связано с разгрузочным эффектом при извлечении образца с глубины, что обусловлено различиями коэффициентов термического расширения металла и силиката. Более того, изначально данная микротрещина не выходила не только на поверхность керна, но даже на механически полированную поверхность шлифа. Поэтому неудивительно, что данная трещина не содержит никаких следов проникновения в нее бурового раствора (несущего частицы глинистых минералов, барита и продуктов абразивного разрушения буровой коронки) или полировочного шлама, возникающего при изготовлении аншлифа. Таким образом, можно исключить вероятность попадания частиц постороннего кобальта в трещину образца.

Более ранние находки самородного кобальта на Земле не отличаются подобной степенью достоверности. Впервые в природных условиях металлический кобальт был найден в протоlochках золотосодержащих тальк-хлоритовых сланцев Айдырлинского района на Южном Урале (Новгородова, 1983). Самородный кобальт был здесь установлен в виде полиминеральных агрегатов, сложенных щюйсунитом (WC), оксидами титана (рутилом, анатазом, брукитом), кварцем, мусковитом-2M₁ и графитом. В тех же протоlochных пробах отмечался и вайраут CoFe. Предполагалось, что восстановленные высококобальтовые фазы образовались в ходе относительно низкотемпературных процессов серпентинизации и гидротермальной переработки гипербазитов. Однако тесная ассоциация уральского самородного кобальта с карбидом вольфрама может объясняться засорением проб (в особенности, если они были кернавые) буровым шламом от бурения твердосплавными коронками. Дело в том, что распространенные композитные твердосплавные материалы на основе дисперсного карбида вольфрама, сцементированного матрицей из металлического Co, широко используются для изготовления буровых коронок во всем мире с начала XX в. В СССР такой твердый сплав был широко известен как “победит”, что вносит элемент сомнения в природное происхождение этого кобальта.

То же самое можно сказать и о последующих находках самородного кобальта, описанных в литературе (Yang et al., 2015). Авторы выделяли ультра-тяжелые фракции из больших протоlochных проб массивных хромитов массива Рай-Из на Полярном Урале. Самородный кобальт в этих концентратах ассоциировал с большим набором самородных металлов, интерметаллидов, карбидов, алмазом и все тем же щюйсунитом. Проба

хромитов была отобрана на старом разведочном хромитовом карьере. Шпур для отпалки карьерных уступов бурились с применением твердосплавных буровых коронок. В результате взрывов буровой шлам, содержащий фрагменты “победита”, мог загрязнить частицами металлического кобальта и карбида вольфрама не только впадину карьера, но и окружающие его склоны горного массива (где была отобрана вторая проба). Современные методики лабораторной сепарации минералов вполне способны сконцентрировать рассеянные примеси таких плотных веществ как металлический кобальт (8.9 г/см^3) и карбид вольфрама (15.7 г/см^3) даже при ничтожных их содержаниях на поверхности породы.

Сходные результаты были получены китайскими исследователями при изучении концентратов из протолочных проб хромитов массива Луобуса в Тибете (Robinson et al., 2004; Xu et al., 2009). Ими был опубликован сходный список самородных металлов, интерметаллидов и карбидов, включая и цюйсунит. Собственно, и в статье с первым описанием цюйсунита (Zhang et al., 1986) приведены микроснимки, где кристаллы карбида вольфрама погружены в кобальтовую матрицу и полностью повторяют рисунок распределения фаз в “победите”.

ВЫВОДЫ

Впервые в метаморфических породах на глубинных горизонтах (в зоне разлома на глубине 9630 м) Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) обнаружен самородный кобальт. Этот минерал, очевидно, образовался на высокотемпературном этапе, не только до их гидротермальной переработки, но, вероятно, и задолго до образования вулканогенно-осадочного протолита этих пород.

Высоколокальные методы аналитической электронной микроскопии с использованием дифракции на отражение и методов пробоподготовки с травлением и полировкой препаратов ионными пучками доказали свою эффективность в поиске и диагностике субмикронных уникальных минеральных фаз и подтвердили природное происхождение самородного кобальта.

В связи с вышесказанным, данная находка самородного кобальта приобретает особое значение для подтверждения статуса этого минерала.

Авторы выражают благодарность к. ф.-м. н. М.В. Лукашовой за помощь в подготовке и проведении исследований. Работа выполнена за счет госбюджетных средств по госзаданию ГЕОХИ РАН в рамках темы “Новые комплексные подходы к фундаментальной проблеме изучения химического состава, трансформации и миграции наночастиц и легкоподвижных форм элементов в окружающей среде”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов А.В., Ярошевский А.А., Иванова М.А. Минералы метеоритов – новый каталог // Геохимия. **2019**. Т. 64. № 8. С. 869–932.

Казанский В.И., Новгородова М.И., Смирнов Ю.П., Бронихин В.А. Необычные минеральные ассоциации на нижних горизонтах Кольской сверхглубокой скважины // Геология рудн. месторожд. **1989**. № 6. С. 75–82.

Козловский Е.А., Губерман Д.М., Казанский В.И. Рудоносность глубинных зон древней континентальной земной коры // Советская геология. **1988**. № 9. С. 3–11.

Лобанов К.В., Чичеров М.В., Чижова И.А., Горностаева Т.А., Шаров Н.В. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (арктическая зона России) // Арктика: экономика и экология. **2019**. № 3. С. 107–122.

Лобанов К.В., Чичеров М.В., Шаров Н.В. Пятидесятилетняя годовщина начала бурения Кольской сверхглубокой скважины // Арктика и Север. **2021a**. № 44. С. 267–284.

Лобанов К.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Мохов А.В., Чичеров М.В. Проявление палладиевой минерализации на глубинных горизонтах Кольской сверхглубокой скважины // Докл. РАН. **2021b**. Т. 499. № 2. С. 26–31.

Минералы. Справочник под редакцией Ф.В. Чухрова, М.: Наука, 1981. Т. III. Вып. 2. С. 283–300.

Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Рыбчук А.П., Богатиков О.А. Самородный кобальт из реголита Моря Кризисов // Докл. РАН. 2020. Т. 491. № 2. С. 42–45.

Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. 1983. М.: Наука, 288 с.

Новгородова М.И. Кристаллохимия самородных металлов и природных интерметаллических соединений // Итоги науки и техники. Сер. Кристаллохимия. 1994. Т. 29. С. 156.

Повалихин А.С. 50 лет научному прорыву в исследовании Земли. Кольская сверхглубокая скважина: путь к энергетическому и сырьевому обеспечению человечества // Инженер-нефтяник. 2020. №. 1. С. 5.

Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов // Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 200 с.

Native Cobalt in Deep Levels of the Kola Superdeep Borehole

T. A. Gornostaeva^{a, *}, A. V. Mokhov^a,
P. M. Kartashov^a, and K. V. Lobanov^b

^aInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

^bVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia

*e-mail: tagorn8@mail.ru

Native cobalt was found in amphibolite of the Kola ultra-deep borehole (SG-3) from a depth of 9630 m by a complex of local analytical methods (analytical scanning electron microscopy, EBSD). The studied amphibolite is a fine-grained melanocratic rock composed mainly of magnesio-ferri-hornblende and containing accessory native-metal, telluride, sulphotelluride and sulphide (Au, Ag, Pd, Bi, Cu, Pb, Zn, Sb, Fe) mineralization. It includes a clinopyroxene xenoclast which poor in sulphides and including native cobalt. The absence of any significant impurity in native cobalt and its belonging to the hexagonal α -modification was determined. Native cobalt was formed probably before both the stage of retrograde metamorphism with the hydrothermal alteration of amphibolite and the formation of the volcano-sedimentary protolith of this rock. Native cobalt probably belongs to the early high-temperature mineral phases inherited from the older Proterozoic-Archean basic volcanism, while the time of formation of this layer of amphibolites is 2.4 billion years.

Keywords: Kola ultra-deep borehole, SG-3, native cobalt, analytical electron microscopy, SEM, EDS, FIB, EBSD

REFERENCES

- Challis G.A., Long J.V.P. Wairauite, a new cobalt-iron mineral. *Miner. Mag.* **1964**. Vol. 33. P. 9423948.
- Challis G.A. Native nickel from the Jerry River, South Westland, New Zealand: An example of natural refining. *Miner. Mag.* **1975**. Vol. 40. P. 247–251.
- Hua X., Eisenhour D.D., Buseck P.R. Cobalt-rich, nickel-poor (wairauite) in the Ningqiang chondrite. *Meteoritics.* **1995**. Vol. 30. N 1. P. 106–109.
- Ivanov A.V., Yaroshevskiy A.A., Ivanova M.A. Meteorite minerals. *Geochem. Int.* **2019**. Vol. 57. N 8. P. 931–939.
- Kazansky V.I., Novgorodova M.I., Smirnov Yu.P., Boronikhin V.A. Unusual mineral assemblages in the lower horizons of the Kola ultra-deep well. *Geol. Ore Deposits.* **1989**. N 6. P. 75–82 (in Russian).
- Kozlovsky E.A., Guberman D.M., Kazansky V.I. Ore-bearing of deep zones of the ancient continental crust. *Soviet Geol.* **1988**. N 9. P. 3–11 (in Russian).
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *Amer. Miner.* **2004**. Vol. 89. P. 883–887.
- Lobanov K.V., Chicherov M.V., Chizhova I.A., Gornostaeva T.A., Sharov N.V. Deep structure and ore-forming systems of the Pechengsky ore district (Arctic zone of Russia). *Arctic: Economics and Ecology.* **2019**. N 3. P. 107–122 (in Russian).
- Lobanov K.V., Chicherov M.V., Sharov N.V. Fiftieth anniversary of the beginning of drilling of the Kola ultra-deep well. *Arctic and North.* **2021a**. N 44. P. 267–284 (in Russian).

Lobanov K.V., Gornostaeva T.A., Kartashov P.M., Mokhov A.V., Chicherov M.V. Occurrence of palladium mineralization at the deep horizons of the Kola superdeep borehole. *Doklady Earth Sci.* **2021b**. Vol. 499. N 2. P. 623–627.

Lorand J.P., Pinet M. Sur la présence de fer natif et de wairauite (FeCo) dans les périodites serpentinisées du massif ultramafique de Ronda (Cordillère Bétique; Espagne du Sud). *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique-physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre.* **1983**. Vol. 297. N 6. P. 501–504.

Minerals. Handbook edited by F.V. Chukhrov. Moscow: Nauka, **1981**. Vol. III. Is. 2. P. 283–300 (in Russian).

Mokhov A.V., Gornostaeva T.A., Kartashov P.M., Rybchuk A.P., Bogatkov O.A. Native cobalt from the regolith of Mare Crisium. *Doklady Earth Sci.* **2020**. Vol. 491. N 2. P. 224–226.

Novgorodova M.I. Native metals in hydrothermal ores. Moscow: Nauka, **1983**. 288 p. (in Russian).

Novgorodova M.I. Crystal chemistry of native metals and natural intermetallic compounds. *Results Sci. Technol. Crystal Chemistry Ser.* **1994**. Vol. 29. P. 156 (in Russian).

Povalikhin A.S. 50 years of scientific breakthrough in the study of the Earth. Kola ultra-deep well: the way to energy and raw materials supply of mankind. *An Oil Engineer.* **2020**. N 1. P. 5 (in Russian).

Robinson P.T., Bai W., Malpas J., Yang J.S., Zhou M.F., Fang Q.S., Hu X.F., Cameron S., Staudigel H. Ultra-high pressure minerals in the Luobusa Ophiolite, Tibet, and their tectonic implications. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* **2004**. Vol. 226. N 1. P. 247–271.

Xu X., Yang J., Chen S., Fang Q., Bai W., Ba D. Unusual mantle mineral group from chromite ore-body Cr-11 in Luobusa ophiolite of Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet. *J. Earth Sci.* **2009**. Vol. 20. N 2. P. 284–302.

Yang J., Meng F., Xu X., Robinson P.T., Dilek Y., Makeyev A.B., Wirth R., Wiedenbeck M., Cliff J. Diamonds, native elements and alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals. *Gondwana Res.* **2015**. Vol. 27. N 2. P. 459–485.

Yudin I.A., Kolomenskiy V.D. Mineralogy of meteorites. Sverdlovsk: USSR Academy Sci., **1987**. 200 p.

Zhang J.H., Yang G.J., Li Z.H. Discovery of natural tungsten carbide (WC) in China. *Chinese Sci. Bull.* **1986**. Vol. 6. P. 344–349.

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

ТИПОМОРФИЗМ АУТИГЕННОГО ЗОЛОТА РИФЕЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ КЫВВОЖСКОГО ЗОЛОТОРОССЫПНОГО ПОЛЯ (ВОЛЬСКО-ВЫМСКАЯ ГРЯДА, СРЕДНИЙ ТИМАН)

© 2022 г. Д. чл. М. Ю. Сокерин^{1, *}, д. чл. Ю. В. Глухов^{1, **}, д. чл. Б. А. Макеев^{1, ***},
К. Г. Пархачева^{1, ****}, В. А. Салдин^{1, *****},
д. чл. Ю. С. Симакова^{1, *****}, д. чл. Н. В. Сокерина^{1, *****}

¹Институт геологии им. акад. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ Уральского отделения РАН,
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

*e-mail: m_sokerin@mail.ru

**e-mail: glukhov@geo.komisc.ru

***e-mail: makboris@mail.ru

****e-mail: ksparhacheva@yandex.ru

*****e-mail: litgeo@komisc.ru

*****e-mail: yssimakova@rambler.ru

*****e-mail: sokerina@geo.komisc.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 07.07.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

Приводятся результаты комплексного исследования морфологии, состава и внутреннего строения тонкого аутигенного золота, впервые обнаруженного в коренных породах на площади Кыввожского золотороссыпного поля. Оно имеет сложные специфические округло-комковатые, комковато-ветвистые агрегатные формы и гладкую без следов механического воздействия ростовую поверхность. Как показали рентгенографические исследования, для дебаеграмм аутигенного золота характерны рефлексы в виде штриховых колец. По мнению авторов, это свидетельствует об отсутствии у изученного аутигенного золота экзогенных деформаций. Внутреннее строение золотин характеризуется наличием однородной области, окруженной тонкой (~1 мкм), обогащенной серебром низкопробной каймой. Все частицы изученного золота имеют примерно одинаковую среднюю пробность (899–918 ‰). В качестве механизма образования обнаруженного аутигенного золота предполагается его кристаллизация путем заполнения свободного пространства вмещающих песчаников. Его присутствие в рифейских породах рассматривается в качестве индикатора формирования первичного ореола рассеяния и является прямым поисковым признаком развития потенциально продуктивного золотого оруденения в этой части Среднего Тимана.

Ключевые слова: аутигенное золото, Средний Тиман, Вольско-Вымская гряда

DOI: 10.31857/S0869605522060065, **EDN:** DGMLVT

Россыпная золотоносность центральной части Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана была выявлена в 80-х годах прошлого века (Дудар, 1996; Плякин и др., 2012). Открытие россыпей на ручьях Кыввож, Средний Кыввож и Димтемьель – левых притоков р. Белая Кедва – позволило объединить их в составе Кыввожского золотороссыпного поля. Основная часть россыпного золота сконцентрирована в трещиноватой

кровле пород среднерифейского сланцевого комплекса и пойменно-руслowych приплотиковых псефитах. Присутствие в россыпях крупного неокатанного самородного золота и его сростков с кварцем рассматривались предшественниками как показатель близости коренного оруденения гидротермально-метаморфогенной золото-кварцевой или золото-кварц-сульфидной формации (Глухов и др., 2018). Однако неоднократно предпринимавшиеся поиски коренных источников россыпей успеха не имели.

Нами в одной из протолочных проб кварцевых песчаников удалось выделить 23 знака тонкого самородного золота рудного облика, не имеющего следов окатывания. Это первая находка коренного золота на площади Кыввожского золотороссыпного поля. Задачей настоящего исследования стало изучение типоморфных свойств найденного самородного золота и определение его генезиса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал для исследований был отобран из борздовых проб при документации траншеи, пройденной на стадии разведки Среднекыввожской россыпи. Образцы самородного золота были выделены из раздробленной до 0.5 мм пробы кварцевых песчаников весом 19 кг.

Химический состав пород изучался силикатным анализом на 14 компонентов, минеральный – методами оптической и электронной микроскопии. Содержание Au в породе определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Нижний предел обнаружения металла составил 2 мг/т. Фазовый состав глинистой фракции определялся по дифрактограммам ориентированных образцов, подвергнутых стандартным диагностическим обработкам. Исследовались дифракционные кривые воздушно-сухих и насыщенных этиленгликолем препаратов. Съемка проводилась на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000, излучение $\text{CuK}\alpha$, Ni фильтр, 30 kV, 20 mA. Структурные характеристики золота регистрировались фотометрическим методом в камере Дебая-Шеррера (РКД) с диаметром 57.3 мм на аппарате АРОС с рентгеновской трубкой с железным анодом, ток 10 mA, напряжение 30 kV, фильтрование не проводилось. Изучение поверхности, внутреннего строения и состава частиц золота проводилась при помощи растрового электронного микроскопа Tescan VEGA 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 (рабочее напряжение 20 kV, напыление углеродом). Структурное травление приполированных образцов самородного золота производилось царской водкой.

Материал обрабатывался и исследовался на базе Центра коллективного пользования “Геонаука” в Институте геологии им. академика Н.П. Юшкина, определение содержания Au в породе – в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Кыввожское золотороссыпное поле расположено на восточном склоне Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана. В структурном плане оно приурочено к центральной части Вымского блока Тиманского складчато-надвигового сооружения, сложенного терригенными породами покьюской, лунвожской и кыввожской свит среднерифейского возраста. Свиты в пределах поля характеризуются близким литологическим составом (серицит-кварц-хлоритовые, кварц-серицит-хлоритовые углеродсодержащие алевросланцы и алевропесчаники с редкими слоями кварцевых песчаников) и различаются по количественному соотношению этих литотипов в различных интервалах разреза и текстурно-структурным особенностям. Залегание пород осложнено мелкоамплитудной складчатостью, послонными срывами, взбросами и крутопадающими разрывными нарушениями. Последние контролируют участки катаклаза, брекчирования, сопровождаемые серицитизацией и каолинизацией пород, окварцеванием,

Таблица 1. Химический состав кварцевых песчаников, мас. %
Table 1. Chemical composition of quartz sandstones, wt %

Компонент	5310-9-6	5310-9-7	5310-9-8
SiO ₂	80.12	81.00	93.80
TiO ₂	0.42	0.60	0.20
Al ₂ O ₃	12.26	10.19	3.52
Fe ₂ O ₃	0.05	2.42	0.62
FeO	0.34	0.25	0.20
MnO	0.01	0.03	0.01
MgO	0.16	0.16	0.10
CaO	0.12	0.46	0.35
Na ₂ O	0.14	0.28	0.10
K ₂ O	1.19	2.08	0.73
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.02
п.п.п.	3.6	2.69	0.86
Сумма	98.48	100.21	100.51
H ₂ O ⁻	0.59	0.36	0.24
CO ₂	0.10	0.10	0.10

Примечание. Обр. 5310-9-6 – тектоническая брекчия кварцевых песчаников в каолинит-гидрослюдистом заполнителе; обр. 5310-9-7 – катаклазированный золотосодержащий кварцевый песчаник; обр. 5310-9-8 – массивный кварцевый песчаник.

вкрапленной пиритизацией и развитием кварцевой и кварц-карбонатной жильной минерализации.

Траншеей, пройденной вкрест простирания пород и вскрывшей слой золотосодержащих песчаников, обнажен тектонический контакт темно-серых тонкоплитчатых серицит-кварц-хлоритовых алевросланцев и светло-серых массивных кварцевых песчаников лунвожской свиты. Породы в области контакта, представляющего собой крутопадающий взброс, интенсивно изменены. Алевросланцы на расстоянии метра от контакта превращены в пестро окрашенную ржаво-бурую дресвяно-щебнисто-глинистую, пропитанную рентгеноаморфными соединениями железа породу, песчаники – в брекчию с глинистым заполнителем того же цвета, постепенно сменяющуюся через 0.6 м интервалом катаклазитов мощностью 0.8 м. К концу этого интервала интенсивность катаклаза в песчаниках уменьшается, и порода приобретает массивный облик. Видимая мощность песчаников, вскрытых траншеей, составляет 7 м.

Изменения в химическом составе песчаников в направлении от массивных к брекчиям наиболее контрастно выражены в увеличении содержания глинозема (табл. 1). Пересчеты данных химических анализов на нормативный минеральный состав (табл. 2), результаты рентгеноструктурного анализа фазового состава глинистых минералов (Симакова и др., 2021), изучение шлифов и микронзондовые исследования объясняют эту тенденцию интенсивным развитием каолинита и иллита в брекчированных и катаклазированных разновидностях песчаников.

Валовое содержание золота в алевросланцах, вскрытых траншеей, изменяется от 2 мг/т в неизменных разновидностях до 7 мг/т в приконтактной зоне дезинтеграции. Концентрация металла в брекчированных песчаниках (пр. 5310-9-6) составила 9 мг/т, в катаклазированных (пр. 5310-9-7) и в массивных (пр. 5310-9-8) – 5 мг/т. Самородное золото удалось выделить только из пробы катаклазированных кварцевых песчаников. Указанные содержания несколько выше регионального фона для пород лунвожской

Таблица 2. Нормативный минеральный состав кварцевых песчаников, мас. %
Table 2. Normative mineral composition of quartz sandstones, wt %

Минерал	5310-9-6	5310-9-7	5310-9-8
Кварц	63.5	66.9	88.6
Кальцит	0.2	0.2	0.2
Апатит	0	0	0
Рутил*	0.4	0.6	0.2
Лимонит*	0.4	2.2	0.6
Каолинит	19.5	8.3	1.9
Мусковит*	6.2	13.1	3.9
Альбит	1.1	2.6	1.1
Калиевый полевой шпат	2.8	2.3	1.7
Хлорит	0.4	0.7	0.6

Примечание. Рутил* – оксиды титана Ti, лимонит – оксиды и гидроксиды Fe, мусковит* – мусковит и иллит.

свиты, не превышающего 1 мг/т. Повышенные (до 16 мг/т) содержания золота на площади Кыввожского золотороссыпного поля были зафиксированы в единичных пробах из трещиноватых кварцевых песчаников и зон пиритизации в алевросланцах, отобранных из береговых обнажений. Однако самородное золото из них выделить или не удавалось, или оно оказывалось окатанным – просевшим в породу из россыпей. Аналогично отрицательными оказались результаты опробования жильной минерализации.

Необходимо отметить, что факт находки самородного золота на интервале с не самым “высоким” его содержанием носит случайный характер, обусловленный сложностью гравитационного обогащения проб со столь мелким золотом.

Золотосодержащие песчаники мелко- среднезернистые, хорошо сортированные с преобладающим регенерационным кварцевым, реже с плеченым гидрослюдистым цементом. В качестве минеральной примеси кроме аллотигенных рутила и циркона встречаются чешуйки хлорита, белые округлые или неправильной формы зерна каолинит-иллитового состава, иногда с включениями гётита. Отмечены также тонкая вкрапленность монацита, редкие выделения кальцита, фрамбоидального и кубического пирита и единичные субмикронные зерна галенита. Вторичные изменения выражены в развитии каверн выщелачивания и разориентированных трещин катаклаза, полностью или частично выполненных каолинит-гидрослюдистым, часто лимонитизированным веществом. Отмечены также редкие псевдоморфозы гётита по пириту треугольного, трапецеидального или прямоугольного сечения. Пористость песчаников по результатам изучения шлифов не превышает одного процента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА

Золотины, выделенные из катаклазированных песчаников, имеют облик сложных, специфического вида округло-комковатых, комковато-ветвистых, амёбообразных зерен и агрегатов размером по длинной оси от 0.04 до 0.16 мм, в среднем – 0.10 мм (рис. 1, а–е). Отличительной особенностью морфологии является гладкая, без следов механического воздействия ростовая поверхность. В деталях рельефа золотинок хорошо видны ступенчатые участки индукционной поверхности и отпечатки зерен других минералов. Для аллотигенного делювиального и россыпного золота того же размера на том же участке характерны уплощенные формы, средняя и хорошая окатанность, налёпы и бугорчато-ямчатая, часто пористая с механическими микровключениями

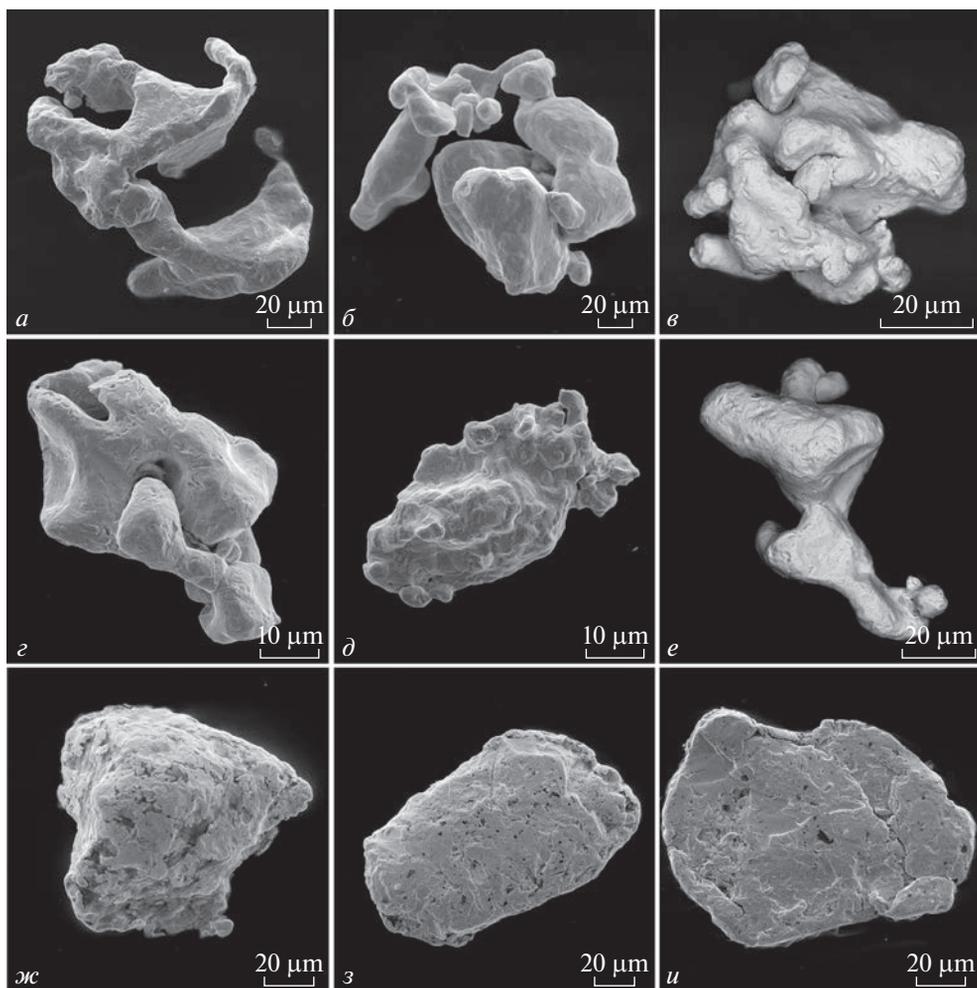


Рис. 1. Типичные формы самородного золота из кварцевых песчаников (*а–е*) и из перекрывающих делювиальных образований (*ж–и*). Изображения в режимах вторичных (*а, б, г, д, ж–и*) и обратно-рассеянных (*в, е*) электронов.

Fig. 1. Typical forms of native gold from quartz sandstones (*a–e*) and overlapping deluvial sediments (*ж–и*). SE (*a, б, г, д, ж–и*) and BSE (*в, е*) images.

кварца поверхность, обусловленные его механическим преобразованием в эрозивно-денудационных процессах (рис. 1, *ж–и*).

Рентгенографические исследования, проведенные по методу Дебая-Шеррера, также выявили существенные отличия золота из песчаников от тонкого аллотигенного золота района. В аллювиальном и делювиальном золоте с характерными следами механических деформаций наблюдается хаотическое распределение микрокристаллитов, устанавливаемое по сплошным кольцам на дебаграммах. Внутреннее строение коренного золота, судя по рефлексам в виде штриховых линий на дебаграммах, характеризуется близкой ориентировкой кристаллитов, что свидетельствует об отсутствии в них механических деформаций.

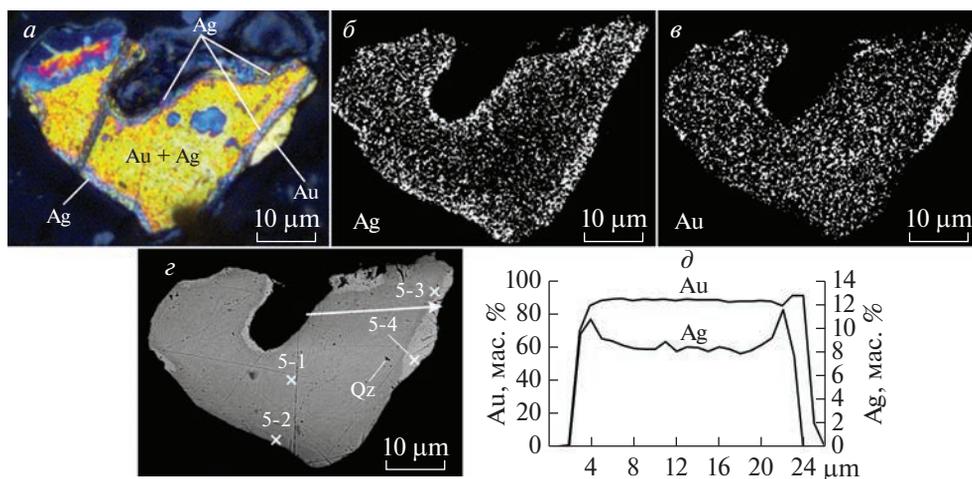


Рис. 2. Внутреннее строение самородного золота.

a – протравленный срез с однородной внутренней областью (Au + Ag), низкопробной каймой (Ag) и выделениями весьма высокопробного золота (Au). Пятна во внутренней области – непротравленные участки под углеродным напылением; *b–d* – распределение Ag (*b*) и Au (*b*) в самородном золоте по площади (*z*) и по профилю (*d*). Номера точек анализа соответствуют приведенным в табл. 3. Изображения в режимах характеристического излучения (*a–e*) и обратно-рассеянных электронов (*z*).

Fig. 2. The internal structure of native gold.

a – etched section with a homogeneous inner area (Au + Ag), a low-grade rim (Ag) and secretions of very high-grade native gold (Au). Spots in the inner area are non-etched areas under carbon coating; *b–d* – distribution of Ag (*b*) and Au (*e*) in native gold by area (*z*) and by profile (*d*). The numbers of the analysis points correspond to those given in the Table 3. Characteristic radiation (*a–e*) and BSE (*z*) images.

По средней пробности, определенной на пришлифованных препаратах, золото из песчаников относится к высокопробному типу (табл. 3). Единственной установленной примесью является серебро. Примечательно, что средняя пробность у всех изученных золотин оказалась примерно одинаковой и локализована в диапазоне 899–918 ‰. Их внутреннее строение характеризуется относительно однородной внутренней областью и контрастирующей по составу низкопробной каймой (рис. 2). Содержание серебра во внутренних областях варьирует в узком интервале значений – от 6 до 9 мас. %. От центра к краю золотин наблюдается сначала плавное, затем резкое увеличение его концентрации до 10–17 мас. % в разных зернах. Содержание серебра в каймах в 1.5–2 раза выше, чем во внутренних областях. Во всех полученных срезах золотин кайма является непрерывной и имеет одинаковую толщину около 1 мкм. Кроме того, на поверхности золотин присутствуют небольшие выделения весьма высокопробного золота толщиной до 5 мкм, имеющие резкую границу с низкопробной областью каймы. Онтогенически эти участки выглядят как поздняя генерация золота, так как нигде не прерывают низкопробную кайму, а нарастают на нее.

Распределение серебра в аллотигенном золоте того же гранулометрического класса существенно отличается от описанного и сопоставимо с ранее полученными результатами для россыпного золота Среднекубвожской россыпи мелкого и среднего классов (Глухов и др., 2018). Для последнего типичными структурами являются однородная с коррозионной высокопробной каймой и зернистая блочно-прожилковая (Глухов и др., 2018) (рис. 3).

Таблица 3. Состав самородного золота из песчаников (мас. %)
Table 3. Composition of native gold from sandstones (wt %)

№ зерна	№ точки анализа	Компоненты			Пробность зерна, ‰
		Ag	Au	Сумма	
2	2-1 Ц	8.17	91.10	99.27	915
	2-2 К	14.26	87.05	101.31	
	2-3 ВВ	н.о.	101.88	101.88	
	2-5 Ц	6.30	92.61	98.91	
	2-6 К	14.70	84.91	99.61	
	2-7 ВВ	н.о.	101.01	101.01	
	3	3-1 Ц	7.43	91.38	
3-2 ВВ		н.о.	101.16	101.16	
3-3 ВВ		0.47	100.07	100.54	
3-4 К		17.43	83.17	100.60	
3-5 ВВ		1.44	101.46	102.90	
3-6 Ц		9.36	88.59	97.95	
3-7 К		14.16	86.35	100.51	
3-8 ВВ		н.о.	100.47	100.47	
4	4-1 Ц	6.33	93.00	99.33	916
	4-4 К	10.26	90.71	100.97	
	4-5 ВВ	н.о.	99.31	99.31	
	4-6 ВВ	н.о.	100.27	100.27	
	4-7 К	16.51	84.15	100.66	
	4-8 Ц	7.83	92.55	100.38	
	4-9 ВВ	н.о.	100.51	100.51	
5	5-1 Ц	6.79	92.72	99.51	918
	5-2 К	14.68	86.06	100.74	
	5-3 К	12.97	87.30	100.27	
	5-4 ВВ	н.о.	100.08	100.08	

Примечание. н.о. – элемент не обнаружен. Место расположения точки анализа на срезе зерна: Ц – внутренняя область, К – низкопробная кайма, ВВ – высокопробное выделение на краю зерна.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного исследования выявили существенные отличия аллотипного золота из аллювиальных и делювиальных отложений Кыввожского золото-россыпного поля.

Присущие для изученного самородного золота сложные округло-комковатые и округло-ветвистые ростовые формы без следов окатанности и огранки, гладкий рельеф поверхности характерны для условий роста в свободном пространстве (Николаева и др., 2015). В нашем случае таким пространством могли быть каверны выщелачивания и открытые трещины катаклаза в песчаниках.

Важное свойство коренного золота было выявлено при проведении рентгенографических исследований. Установлено, что это золото состоит из субориентированных кристаллических индивидов. Россыпное золото района той же крупности, судя по наличию сплошных колец отражений на дебаеграммах, представляет собой агрегат хао-

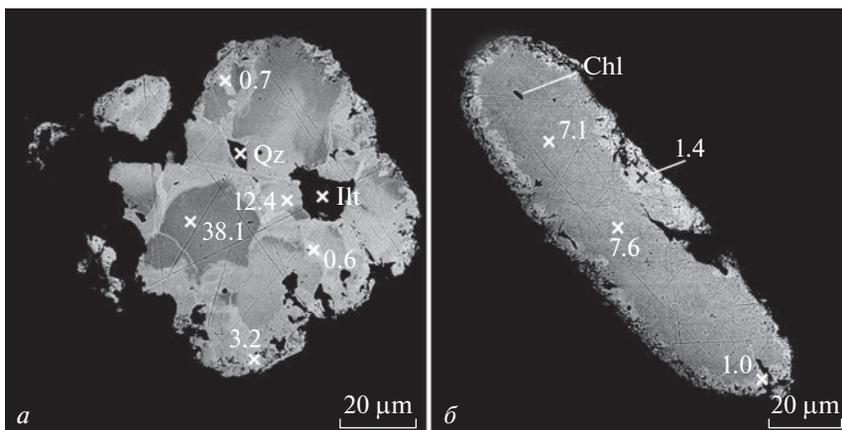


Рис. 3. Внутреннее строение самородного золота из перекрывающихся делювиальных образований.

a – блочно-прожилковая структура (*ж* на рис. 1); *б* – однородная структура пластинчатого выделения с высокопробной коррозионной оболочкой (*з* на рис. 1). Цифрами показаны содержания Ag в мас. % в точках анализа. Ill – иллит, Qz – кварц, Chl – хлорит. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

Fig. 3. The internal structure of native gold from overlapping deluvial sediments.

a – block-veined structure (the same grain in the Fig. 1, *ж*); *б* – homogeneous structure of lamellar grain with a high-grade corrosion rim (the same grain in the Fig. 1, *з*). The numbers show the concentrations of Ag in wt % at the analysis points. Ill – illite, Qz – quartz, Chl – chlorite. BSE images.

тически ориентированных кристаллитов. Эта особенность, по-нашему мнению, возникла в результате экзогенных механических деформаций, “насытивших” его малоугловыми границами. Локализация золота в песчаниках, очевидно, защищает его от интенсивного внешнего механического воздействия. Присутствие выделений высокопробного золота в изученных образцах, нарастающего на низкопробную кайму, свидетельствует о незначительной эпигенетической его модификации в гипергенных условиях.

Еще одной особенностью, отчетливо отличающей золото из рифейских песчаников от россыпного, является характер его распределения по валовому содержанию примесей и средней пробыности. В случае с коренным золотом из песчаников величины уровня содержания примеси Ag и соответствующей средней пробыности практически одни и те же. Россыпное же золото, как видно из результатов его изучения (Глухов, 2018), характеризуется значительно более широким спектром вариации содержания примеси Ag – от весьма высокопробного до умеренно высокопробного.

Таким образом, описанные закономерности доказывают, что исследуемое золото образовалось непосредственно в песчанике, то есть является аутигенным по отношению к вмещающей породе. Однако в отношении определения его генезиса перечисленные типоморфные признаки являются конвергентными. Самородное золото с подобными морфологическими и структурными характеристиками известно как в эндогенных гидротермальных (Николаева и др., 2015) месторождениях, так и в корах выветривания (Калинин и др., 2009). Одними из основных диагностических признаков золота россыпей и кор выветривания являются зернистые, реже гомогенные структуры и наличие высокопробных коррозионных оболочек (Мурзин, Малюгин, 1987; Bowell, 1992; Chapman et al., 2009; Lalomov et al., 2017).

Для аллотигенного золота Кыввожского района характерны однородная и зернистая блочно-прожилковая структура. И в том, и другом случае у золотин с этими типа-

ми внутреннего строения отмечаются высокопробные каймы облагораживания. Образующееся в корях выветривания аутигенное золото отличается, как правило, своим однородным строением и практически беспримесным весьма высокопробным составом (Николаева и др., 2015). Подобные выделения высокопробного золота, нарастающего на низкопробную кайму, присутствуют и в наших образцах, что свидетельствует об их незначительной эпигенетической модификации в гипергенных условиях.

Качественное отличие описанного в литературе аутигенного золота кор выветривания от изученного аутигенного золота из рифейских песчаников отчетливо выражено в присутствии в последнем тонких низкопробных кайм. Аналогичное по строению серебросодержащее золото с низкопробной высокосеребристой каймой было обнаружено в рудах Новобобровского редкометалльно-редкоземельного месторождения на Четласском поднятии Среднего Тимана (Глухов и др., 2017). Содержание Ag в краевой части золотины там оказалось также примерно в 2 раза больше, чем в ее центре. Образование самородного золота с подобной зональностью с большей вероятностью имеет место при кристаллизации из гидротермальных растворов. С учетом данных Р.Дж. Чапмена (Charman et al., 2021), возникновение низкопробных высокосеребристых составов (в том числе и кайм) происходит в гипогенных условиях при снижении температуры, увеличении щелочности и активности сероводорода. Другой механизм образования высокосеребристых кайм на поверхности эндогенного золота, связанный с большей подвижностью Ag в твердых Au-Ag растворах, описан Л.А. Николаевой с соавторами (Николаева и др., 2015).

Изложенные данные дают основание предполагать, что выявленное в рифейских песчаниках аутигенное золото изначально имело эндогенную природу. По характеру выделений и гранулометрическому размеру его можно отнести к золоту первичного ореола рассеяния – прямого поискового признака развития потенциально продуктивного золотого оруденения в этой части Среднего Тимана.

ВЫВОДЫ

Впервые в коренных породах Кыввожского золотороссыпного поля обнаружено самородное золото тонкого гранулометрического класса. Результаты комплексного исследования его типоморфных свойств позволили установить, что оно является аутигенным по отношению к вмещающей породе и, вероятнее всего, имеет эндогенную природу. Изученная золотая минерализация, по сути, представляет собой первичный ореол рассеяния, являясь таким образом прямым поисковым признаком развития потенциально продуктивного золотого оруденения в этой части Среднего Тимана.

Авторы благодарны сотрудникам Сыктывкарского сектора ВСЕГЕИ В.Н. Иванову, Н.А. Васильченко, В.Г. Котельникову, геологам ООО “Ухтагеосервис” В.П. Савельеву, А.Э. Львову, а также сотрудникам Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН С.К. Кузнецову, Р.И. Шайбекову, Г.В. Игнатьеву и Д.А. Шушкову за помощь в проведении экспедиционных работ. Авторы также благодарят сотрудников Института геологии Н.Х. Хачатурян, Т.Н. Бушеневу, Н.Г. Шабанову, З.С. Двойникову (выделение монофракций золота), А.С. Шуйского и Е.М. Тропникова (микророндовый анализ).

Исследования проводились в рамках научной темы № 1021062211108-5-1.5.2, FUUU-2022-0058 Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глухов Ю.В., Кузнецов С.К., Савельев В.П., Котречко Е.Ю. Золото из аллювиальных отложений Среднего Кыввожа (Вольско-Вымская гряда, Тиман) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 1 (33). С. 49–59.

Глухов Ю.В., Удорткина О.В., Филиппов В.Н., Исаенко С.И. Находка самородного аутигенного золота на Новобобровском редкометалльно-редкоземельном рудном поле (Четласский

камень, Средний Тиман) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. **2017**. № 11. С. 22–27.

Дудар В.А. Россыпи Среднего Тимана // Руды и металлы. **1996**. № 4. С. 80–90.

Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В. Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // Геология и геофизика. **2009**. Т. 50. № 3. С. 241–257.

Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В. Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. М.: Акварель, **2015**. 200 с.

Мурзин В.В., Малюгин А.А. Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск: УНЦ АН СССР, **1987**. 96 с.

Плякин А.М., Ершова О.В. Золото Тимана. История открытия и изучения // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. **2012**. № 12. С. 20–22.

Симакова Ю.С., Сокерин М.Ю. Глинистые минералы зоны дезинтеграции в коренном блоке Среднекыввожской золотоносной россыпи // Глины и глинистые минералы – 2021. VII Российская Школа по глинистым минералам “Argilla Studium” и V Российское Совещание по глинам и глинистым минералам “ГЛИНЫ”, посвященные 100-летию со дня рождения Б.Б. Звягина. Мат. докл. М.: ИГЕМ РАН, **2021**. С. 187–188.

Typomorphism of Autigenic Gold in Riphean Sandstones of the Kyyvozhskoye Goldfield (Volsko-Vymskaya Ridge, Middle Timan)

M. Yu. Sokerin^{a, *}, Yu. V. Glukhov^{a, **}, B. A. Makeev^{a, ***}, K. G. Parkhacheva^{a, ****}, V. A. Saldin^{a, *****}, Yu. S. Simakova^{a, *****}, and N. V. Sokerina^{a, *****}

^a Yushkin Institute of Geology, Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch RAS, Syktyvkar, Russia

*e-mail: m_sokerin@mail.ru

**e-mail: glukhov@geo.komisc.ru

***e-mail: makboris@mail.ru

****e-mail: ksparhacheva@yandex.ru

*****e-mail: litgeo@komisc.ru

*****e-mail: yssimakova@rambler.ru

*****e-mail: sokerina@geo.komisc.ru

The results of a comprehensive study of the morphology, composition and the internal structure of fine autigenic gold, first discovered in bedrock on the area of the Kyyvozhskoye goldfield, are presented. It has complex specific rounded-lumpy, lumpy-branched aggregate forms and a smooth growth surface without traces of mechanical wearing. X-ray studies (Debye-Scherrer method) show that reflexes in the form of dashed rings are characteristic of debyeograms of this native gold, which, according to the authors, indicates the absence of exogenous deformations of it. The internal structure of all the studied gold pieces is characterized by a relatively homogeneous inner area and a thin (~1 µm) contrasting enriched with silver low-grade rim. All the particles of the studied native gold have approximately the same average fineness (89–918‰). As a mechanism for the formation of the found autigenic gold, its crystallization is assumed by filling of the free pore space of the host sandstones. Its presence in Riphean rocks is considered as an indicator of the primary dispersion halos and is a direct search sign of the development of potentially productive gold mineralization in this part of the Middle Timan.

Keywords: authigenic gold, Middle Timan, Volsko-Vymskaya ridge

REFERENCES

Bowell R.J. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: Implications for the supergene behaviour of gold. *Miner. Mag.* **1992**. Vol. 56. P. 545–560.

Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B. Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance. *Econ. Geol.* **2009**. Vol. 104. P. 563–585.

Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., Grimshaw M.R., Spence-Jones C.P., Matthews T.J., Borovinskaya O. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies. *Miner. Deposita*. **2021**. Vol. 56. P. 1563–1588.

Dudar V.A. Placers of the Middle Timan. *Ores and Metals*. **1996**. N 4. P. 80–90 (in Russian).

Glukhov Yu.V., Kuznetsov S.K., Savelyev V.P., Kotrechko E.Yu. Gold from alluvial sediments of the Middle Kyvvozh (Vol'sk-Vym' ridge, Timan). *Proc. Komi Science Centre of the Ural Branch RAS*. Syktyvkar, **2018**. N 1 (33). P. 54–66 (in Russian).

Glukhov Yu.V., Udoratina O.V., Filippov V.N., Isaenko S.I. Finding of authigenous native gold in Novobobrovskoe rare-metal and rare-earth deposit (Chetlassky Kamen, Middle Timan). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. **2017**. N 11. P. 22–27 (in Russian).

Kalinin Yu.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Kirillov M.V. Gold in the weathering crust at the Suzdal' deposit (Kazakhstan). *Russian Geol. Geophys.* **2009**. Vol. 50. N 3. P. 174–187 (in Russian).

Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A., Naumova O.B., LeBarge W., Dilly R.A. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits. *Ore Geol. Rev.* **2017**. Vol. 85. P. 321–335.

Murzin V.V., Malyugin A.A. Typomorphism of gold in the hypergenesis zone (on the example of the Urals). Sverdlovsk, **1987**. 96 p. (in Russian).

Nikolaeva L.A., Gavrilov A.M., Nekrasova A.N., Yablokova S.V., Shatilova L.V. Native gold of ore and placer deposits of Russia: atlas. Moscow: Akvarel Publ., **2015**. 200 p. (in Russian).

Plyakin A.M., Ershova O.V. Timan Gold. The history of the discovery and study. *Bull. Inst. Geol. Komi Sci. Centre, Ural Branch RAS*. **2012**. N 12. P. 20–22 (in Russian).

Simakova Y.S., Sokerin M.Yu. Clay minerals of the disintegration zone in the bedrock of the Middle Kyvvozhskaya gold-bearing placer. In: Clays and clay minerals. Proc. VII Russian workshop on clay minerals. "Argilla Studium" and V Russian meeting on clays and clay minerals, dedicated to the 100th anniversary of the birth of B.B. Zvyagin. Moscow. *IGEM RAS*, **2021**. P. 187–188 (in Russian).

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ОЛИВИНА В МЕЛИЛИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ ПАРАЛАВАХ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОНГОЛИИ

© 2023 г. В. Е. Глушкова^{1, *}, д. чл. И. С. Перетяжко^{1, 2}, Е. А. Савина¹, д. чл. Е. А. Хромова³

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, 1а, Иркутск, 664033 Россия

²Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

³Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, ул. Сахьянова, ба, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: glushkova@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 16.10.2022 г.

Принята к публикации 17.10.2022 г.

Охарактеризованы минералы группы оливина из мелилит-нефелиновых паралав, которые формировались в результате термических изменений пород осадочных толщ, вызванных многостадийными современными и четвертичными природными угольными пожарами в пределах двух пирометаморфических комплексов Монголии. В паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид обнаружены продукты распада твердого раствора на кальцийсодержащий фаялит и кирштейнит, а в паралавах Нилгинского комплекса также минералы изоморфных рядов форстерит–фаялит, монтичеллит–кирштейнит и симплектитоподобные сростания кирштейнита с нефелином. Изученные минералы различаются по текстурным особенностям, магнезиальности и температурам кристаллизации, что является следствием локальных вариаций условий образования и состава недосыщенных кремнеземом, обогащенных Са мафических расплавов, исходных для паралав. Минералы монтичеллит-кирштейнитового ряда, содержащие до 86 мол. % минала кирштейнита, встречаются только в паралавах, содержащих ксенолиты термически измененных карбонатно-силикатных осадочных пород. Кристаллизация этих минералов совместно с геленитом происходила в процессе реакционного взаимодействия мафических паралав и ксенолитов мергелистых известняков с большими вариациями содержания примеси силикатного (глинисто-полевошпатового) вещества.

Ключевые слова: кирштейнит, монтичеллит, пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид, Монголия

DOI: 10.31857/S0869605523010045, EDN: NFTNHJ

ВВЕДЕНИЕ

В паралавах недавно открытых пирометаморфических комплексах Монголии, Нилгинском (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018) и Хамарин-Хурал-Хид (Савина и др., 2020), обнаружены разные минералы группы оливина. Комплексы сложены пирогенными породами, возникшими в результате полного или частичного плавления пород осадочных толщ во время многостадийных современных и древних (четвертичных) природных угольных пожаров. Частичное плавление аргиллитов, алевролитов и песчаников привело к появлению клинкеров (Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020), а уникальные по минерально-фазовым ассоциациям мелилит-нефелиновые паралавы формировались из недосыщенных по кремнезему и обогащенных Са мафиче-

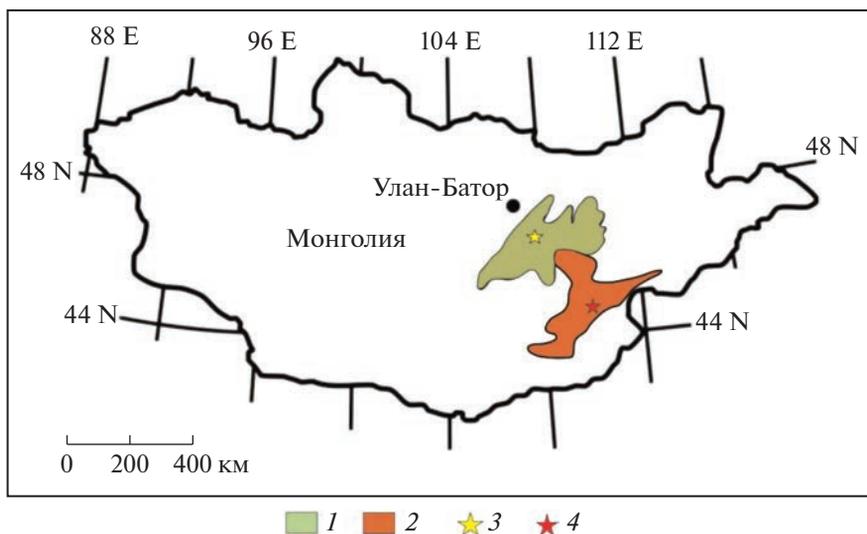


Рис. 1. Угленосные провинции Монголии: (1) Чоир-Нилгинская, (2) Восточно-Монгольская. Пирометаморфические комплексы: (3) Нилгинский, (4) Хамарин-Хурал-Хид.

Fig. 1. Coal-bearing provinces of Mongolia: (1) Choir-Nyalga, (2) Eastern Mongolian. Combustion metamorphic complexes: (3) the Nyalga complex, (4) the Kharmayrn-Khural-Khiid complex.

ских расплавов в результате плавления карбонатно-силикатных пород — мергелистых известняков (Peretyazhko et al., 2021).

Минералы группы оливина (далее — оливины), обнаруженные в паралавах, представлены минералами изоморфного ряда форстерит—фаялит, продуктами распада твердого раствора кальцийсодержащего фаялита (Са-фаялита) и кирштейнита, а также промежуточными членами ряда монтичеллит—кирштейнит.

Изучение особенностей состава и условий кристаллизации кирштейнита вызывает особый интерес, поскольку этот редкий минерал найден в породах различного происхождения — метеоритах, магматических, вулканических, метаосадочных, пирометаморфических и техногенных породах. Монтичеллит встречается в кимберлитах, карбонатитах, ультраосновных, щелочных магматических и контактово-метаморфических породах.

В ранее опубликованных материалах, посвященных изучению минерально-фазовых ассоциаций пород пирометаморфических комплексов в Монголии, приводилась краткая характеристика оливинов, преимущественно, Са-фаялита и кирштейнита (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020). Настоящая работа посвящена детальному описанию оливинов Са–Fe–Mg состава из мелилит-нефелиновых паралав и сравнительному анализу текстурных особенностей этих минералов.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид находятся на расстоянии около 300 км друг от друга (рис. 1). Пирогенные породы формировались при подземном горении прослоев бурого угля в терригенно-карбонатных осадочных толщах раннемеловой дзунбаинской свиты.

Нилгинский комплекс расположен в пределах Чоир-Нилгинской угленосной провинции Центральной Монголии (Erdenetsogt et al., 2009). В ходе полевых работ 2014–

2015 гг. на площади этого комплекса были впервые обнаружены коренные выходы плавленых пород на трех останцах высотой до 40 м (Корона, Верблюд, Малыш), которые сохранились после эрозии осадочной толщи, вероятно, вблизи эпицентров (очагов горения) четвертичных природных угольных пожаров (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018). Останцы сложены термически измененными осадочными породами (обоженными аргиллитами и алевролитами), которые содержат прожилки и включения, в т. ч. крупные, стекловатого клинкера, образованного “in situ” на месте плавления глинистых пород. Иногда обоженные аргиллиты секутся тонкими жилами мелкозернистых раскристаллизованных мелилит-нефелиновых паралав. На останцах и эродированной поверхности вблизи них площадью около 20 км² встречаются глыбы таких же паралав. Клинкеры и паралавы часто содержат ксенолиты в разной степени пирогенно- измененных осадочных пород.

Комплекс Хамарин-Хурал-Хид расположен в Восточной Монголии. Ранее здесь добывали бурый уголь кустарным способом. В ходе природных угольных пожаров, которые наблюдались в этом районе с XVIII в. (Покровский и др., 1949), обрушений пород над выгоревшими пластами угля и разрушений осадочной толщи временными водотоками, сформировался характерный для современных пирометаморфических комплексов ландшафт “горельников” с протяженными грядами, оврагами и небольшими пещерами. Мощность разрезов пирогенных пород, представленных обоженными аргиллитами, алевролитами и песчаниками, а также стекловатыми клинкерами и мелилит-нефелиновыми паралавами, достигает 15 м.

В обоих комплексах паралавы сложены микрофенокритами плагиоклаза, Al-клинопироксена и мелилита, интерстиции между которыми заполнены нефелином с включениями минералов группы оливина, K-Ва полевых шпатов, шпинели, пирротина и других минералов. Подробные описания геологии пирометаморфических комплексов, пирогенных пород и слагающих их минералов приводятся в работах (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Валовый состав пирогенных пород определялся в ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН (г. Иркутск) рентгенофлюоресцентным методом на многоканальном X-Ray спектрометре CPM-25. Минералы из пиролав изучались методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии (СЭМ ЭДС) на электронном микроскопе Carl Zeiss LEO-1430VP (LEO Electron Microscopy Ltd.) с системой микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd.) в Аналитическом центре ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Матричные эффекты учитывали по методу XPP, реализованному в программном обеспечении INCA Energy. Анализы минералов проводили в режиме сканирования участков площадью более 10 мкм² при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.5 нА и длительности накопления спектров 50 с.

Условия кристаллизации оливинов оценивались с учетом экспериментальных данных (Davidson, Mukhopadhyay, 1984). Кристаллохимические формулы оливина рассчитывались на 4 атома кислорода в программе CRYSTAL (Перетяжко, 1996). Содержания минералов – форстерита (Fo, Mg₂SiO₄), фаялита (Fa, Fe₂SiO₄), кальциооливина (Caol, Ca₂SiO₄), тефроита (Tph, Mn₂SiO₄), кирштейнита (Kir, CaFeSiO₄) и монтичеллита (Mtc, CaMgSiO₄) – в формуле оливина нельзя рассчитать одновременно, поскольку число минералов превышает число катионов (Mn, Fe, Mg, Ca). Поэтому использовались следующие наборы минералов: (1) Fo, Fa, Caol, Tph (при классификации оливинов по диаграмме Caol–Fa–Fo); (2) Fo, Fa, Tph, Kir (для продуктов распада твердого раствора на Ca-фаялит и кирштейнит); (3) Fo, Tph, Kir, Mtc (для минералов ряда монтичеллит–

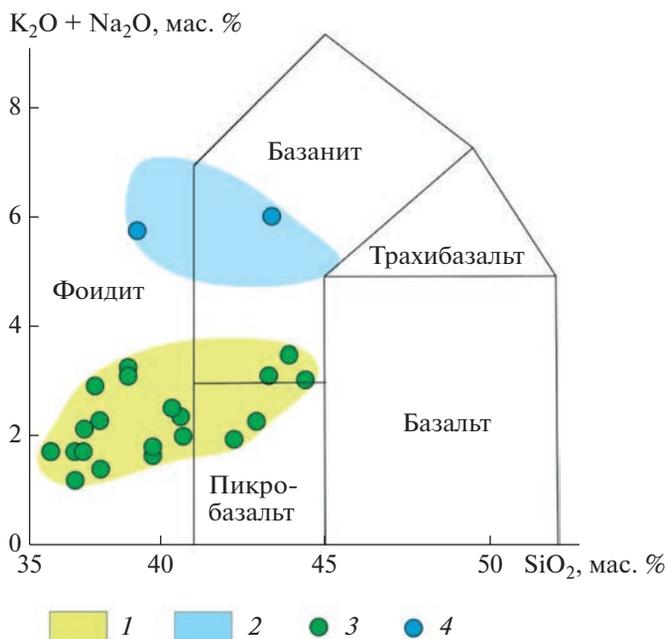


Рис. 2. Фрагмент TAS классификационной диаграммы мелилит-нефелиновых паралавов комплексов Нилгинского и Хамарин-Хурал-Хид. Поля составов паралавов: (1) Нилгинский комплекс, по (Перетяжко и др., 2018), (2) Хамарин-Хурал-Хид, по (Савина и др., 2020). Точки состава паралавов, содержащих оливины: (3) Нилгинский комплекс, (4) Хамарин-Хурал-Хид.

Fig. 2 Fragment of the TAS diagram of melilite–nepheline paravas of Nyalga and Khamaryn–Khural–Khiid complexes. Composition fields of paravas: (1) Nyalga complex, after (Peretyazhko et al., 2018), (2) Khamaryn–Khural–Khiid complex, after (Savina et al., 2020). Composition points of paravas containing olivines: (3) Nyalga complex, (4) Khamaryn–Khural–Khiid complex.

кирштейнит). При расчетах минального состава с участием K_{ir} и Mtc применялся масс-балансовый метод, реализованный в программе CRYSTAL (Перетяжко, 1996).

ВАЛОВЫЙ СОСТАВ ПАРАЛАВ

Ранее был определен химический состав мелилит-нефелиновых паралавов, содержащих оливины, из пирометаморфических комплексов Монголии – Нилгинского и Хамарин-Хурал-Хид (Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020). Нормированные к 100% составы паралавов без учета летучих компонентов (потери массы при прокаливании проб вследствие выделения H_2O и CO_2) показаны на TAS диаграмме вулканических пород (рис. 2).

Паралавы комплекса Хамарин-Хурал-Хид являются нефелин-содержащими недосыщенными SiO_2 (39–45 мас. %) породами, для которых характерно значительное преобладание Na_2O (4.5–6.5 мас. %) над K_2O (0.3–0.7 мас. %). На TAS диаграмме точки составов паралавов находятся в полях базанита и фойдита. В отличие от этих вулканических пород паралавы имеют значительно более высокие концентрации CaO (17–24 мас. %) и Al_2O_3 (18–21 мас. %). Только в двух образцах паралавов обнаружен оливин. Валовое содержание SiO_2 в них составляет 39 и 43 мас. % при сумме $Na_2O + K_2O$ 5.8 и

6.2 мас. %. На TAS диаграмме точки этих паралав находятся в полях фойдита (MN-1419) и базанита (MN-1425) (рис. 2).

Паралавы Нилгинского комплекса характеризуются содержаниями SiO_2 37–44 мас. %, CaO 20–26 мас. %, и суммой $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ от 0.8 до 2.3 мас. %. На TAS диаграмме точки их составов лежат в полях фойдита, пикробазальта и базанита. Оливины были обнаружены в 20 образцах паралав, точки состава которых показаны на рис. 2.

Более детальное описание геохимических особенностей и распределений примесных элементов в мелилит-нефелиновых паралавах Монголии приведено в работах (Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020).

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ОЛИВИНА

В паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид оливины представлены фаялитом, промежуточными членами ряда форстерит–фаялит и продуктами распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит. В образце MN-1412 обнаружено единственное зерно форстерита (Fo_{89}). Фаялит (Fa_{74-86}) в образце MN-1368 имеет высокую концентрацию MnO (до 10 мас. %) и содержит до 13.8 мол. % Trh (табл. 1, ан. 1). Оливины (вероятно, продукты распада твердого раствора) образуют выделения размером до 100 мкм, в которых по объемному соотношению Са-фаялит преобладает над кирштейнитом (рис. 3, а, б). Минимальные составы оливинов имеют следующие особенности. Количество CaO изменяется от 7 до 13 мол. % в Са-фаялите и от 35 до 43.5 мол. % в кирштейните, а содержание Fa варьирует в пределах 58–86 и 47–59 мол. % соответственно. При этом в Са-фаялите количество Kig составляет 13.5–23 мол. %, а в кирштейните – 4–17 мол. % Fa (табл. 1, ан. 2–5). Магнезиальность $\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ в кирштейните изменяется от 0.07 до 0.22. Минералы содержат примеси MgO (1.8–9.2 мас. %) и MnO (1.6–5.2 мас. %, Trh 2–6 мол. %).

В Нилгинских паралавах оливины встречаются чаще, чем в паралавах Хамарин-Хурал-Хида. В шести образцах (MN-1133, MN-1179, MN-1179-1, MN-1180, MN-1185 и MN-1193) обнаружены микролиты Са-содержащего форстерита (Fo_{85-94}) размером до 200 мкм (табл. 1, ан. 6). Содержание CaO в таком форстерите составляет 2.5–3 мол. %, а в единичных зернах достигает 6.3%. Встречаются обособления зонального строения: наиболее магнезиальный оливин (Fo_{45-50}) слагает центральную часть, средняя зона имеет более железистый состав (Fo_{29-32}), а краевая зона сложена кирштейнитом (рис. 3, в; табл. 1, ан. 7–9). Отдельные зерна состава Fo_{34-39} , содержащие <1 мас. % CaO , обнаружены в образце MN-1177-2 (табл. 1, ан. 10). Встречаются также микролиты (зерна) форстерит-фаялита с концентрацией CaO до 3.7 мас. %.

В Нилгинских паралавах оливины обычно представлены продуктами распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит. Эти минералы образуют обособления размером до 200 мкм, в которых по объемному соотношению кирштейнит преобладает над Са-фаялитом (рис. 3, з). Содержания CaO и Fa изменяются в пределах 5–15, 43–86 мол. % в Са-фаялите и 37–45, 34–56 мол. % в кирштейните соответственно (табл. 1, ан. 11–14). Количество Kig в Са-фаялите составляет 6.5–33.5 мол. %, количество Fo в кирштейните – 0–25 мол. %. Иногда кирштейнит образует кайму вокруг Са-фаялита (рис. 3, д). В пределах одного образца паралавы магнезиальность Mg\# для кирштейнита изменяется от 0.15 до 0.3 и только в единичных анализах достигает 0.55. Количество Trh в таких оливинах составляет 1.5–4 мол. %. Симплектитоподобные сростания кирштейнита, содержащего до 17 мол. % Fa , и нефелина размером до 400 мкм обнаружены в образцах MN-1234, MN-1193, MN-1177-1 и MN-1177-2 (табл. 1, ан. 15, 16, рис. 3, е).

Кальций-магнезиально-железистые оливины в Нилгинских паралавах (обр. MN-1133, MN-1179, MN-1180 и MN-1234-1) представлены монтчеллитом и промежуточными членами ряда монтчеллит–кирштейнит. Выделения таких оливинов неправильной,

Таблица 1. Составы (мас. %) минералов группы оливина из мелилит-нефелиновых паралав комплексов Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид**Table 1.** Compositions (wt %) of olivines from melilite-nepheline paralavas of Nyalga and Khamaryn-Khural-Khiid complexes

Образец	1368	1419		1425		1133	1234		
Анализ	1(28)	2(3)	3(1)	4(11)	5(16)	6(3)	7(2)	8(2)	9(4)
SiO ₂	29.67	30.74	32.41	30.00	30.93	36.50	34.08	32.42	32.33
FeO	60.01	52.24	36.28	57.98	41.32	19.54	38.92	46.67	34.27
MnO	8.60	5.25	3.16	2.74	2.02	0.46	3.71	4.56	3.32
MgO	2.43	7.89	3.02	3.94	1.97	40.68	21.28	12.72	4.57
CaO	—	5.30	25.62	5.78	24.04	3.42	2.86	4.50	25.47
Сумма	100.71	101.42	100.49	100.44	100.28	100.61	100.85	100.87	99.96

Коэффициенты в формулах

Mg	0.120	0.370	0.139	0.191	0.093	1.575	0.915	0.577	0.209
Fe ²⁺	1.667	1.375	0.935	1.578	1.090	0.424	0.939	1.187	0.880
Ca	—	0.179	0.846	0.202	0.812	0.095	0.088	0.147	0.838
Mn	0.242	0.140	0.083	0.076	0.054	0.010	0.091	0.118	0.086
Сумма катионов	2.029	2.065	2.002	2.047	2.049	2.104	2.033	2.028	2.014
Si	0.985	0.968	0.999	0.977	0.976	0.948	0.983	0.986	0.993
Mg#	0.07	0.21	0.13	0.11	0.08	0.79	0.49	0.33	0.19
Caol	0.00	8.66	42.25	9.85	39.65	4.52	4.35	7.23	41.62
Fo	5.93	17.94	6.93	9.34	4.52	74.83	45.01	28.44	10.39
Fa	82.14	66.62	46.70	77.12	53.19	20.16	46.18	58.54	43.71
Трh	11.92	6.78	4.12	3.69	2.64	0.48	4.46	5.79	4.29
Fo	5.53	17.71	6.91	8.98	4.02	77.17	45.35	28.49	10.28
Fa	82.86	59.83	4.46	68.84	13.88	16.46	42.54	52.03	2.11
Трh	11.61	6.19	4.10	3.19	2.09	<0.02	4.12	5.53	4.14
Kir	0.00	16.27	84.54	18.99	80.02	6.38	8.00	13.96	83.47

Таблица 1. Продолжение

Образец	1177-2	1193		1127		1234	1193
Анализ	10 (3)	11(19)	12(15)	13(14)	14(9)	15(2)	16(3)
SiO ₂	33.07	31.59	30.45	30.98	31.70	32.58	32.17
FeO	49.15	38.95	54.86	56.47	40.20	35.00	37.00
MnO	0.98	2.47	3.04	1.45	1.18	3.13	1.88
MgO	16.65	3.70	6.55	6.37	2.97	4.01	4.80
CaO	0.65	23.76	5.40	5.23	23.79	25.74	24.99
Сумма	100.49	100.47	100.29	100.49	99.84	100.44	100.87

Коэффициенты в формулах

Mg	0.743	0.171	0.313	0.303	0.138	0.183	0.219
Fe ²⁺	1.231	1.012	1.469	1.505	1.051	0.896	0.946
Ca	0.021	0.791	0.185	0.179	0.797	0.844	0.819
Mn	0.025	0.065	0.083	0.039	0.031	0.081	0.049
Сумма катионов	2.020	2.038	2.050	2.025	2.018	2.005	2.033
Si	0.990	0.981	0.975	0.987	0.991	0.998	0.984
Mg#	0.38	0.14	0.18	0.17	0.12	0.17	0.19
Caol	1.03	38.78	9.04	8.82	39.50	42.12	40.29
Fo	36.80	8.40	15.26	14.94	6.86	9.13	10.77
Fa	60.94	49.63	71.68	74.31	52.09	44.70	46.55
Tph	1.23	3.19	4.02	1.93	1.55	4.05	2.40
Fo	36.91	8.09	15.01	14.81	6.70	9.09	10.53
Fa	60.49	11.05	64.20	66.32	12.71	2.59	6.37
Tph	1.00	2.77	3.50	1.64	1.34	4.00	2.03
Kir	1.60	78.09	17.29	17.23	79.25	84.32	81.07

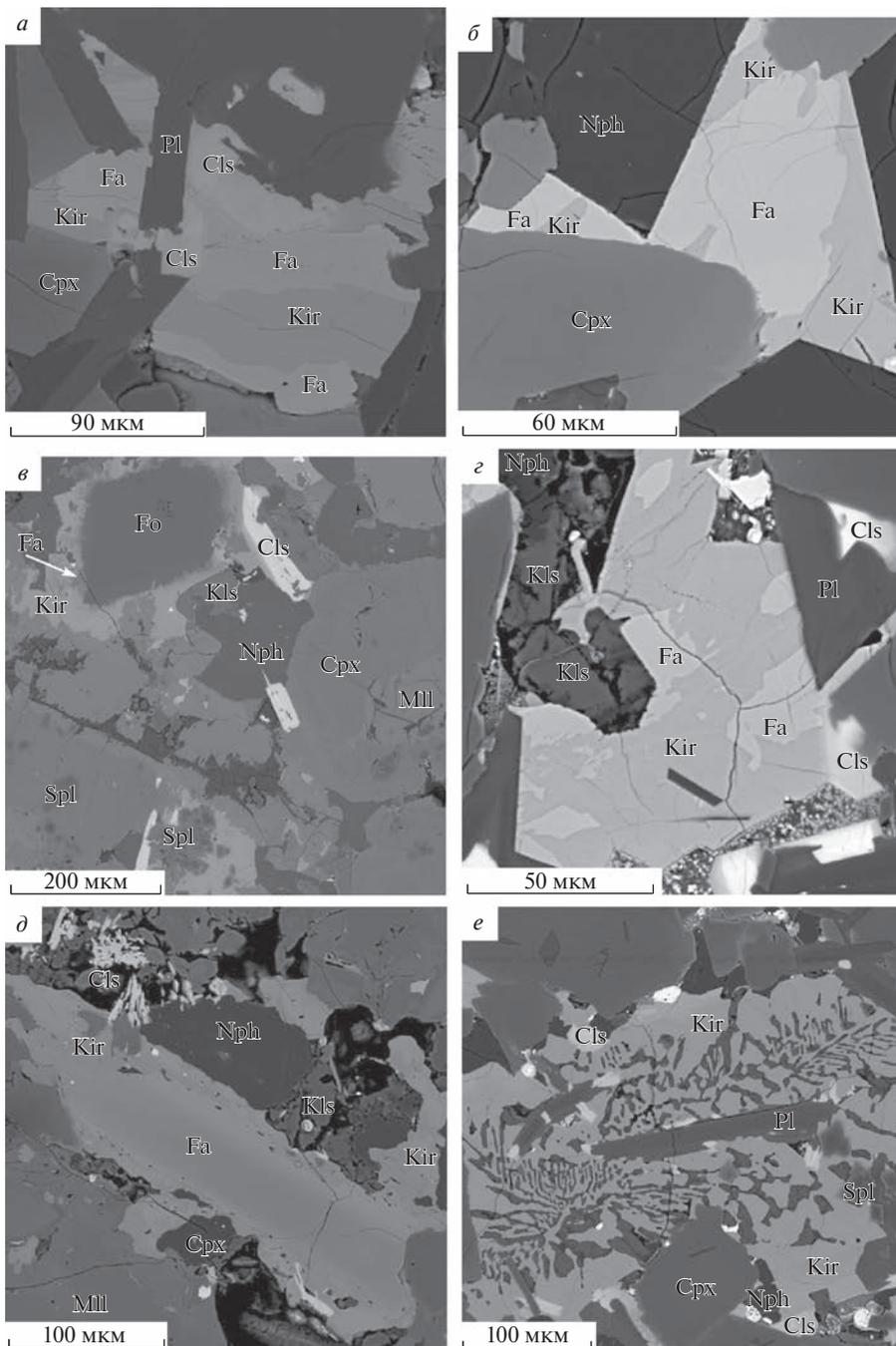
Таблица 1. Продолжение

Образец	1133	1180	1179	1234-1	
Анализ	17(6)	18(2)	19(2)	20(5)	21(6)
SiO ₂	36.66	36.51	35.58	36.28	32.55
FeO	3.78	15.67	11.46	12.13	31.84
MnO	0.49	0.83	0.85	2.38	4.22
MgO	22.56	15.71	17.07	16.40	5.51
CaO	35.57	32.68	35.62	34.28	26.30
Сумма	98.95	101.39	100.57	101.46	100.42
Коэффициенты в формулах					
Mg	0.905	0.645	0.702	0.670	0.250
Fe ²⁺	0.085	0.361	0.264	0.278	0.809
Ca	1.026	0.964	1.052	1.007	0.856
Mn	0.011	0.019	0.020	0.055	0.109
Сумма катионов	2.027	1.989	2.038	2.011	2.023
Si	0.987	1.005	0.981	0.995	0.989
Mg#	0.91	0.64	0.73	0.71	0.24
Caol	50.60	48.47	51.63	50.08	42.31
Fo	44.65	32.42	34.43	33.34	12.33
Fa	4.20	18.14	12.96	13.83	39.99
Trp	0.55	0.98	0.98	2.75	5.37
Fo	0.00	2.21	0.00	0.00	9.84
Trp	0.03	1.10	0.08	2.35	5.15
Kir	8.98	36.36	28.09	29.21	80.31
Mtc	90.99	60.33	71.83	68.43	4.71

Примечание. Номера образцов имеют префикс "MN-". После порядкового номера в скобках – количество СЭМ ЭДС анализов. Прочерк – содержание ниже предела обнаружения СЭМ ЭДС анализа. Порядковые номера для средних составов оливинов: 1–5 паралавы Хамарин-Хурал-Хида, 6–22 Нилгинские паралавы. Кристаллохимические формулы рассчитаны на 4 атома кислорода. Mg# = Mg/(Mg + Fe). Fo – форстерит, Fa – фаялит, Caol – кальциооливин (Ca₂SiO₄), Trp – тефрит, Kir – кирштейнит, Mtc – монтичеллит.

Рис. 3. Фрагменты матрикса паралав комплексов Хамарин-Хурал-Хид (*a, б*) и Нилгинского (*в-е*). *a, б* – продукты распада твердого раствора оливина на Ca-фаялит и кирштейнит, обр. MN-1425; *в* – зерно форстерита с каймой фаялит-кирштейнитового состава, обр. MN-1179; *г* – продукты распада твердого раствора оливина на Ca-фаялит и кирштейнит, обр. MN-1193; *д* – микролит Ca-фаялита с каймой кирштейнита, обр. MN-1234; *е* – симлектитоподобное срастание кирштейнита и нефелина, обр. MN-1234-1. Изображения в обратно-рассеянных электронах. Cls – цельзиан, Cpx – клинопироксен, Fa – Ca-фаялит, Kir – кирштейнит, Kls – кальсилит, Mll – мелилит, Nph – нефелин, Pl – плагиоклаз, Spl – шпинель.

Fig. 3. Matrix fragments of paralavas from Khamaryn–Khural–Khid (*a, б*) and Nyalga (*в-е*) complexes. *a, б* – decomposition products of olivine solid solution into Ca-bearing fayalite and kirschsteinite, sample MN-1425; *в* – forsterite grain with the rim of fayalite–kirschsteinite composition, sample MN-1179; *г* – decomposition products of the solid solution Ca-fayalite–kirschsteinite, sample MN-1193; *д* – Ca-fayalite microlith with the kirschsteinite rim, sample MN-1234; *е* – simplectite intergrowths of kirschsteinite and nepheline, sample MN-1234-1. BSE images. Cls, celsian, Cpx, clinopyroxene, Fa, Ca-fayalite, Kir, kirschsteinite, Kls, kalsilite, Mll, melilite, Nph, nephiline, Pl, plagioclase, Spl, spinel.



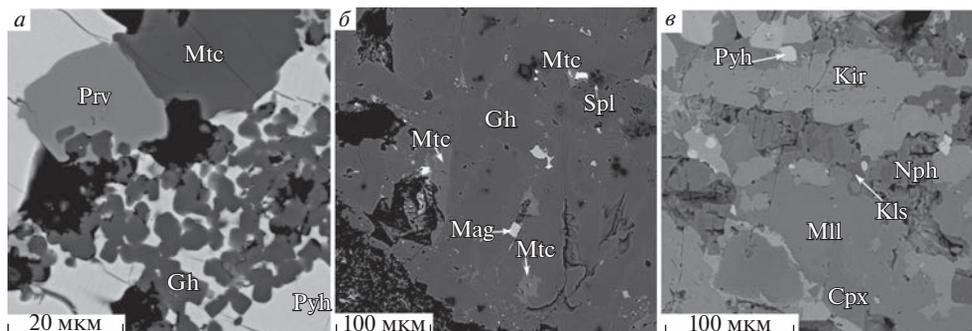


Рис. 4. Фрагменты реликтов ксенолитов термически измененной карбонатно-силикатной породы (мергелистого известняка) и матрикса паралав Нилгинского комплекса. *a* – зерно монтичеллита в ассоциации с перовскитом и геленитом. обр. MN-1176; *б* – включения монтичеллита и минералов ряда монтичеллит–кирштейнит в гелените, обр. MN-1234-1; *в* – выделения кирштейнита в ассоциации с нефелином, кальсилитом, мелилитом и Al-клинопироксеном. Изображения в обратно-рассеянных электронах. Gh – геленит, Mtc – минералы ряда монтичеллит–кирштейнит, Mag – магнетит, Prv – перовскит, Pyh – пирротин. Остальные условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Fragments of thermally modified xenoliths of carbonate-silicate rocks (marly limestone) and matrix fragments of paralavas from Nyalga complex. *a* – monticellite grain in assemblage with perovskite and gehlenitic melilite, sample MN-1176; *б* – inclusions of monticellite and members of the monticellite–kirschsteinite series in gehlenitic melilite, sample MN-1234-1; *в* – inclusions of kirschsteinite in association with nepheline, calcilite, melilite and Al-clinopyroxene. BSE images. Gh, gehlenitic melilite, Mtc, members of the monticellite–kirschsteinite series, Mag, magnetite, Prv, perovskite, Pyh, pyrrhotite. Other symbols see on the Fig. 3.

реже изометричной формы размером до 100 мкм в ассоциации с геленитом (минерал содержит до 80 мол. % минала геленита $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), перовскитом и пирротином (рис. 4, *a*) обнаружены в реликтах ксенолитов термически измененных карбонатно-силикатных осадочных пород. По данным СЭМ ЭДС (табл. 1, ан. 17–19) содержания SiO_2 , CaO, MnO в монтичеллите изменяются незначительно и составляют 35–37, 32–36.5, 0–0.9 мас. % соответственно. Зональность в отдельных зернах оливинов ряда монтичеллит–кирштейнит не обнаружена. Однако, даже в пределах одного образца паралавы эти оливины в ксенолитах осадочных пород имеют очень большой диапазон магнизиальности (Mg# от 0.4 до 0.94) при концентрациях FeO 1.5–16 мас. %, MgO 15–24 мас. %. Содержание CaO в большинстве зерен монтичеллита и оливинах ряда монтичеллит–кирштейнит изменяется в диапазоне 48–53 мол. % при широких вариациях концентраций Kir (3–37 мол. %) и количестве Trp до 1.1 мол. %. Максимальное содержание Mtc для минералов ряда монтичеллит–кирштейнит составляет 96 мол. %.

Образец MN-1234-1 содержит крупный реликт измененного ксенолита осадочной породы, сложенный геленитом с включениями, имеющими промежуточный состав между монтичеллитом и кирштейнитом (табл. 1, ан. 20, рис. 4, *б*). Также в матриксе паралавы обнаружены выделения кирштейнита размером до 300 мкм в ассоциации с нефелином и кальсилитом (табл. 1, ан. 21, рис. 4, *в*). В оливинах ряда монтичеллит–кирштейнит содержание CaO и Fa изменяется в диапазоне 45–52.5 и 5–23 мол. %, а в кирштейните – 39.5–44 и 34–46 мол. % соответственно. Минералы ряда монтичеллит–кирштейнит в данном образце характеризуются большими вариациями содержания Kir (от 12 до 86 мол. %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Минералы группы оливина имеют разную распространенность в породах земного и внеземного происхождения.

Кишштейнит характерен для метеоритов: хондритов (MacPherson et al., 2017), ахондритов (Mikouchi et al., 1995; Jambon et al., 2008) и железных метеоритов (Folco, Melini, 1997). Этот минерал встречается в скарнах (Конев, Самойлов, 1974), ультраосновных вулканических (Melluso et al., 2010; Шарьгин, 2011; Chalapathi et al., 1996) и щелочных вулканических породах (Andersen et al., 2012), кимберлитах (Chalapathi et al., 1996) и габбро-долеритах (Олейников, 1995). Описаны также находки кишштейнита в техногенных породах, образованных при подземных ядерных взрывах (Kahn, Smith, 1966), и парабазах (железистых паралавах) Челябинского угольного бассейна (Sokol et al., 2002).

Монтichelлит встречается и может быть породообразующим минералом в скарнах (Синяков и др., 1961; Конев, Самойлов, 1974; Иванюк и др., 2002; Сокол и др., 2019). Найдены монтichelлита описаны в карбонатитах (Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007; Зайцев, Петров, 2008; Tarpe et al., 2009), кимберлитах (Abersteiner et al., 2018, 2020; Dongre, Tarpe, 2019; Korylova et al., 2021), камафугитах (Boari et al., 2007; Lustrino et al., 2020), дунитах (Nagata, 1982) и серпентинизированных перидотитах (Nozaka, 2020). Минералы промежуточного состава между монтichelлитом и кишштейнитом встречаются в пирогенных породах “пестрой зоны” бассейна Хатрурим (Burg et al., 1991), в терриконах на площади Челябинского угольного бассейна (Сокол, 2005) и в пирометаллургических шлаках (Warchulski et al., 2016).

Оливины в мелилит-нефелиновых паралавах Монголии имеют отличительные текстурные особенности, различные объемные соотношения (рис. 3, 4) и большие вариации состава (табл. 1, рис. 5, б). В паралавах Хамарин-Хурал-Хида чаще всего встречаются Са-фаялит и кишштейнит, а в Нилгинских паралавах кроме этих минералов — форстерит, монтichelлит и промежуточные члены ряда монтichelлит–кишштейнит.

Кишштейнит имеет различное содержание Mg: в Нилгинском комплексе этот минерал более магнезиальный (Mg# в среднем 0.25) по сравнению с таковым из комплекса Хамарин-Хурал-Хид (Mg# от 0.07 до 0.22). Ориентированные выделения Са-фаялита и кишштейнита (структуры распада твердого раствора), описанные в метеорите — ангрите (Mikouchi et al., 1995) и парабазах Челябинского угольного бассейна (Sokol et al., 2002), не обнаружены в мелилит-нефелиновых паралавах. Минеральные ассоциации оливинов в магматических породах также отличаются от таковых в паралавах. В мелилититовых лавах Италии (Melluso et al., 2010; Шарьгин, 2011) кишштейнит заполняет интерстиции между минералами матрикса и образует краевые зоны фенокристов форстерита (Fo_{85–80}), в котором содержание Са_{ol}, как правило, не превышает 3 мол. % (рис. 5, б). В паралавах Монголии и парабазах Челябинского угольного бассейна кишштейнит и Са-фаялит, содержащий более 6 мол. % Са_{ol}, образуют совместные сростания — вероятно, структуры распада твердого раствора.

Текстурные особенности и большие вариации состава оливинов из пирометаморфических, магматических и техногенных пород могут быть связаны со многими факторами: локальными вариациями физико-химических параметров (*T*, *P*, составами расплава и флюидной фазы), кинетикой кристаллизации (скорости охлаждения и др.) мафических расплавов, исходных для недосыщенных по кремнезему, обогащенных Са, магматических, техногенных пород и мелилит-нефелиновых паралав.

Са-фаялит и кишштейнит могли образоваться как при распаде твердого раствора, так и в результате кристаллизации оливинов разного состава из остаточных мафических расплавов в локальных участках матрикса паралав. По экспериментальным данным (Davidson, Mukhopadhyay, 1984) кристаллизация обогащенных Са и Fe оливинов наблюдается в низкотемпературных и высокотемпературных условиях из недосыщенного кремнеземом мафического расплава. В зависимости от отношения Са/Fe, в таком рас-

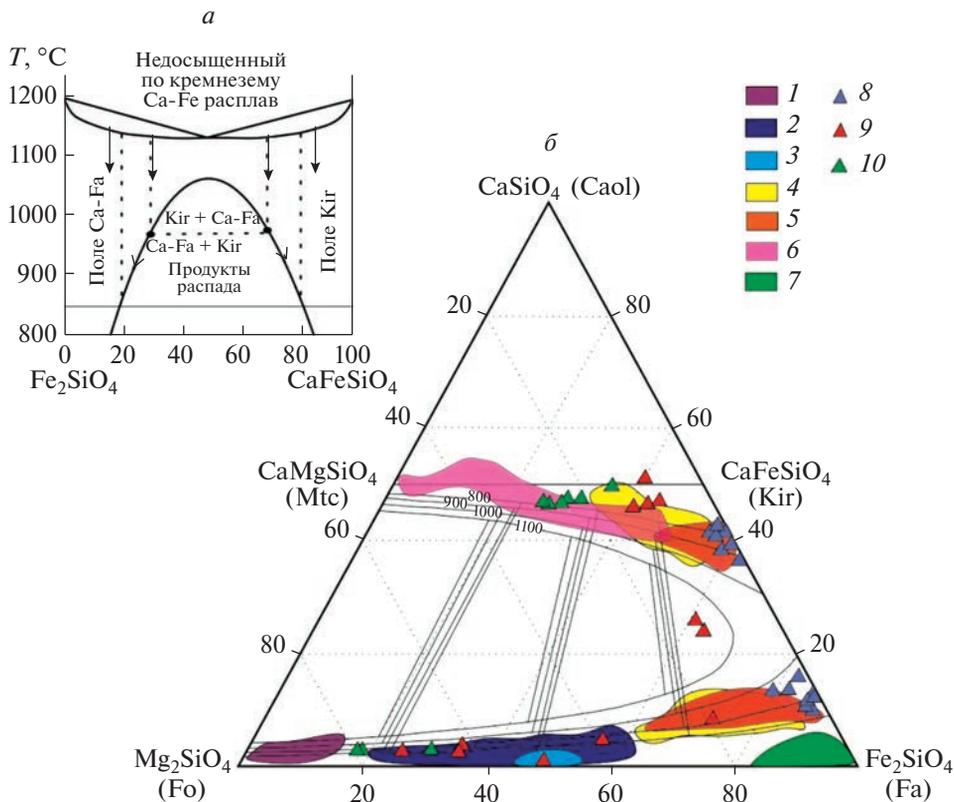


Рис. 5. Схема распада твердого раствора оливина (*a*, по: Sokol et al., 2002), поля и точки состава оливинов из вулканических пород и парабазалтов (*b*). Изотермы в области несмесимости твердого раствора оливина, составы сосуществующих фаз (тонкие линии между изотермами), по (Davidson, Mukhopadhyay, 1984). Поля состава оливинов из паралав комплексов Нилгинский (1, 2, 4, 6) и Хамарин–Хурал–Хид (3, 5, 7): (1) форстерит, (2, 3) оливины ряда форстерит–фаялит, (4, 5) Ca-фаялит и кирштейнит, (6) оливины ряда монтицеллит–кирштейнит, (7) фаялит. Точки состава оливинов из: (8) парабазалтов Челябинского угольного бассейна (по: Sokol et al., 2002), (9) мелилитолитов вулканического комплекса Capo di Bove (по: Melluso et al., 2010) и (10) вулкана Пьян ди Челле (по: Шарыгин, 2011).

Fig. 5. Scheme of decomposition of the olivine solid solution (*a*, after Sokol et al., 2002), composition fields and points of olivines from volcanic rocks and parabasalts (*b*). Isotherms of the miscibility gap of olivine solid solution and tie lines after Davidson and Mukhopadhyay, 1984. Composition fields of olivines from paralavas of Nyalga complex (1, 2, 4, 6) and the Khamaryn–Khural–Khid complex (3, 5, 7): (1) forsterite, (2, 3) members of forsterite–fayalite series, (4, 5) Ca-fayalite and kirschsteinite, (6) members of monticellite–kirschsteinite series, (7) fayalite. Composition points of olivines from: (8) from parabasalts of the Chelyabinsk brown-coal basin (after Sokol et al., 2002), (9) melilitolites from the volcanic complex Capo di Bove (after Melluso et al., 2010) and (10) Pian di Celle volcano (after Sharygin, 2011).

плаве могут образоваться либо кирштейнит, либо Ca-фаялит, либо оба этих минерала в различных объемных соотношениях при распаде твердого раствора (рис. 5, *a*). В мелилит-нефелиновых паралавах кирштейнит кристаллизовался на поздних стадиях формирования матрикса – в микролитах (зернах) между минералами фенокристовой ассоциации и, вероятно, при распаде твердого раствора. В паралавах Монголии оливины

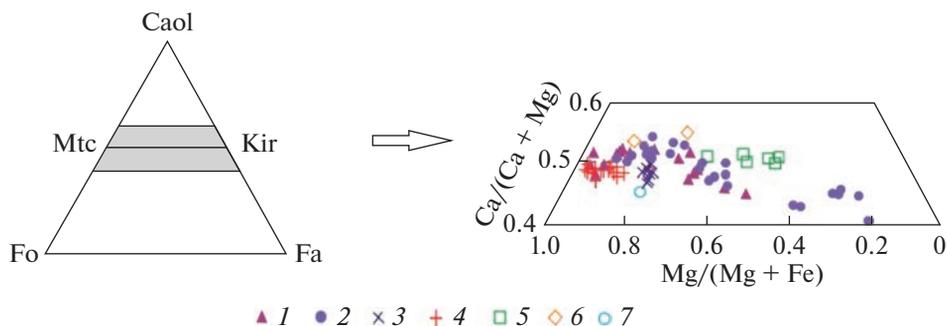


Рис. 6. Фрагмент диаграммы Caol–Fa–Fo с составами монтицеллита и промежуточных членов ряда монтицеллит–кирштейнит из минеральных ассоциаций, характерных для кимберлитов, карбонатитов, метаморфизованных известняков, магматических пород и шлаков, а также из реликтов ксенолитов термически измененных карбонатно-силикатных пород в Нилгинских паралавах. (1) паралавы Нилгинского комплекса, (2) обр. MN-1234-1, (3) карбонатиты (по: Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007), (4) кимберлиты (по: Abersteiner et al., 2017; Donge, 2019; Kopylova, 2021), (5) серпентиниты (по: Nozaka, 2020), (6) метаморфизованные мергелистые известняки из зоны контакта с базальтами траппов (по: Сокол и др., 2019), (7) пирометаллургические шлаки (по: Warchulski et al., 2016).

Fig. 6. Fragment of the Caol–Fa–Fo diagram with compositions of monticellite and members of the monticellite–kirschsteinite series from mineral assemblages in kimberlites, carbonatites, metamorphosed limestones, igneous rocks and slags, also from relict xenoliths of thermally modified carbonate-silicate rocks in Nyalga paralavas. (1) paralavas from Nyalga complex, (2) sample MN-1234-1, (3) carbonatites (after Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007), (4) kimberlites (after Abersteiner et al., 2017; Donge, 2019; Kopylova, 2021), (5) serpentinites (after Nozaka, 2020), (6) metamorphosed marly limestones from the contact zone with basalt traps (after Sokol et al., 2019); (7) pyrometallurgical slags (after Warchulski et al., 2016).

формировались, согласно экспериментально определенной поверхности сольвуса, в температурных интервалах 1050–800 и 1000–800°C соответственно, а в парабазальтах Челябинского угольного бассейна при 950–800°C (Sokol et al., 2002) (рис. 5, б).

В магматических и вулканических породах монтицеллит образует отдельные кристаллы (фенокристы, микролиты) и замещает ранние оливины ряда форстерит–фаялит. Кристаллизация монтицеллита в щелочных магматических породах может происходить при реакционном взаимодействии форстерита и карбонатного расплава (Abersteiner et al., 2018). Монтицеллит в кимберлитах и карбонатитах содержит не более 20 мол. % Kir (рис. 6). При низкотемпературных изменениях серпентинизированных перидотитов минералы ряда монтицеллит–кирштейнит (40–60 мол. % Kir) образуются в результате взаимодействия Ca-содержащего флюида и оливинов ряда форстерит–фаялит (Nozaka, 2020).

В Нилгинских паралавах встречаются монтицеллит и минералы ряда монтицеллит–кирштейнит, содержащие от первых процентов до 86 мол. % Kir (рис. 6). Такие оливины обнаружены в паралавах, содержащих реликты ксенолитов термически измененных карбонатно-силикатных пород. Для минеральных ассоциаций ксенолитов характерно присутствие геленита, который образуется, как было показано ранее (Peretyazhko et al., 2021), в процессе низкобарических и высокотемпературных изменений мергелистого известняка. Такой мелилит кристаллизуется также в высокотемпературных условиях мервинит-спурритовой фации метаморфизма, например, в переходной зоне между мергелистыми известняками и базальтами траппов (Сокол и др., 2019). Эти наблюдения позволяют сделать вывод, что в породах пирометаморфических комплексов Монголии минералы ряда монтицеллит–кирштейнит образовались в процессе реакцион-

ного взаимодействия недосыщенного по кремнезему и обогащенного Са мафического расплава, исходного для мелилит-нефелиновых паралав, с ксенолитами силикатно-карбонатных осадочных пород (мергелистых известняков), имеющих большие вариации концентрации примеси силикатного (глинисто-полевошпатового) вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мелилит-нефелиновые паралавы пирометаморфических комплексов Монголии содержат оливины с большими вариациями состава. В паралавах Хамарин-Хурал-Хида преобладают продукты распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит. Оливины Нилгинских паралав более разнообразны по составу и представлены минералами ряда форстерит–фаялит, продуктами распада твердого раствора, монтichelлитом и промежуточными членами ряда монтichelлит–кирштейнит. Оливины отличаются по текстурным особенностям, объемному соотношению Са-фаялита и кирштейнита, магнезиальности Mg# и температуре кристаллизации. Оливины из матрикса мелилит-нефелиновых паралав Монголии образовались в более широком интервале температуры по сравнению с таковыми из парабазальтов Челябинского угольного бассейна (1050–800 и 950–800°C, соответственно).

В Нилгинских паралавах в пределах одного образца встречаются реликты ксенолитов термически измененных осадочных карбонатно-силикатных пород, которые содержат минеральные ассоциации с геленитом, монтichelлитом и минералами ряда монтichelлит–кирштейнит с максимальным количеством минала Kig, достигающим 86 мол. %. Кальций-магнезиально-железистые оливины кристаллизовались при реакционном взаимодействии недосыщенного кремнеземом и обогащенного Са мафического расплава паралав с ксенолитами мергелистых известняков.

Работа выполнена при поддержке программы ФНИ 0284-2021-0006 и гранта 075-15-2022-1100 Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зайцев А.Н., Петров С.В. Карбонатиты вулкана Олдоньи Ленгаи, Северная Танзания / Щелочной магматизм, его источники и плюмы. Иркутск: Неаполь, **2008**. С. 59–70.

Ковдор / Ред. Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Апатиты: Минералы Лапландии, **2002**. 320 с.

Конев А.А., Самойлов В.С. Контактный метаморфизм и метасоматоз в ореоле Тажеранской щелочной интрузии. Новосибирск: Наука, **1974**. 246 с.

Олейников Б.В. Кирштейнит – вероятный продукт симплектического распада раннемагматического кальцийсодержащего гиалосидерита // Доклады АН. **1995**. Т. 342. № 1. С. 80–81.

Пирогенный метаморфизм / Ред. Сокол Э.В., Максимова Н.В., Нигматулина Е.Н., Шарыгин В.В., Калугин В.М. Новосибирск: СО РАН, **2005**. 284 с.

Перетяжко И.С. CRYSTAL – прикладное программное обеспечение для минералогов, петрологов, геохимиков // ЗВМО. **1996**. № 3. С. 141–148.

Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А., Карманов Н.С., Иванов А.В. Уникальные клинкеры и паралавы нового Нилгинского пирометаморфического комплекса в Центральной Монголии: минералого-геохимические особенности, условия формирования // Петрология. **2018**. Т. 26. № 2. С. 178–210.

Покровский П.В. Нашатырь из месторождения бурых углей Хамарин-Хурал-Хид в Монгольской Народной Республике // ЗВМО. **1949**. № 3. С. 38–45.

Савина Е.А., Перетяжко И.С., Хромова Е.А., Глушкова В.Е. Плавленные породы (клинкеры и паралавы) пирометаморфического комплекса Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия: минералогия, геохимия, процессы образования // Петрология. **2020**. Т. 28. № 5. С. 482–510.

Синяков В.И., Синякова Н.М. Монтichelлитовые скарны Горной Шории // ЗВМО. **1961**. № 6. С. 720–727.

Сокол Э.В., Полянский О.П., Семенов А.Н., Ревердатто В.В., Кох С.Н., Девятярова А.С., Колотов В.Ю., Хворов П.В., Бабичев А.В. Контактный метаморфизм на р. Кочумдек (бассейн р. Подкаменная Тунгуска, Восточная Сибирь): свидетельства режима течения расплава // Геология и геофизика. **2019**. Т. 60. № 4. С. 456–471.

Шарыгин В.В. Магнезиальный кирштейнит в мелилитолитах вулкана Пьян ди Челле, Умбрия, Италия http://alkaline2011.web.ru/2012/abstracts/SharyginV_rus.htm

**Minerals of the Olivine Group from Melilite–Nepheline
Paralavas of Combustion Metamorphic Complexes of Mongolia**

V. E. Glushkova^{a, *}, I. S. Peretyazhko^{a, b}, E. A. Savina^a, and E. A. Khromova^c

^a *Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia*

^b *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia*

^c *Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch RAS, Ulan-Ude, Russia*

^{*} *e-mail: glushkova@igc.irk.ru*

Olivine group minerals were formed in melilite-nepheline paralavas in two combustion metamorphic (CM) complexes as result of thermal alterations of sedimentary rocks caused by multistage current and quaternary wild coal fires. Products of decomposition of the olivine solid solution into Ca-bearing fayalite and kirschsteinite have been found in paralavas of the Khamaryn–Khural–Khiid CM complex. And, besides these two minerals, forsterite–fayalite, monticellite–kirschsteinite and simplectite intergrowths of kirschsteinite with nepheline were detected in paralavas of the Nyalga PM complex. Olivines are differing by their textural features, index value $Mg\# = Mg/(Mg + Fe)$ and their crystallization temperature as a consequence of local variations of formation conditions and composition of silica-undersaturated Ca-rich mafic initial melts of melilite–nepheline paralavas. Olivines of the monticellite–kirschsteinite series containing up to 86 mol. % of kirschsteinite end-member occur only in paralavas containing xenoliths of thermally modified carbonate–silicate sedimentary rocks. Crystallization of these olivines together with gehlenitic melilite took place in the process of reactionary interaction between mafic paralava melts and xenoliths of marly limestones with large variations in contents of silicate (clay–feldspar) admixture.

Keywords: kirschsteinite, monticellite, Nyalga and Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complexes, Mongolia

REFERENCES

- Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Graham Pearson D., Kamenetsky M., Karsten G., Ehrig K., Rodemann T. Monticellite in group-I kimberlites: Implications for evolution of parental melts and post-emplacement CO₂ degassing. *Chem. Geol.* **2018**. Vol. 478. P. 76–88.
- Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Goemann K., Kjarsgaard B.A., Fedortchouk Y., Ehrig K., Kamenetsky M. Evolution of kimberlite magmas in the crust: A case study of groundmass and mineral-hosted inclusions in the Mark kimberlite (Lac de Gras, Canada). *Lithos.* **2020**. Vol. 372–373. 105690.
- Andersen T., Elburg M., Erambert M. Petrology of combeite- and götzenite-bearing nephelinite at Nyiragongo, Virunga Volcanic Province in the East African Rift. *Lithos.* **2012**. Vol. 152. P. 105–121.
- Boari E., Conticelli S. Mineralogy and petrology of associated Mg-rich ultrapotassic, shoshonitic, and calc-alkaline rocks: the Middle Latin Valley monogenetic volcanoes, Roman Magmatic Province, southern Italy. *Canad. Miner.* **2007**. Vol. 45. P. 1443–1469.
- Burg A., Stravinsky A., Bartov Y., Kolodny Y. Geology of the Hatrurim formation (“Mottled Zone”) in the Hatrurim basin. *Isr. J. Earth Sci.* **1991**. Vol. 40. P. 107–124.
- Chalapathi Rao N.V., Reed S.J.B., Pyle D.M., Beattie P.D. Larnitic kirschsteinite from the Kotakonda kimberlite, Andhra Pradesh, India. *Miner. Mag.* **1996**. Vol. 60. P. 513–516.
- Combustion metamorphism. Ed. by Sokol E.V., Maksimova N.V., Nigmatulina E.N., Sharygin V.V., Kalugin V.M. Novosibirsk: SB RAS, **2005**. 284 p. (*in Russian*).
- Davidson P.M., Mukhopadhyay D.K. Ca-Fe-Mg olivines: phase relations and a solution model. *Contrib. Miner. Petrol.* **1984**. Vol. 86. P. 256–263.
- Dongre A., Tappe S. Kimberlite and carbonatite dykes within the Premier diatreme root (Cullinan Diamond Mine, South Africa): New insights to mineralogical-genetic classifications and magma CO₂ degassing. **2019**. *Lithos.* Vol. 338–339. P. 155–173.
- D’Orazio M., Innocenti F., Tonarini S., Dogliani C. Carbonatites in a subduction system: The Pleistocene alvikites from Mt. Vulture (southern Italy). *Lithos.* **2007**. Vol. 98. P. 313–334.
- Erdensogt B., Lee I., Bat-Erdene D., Jargal L. Mongolian coal-bearing basins: geological settings, coal characteristics, distribution, and resources. *Int. J. Coal. Geol.* **2009**. Vol. 80. P. 87–104.

- Folco L., Mellini M. Crystal chemistry of meteoritic kirschsteinite. *Eur. J. Miner.* **1997**. Vol. 9. P. 969–973.
- Jambon A., Boudouma O., Fonteilles M., Le Guillou C., Badia D., Barrat J.-A. Petrology and mineralogy of the angrite Northwest Africa 1670. *Meteorit. Planet. Sci.* **2008**. Vol. 43. N 11. P. 1783–1795.
- Kahn J.S., Smith D.K. Mineralogical investigations in the debris of the Gnome event near Carlsbad, New Mexico. *Amer. Miner.* **1966**. Vol. 51. P. 1192–1199.
- Konev A.A., Samoilov V.S. Contact metamorphism and metasomatism in the halo of the Tagheran alkaline intrusion. Novosibirsk: Nauka, **1974**. 246 p. (in Russian).
- Kopylova M.G., Ma F., Tso E. Constraining carbonation freezing and petrography of the carbonated cratonic mantle with natural samples. *Lithos.* **2021**. Vol. 388–389. 106045.
- Kovdor. Ed. by Ivanyuk G.U., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Ya.A. Miner-chem. company “EuroChem” [and others]. Apatites: Minerals of Lapland, **2002**. 320 p. (in Russian).
- Lustrino M., Ronca S., Caracausic A., Bordenca C.V., Agostinie S., Faraone D.B. Strongly SiO₂-undersaturated, CaO-rich kamaufugitic Pleistocene magmatism in Central Italy (San Venanzo volcanic complex) and the role of shallow depth limestone assimilation. *Earth Sci. Rev.* **2020**. Vol. 208. 103256.
- MacPherson G.J., Nagashima K., Krot A.N., Doyle P.M., Ivanova M.A. Mn-Cr chronology of Ca-Fe silicates in CV3 chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **2017**. Vol. 201. P. 260–274.
- Melluso L., Conticelli S., de’ Gennaro R. Kirschsteinite in the Capo di Bove melilite leucite lava (cecilite), Alban Hills, Italy. *Miner. Mag.* **2010**. Vol. 74. P. 887–902.
- Mikouchi T., Takeda H., Miyamoto M., Ohsumi K., McKay G.A. Exsolution lamellae of kirschsteinite in magnesium-iron olivine from an angrite meteorite. *Amer. Miner.* **1995**. Vol. 80. P. 585–592.
- Nagata J. Magnessioferrite-olivine rock and monticellite-bearing dunite from the Iwanai-dake alpine-type peridotite mass in the Kamuikotan structural belt, Hokkaido, Japan. *J. Japan Assoc. Miner. Petrol. Econ. Geol.* **1982**. Vol. 77. P. 23–31.
- Nozaka T. Fe-monticellite in serpentinites from the Happo ultramafic complex. *Lithos.* **2020**. Vol. 374–375. 105686.
- Oleinikov B.V. Kirschsteinite is a probable product of symplectic decay of early magmatic calcium-containing hyalosiderite. *Doklady Earth Sci.* **1995**. Vol. 342. N 1. P. 80–81 (in Russian).
- Peretyazhko I.S. CRYSTAL—applied software for mineralogist, petrologist, and geochemists. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1996**. N 3. P. 141–148 (in Russian).
- Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex of Choir-Nyalga Basin (Central Mongolia): chemistry, mineral assemblages, and formation conditions. *Miner. Mag.* **2017**. Vol. 81. N 4. P. 949–974.
- Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A., Karmanov N.S., Ivanov A.V. Unique clinkers and paralavas from a new Nyalga combustion metamorphic complex in central Mongolia: mineralogy, geochemistry, and genesis. *Petrology.* **2018**. Vol. 26. N 2. P. 181–211 (in Russian).
- Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Low-pressure (>4 MPa) and high-temperature (>1250°C) incongruent melting of marl limestone: formation of carbonate melt and melilite–nepheline paralava in the Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complex, East Mongolia. *Contrib. Miner. Petrol.* **2021**. Vol. 176:38
- Pokrovskii P.V. Ammonium chloride from the Khamaryn–Khyral–Khiid brown coal field in Mongolia. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1949**. N 3. P. 38–45 (in Russian).
- Sahama Th.G., Hytönen K. Kirschsteinite, a natural analogue of synthetic iron monticellite, from the Belgian Congo. *Miner. Mag.* **1957**. Vol. 31. P. 698–699.
- Savina E.A., Peretyazhko I.S., Khromova E.A., Glushkova V.E. Melted rocks (clinkers and paralavas) of Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complex in Eastern Mongolia: mineralogy, geochemistry and genesis. *Petrology.* **2020**. Vol. 28. N 5. P. 482–510 (in Russian, English translation: *Petrology.* **2020**. Vol. 28. N 5. P. 431–457).
- Sharygin V.V. Magnesian kirschsteinite in the melilites of the volcano Pian di Celle, Umbria, Italy http://alkaline2011.web.ru/2012/abstracts/SharyginV_rus.htm (in Russian).
- Sinyakov V.I., Sinyakova N.M. Monticellite scars of the Mountain Shoria. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1961**. N 6. P. 720–727 (in Russian).
- Sokol E., Sharygin V., Kalugin V. et al. Fayalite and kirschsteinite solid solutions in melts from burned spoil-heaps, South Urals, Russia. *Eur. J. Miner.* **2002**. Vol. 14. P. 795–807.
- Sokol E.V., Polyansky O.P., Semenov A.N., Reverdatto V.V., Kokh S.N., Devyatyyarova A.S., Kolobov V.Yu., Khvorov P.V., Babichev A.V. High-grade contact metamorphism in the Kochumdek river valley (Pod-

kamennaya Tunguska basin, East Siberia): evidence for magma flow. *Russian Geol. Geophys.* **2019**. Vol. 60. N 4. P. 456–471 (*in Russian*).

Stoppa F., Lupini L. Mineralogy and petrology of the Polino monticellite calcicocarbonatite (Cental Italy). *Miner. Petrol.* **1993**. Vol. 49. P. 213–231.

Tappe S., Steenfelt A., Heaman L.M., Simonetti A. The newly discovered Jurassic Tikiussa carbonatite-aillikite occurrence, West Greenland, and some remarks on carbonatite-kimberlite relationships. *Lithos.* **2009**. Vol. 112S. P. 385–399.

Warchulski R., Gawęda A., Janeczek J., Kądziołka-Gaweł M. Mineralogy and origin of coarse-grained segregations in the pyrometallurgical Zn-Pb slags from Katowice-Wełnowiec (Poland). *Miner. Petrol.* **2016**. Vol. 110 P. 681–692.

Zaitsev A.N., Petrov S.V. Carbonatites of the Oldonyi Lengai volcano, Northern Tanzania. In: *Alkaline magmatism, its sources and plumes*. Irkutsk: Naples, **2008**. P. 59–70 (*in Russian*).

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МИНЕРАЛЫ СТРОНЦИЯ И БАРИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОДАХ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО ИЙОЛИТ-СИЕНИТ-КАРБОНАТИТОВОГО МАССИВА (ЮГО-ЗАПАДНАЯ ОКРАИНА СИБИРСКОГО КРАТОНА)

© 2023 г. Д. члены В. Б. Савельева¹, *, Е. П. Базарова¹, **, Е. А. Хромова², ***

¹Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

²Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
ул. Сахьяновой, 6а, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: vsavel@crust.irk.ru

**e-mail: bazarova@crust.irk.ru

***e-mail: lena.khromova.00@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Охарактеризованы Sr- и Ba-содержащие минералы в мельтейгите, ийолитах, уртите и нефелиновых сиенитах Большектагнинского ийолит-сиенит-карбонатитового массива. На магматической стадии стронций входит в виде изоморфной примеси в кальцит (SrO 0.5–1.9 мас. %) и фторапатит (SrO 0.6–2.6 мас. %), а барий — преимущественно во флогопит и аннит. Зональный флогопит в уртите содержит до 8.4 мас. % BaO (24 мол. % киношталитового компонента); интерстициальный кальцит в этой же породе содержит мелкие вростки карбоната Ba и Ca. На высокотемпературной постмагматической стадии происходила кристаллизация стрональсита, стронцианита, кричтонита, генримейерита, барита, целестина, Sr-содержащего фторкальциопирохлора, Sr-содержащих мусковита и эпидота. В экзоконтактной зоне карбонатитового штока ийолиты и нефелиновые сиениты претерпели биотитизацию, карбонатизацию и калишпатизацию, с последующей хлоритизацией и образованием на отдельных участках скоплений и прожилков гиалофана и цельзиана. На низкотемпературной гидротермальной стадии происходило также образование Ba-содержащего мусковита и Ba-содержащих гидроксидов марганца. Присутствие в измененных щелочных породах гиалофана и цельзиана является особенностью Большектагнинского массива, указывающей на низкую активность SO_4^{2-} в гидротермальных растворах.

Ключевые слова: Большектагнинский массив, Урикско-Ийский грабен, бариевый флогопит, стрональсит, генримейерит, гиалофан, цельзиан

DOI: 10.31857/S0869605523010094, **EDN:** NIABNS

ВВЕДЕНИЕ

Щелочноземельные элементы Sr и Ba, наряду с P, Nb, Ta, Zr, REE, являются характерными химическими элементами ультраосновных щелочных комплексов с карбонатитами. Будучи близкими по химическим свойствам, при кристаллизации силикатных расплавов эти элементы ведут себя по-разному: стронций проявляет химическое сродство с кальцием, а барий — с калием. На ранних стадиях кристаллизации расплавов Sr и Ba обычно не образуют собственных фаз, а в виде изоморфных примесей входят в

состав породообразующих и аксессуарных минералов, однако на постмагматической стадии могут образовываться самостоятельные стронциевые и бариевые минералы (Магматические..., 1984). С поздними карбонатитами в комплексах щелочных ультраосновных пород в некоторых случаях связаны проявления барита и стронцианита (Капустин, 1971; Фролов и др., 2003).

Большетагнинский ийолит-сиенит-карбонатитовый массив, расположенный на юго-восточной окраине Сибирского кратона, входит в состав позднерифейского зиминского щелочного комплекса, с которым связаны крупные запасы Nb, Ta, REE, U, Pb, Zn, флюорита и микроклина (Фролов, Белов, 1999). Щелочные силикатные породы массива характеризуются, в целом, высоким содержанием Sr (840–2900 ppm) и сильно варьирующим содержанием Ba (180–35800 ppm). В них обнаружены стрональзит, стронцианит, бариевый флогопит, баритокальцит, генримейрит, гиалофан, целъзиан. Целью работы являлась характеристика поведения Ba и Sr на разных стадиях формирования и преобразования массива. Основное внимание уделялось щелочным породам, отличающимся наибольшим разнообразием минералов Ba и Sr.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И СТРОЕНИЕ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МАССИВА

Большетагнинский массив принадлежит к Восточно-Саянской щелочной провинции, выделяемой на юго-западной окраине Сибирского кратона, в зоне сочленения кратона с Алтае-Саянской складчатой областью (Андреева и др., 1984). Массив располагается в пределах Урикско-Ийского грабена, выполненного осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями нижнего протерозоя и нижнего рифея (Гладкочуб и др., 2014) (рис. 1, а). Щелочные породы зиминского комплекса в грабене представлены массивами ийолит-мельтейгитов, нефелиновых сиенитов и карбонатитов – Белозиминским, Среднезиминским и Большетагнинским, а также дайками ультрамафических лампрофиров, пикритовых порфиритов, нефелинитов и трубками взрыва. С Большетагнинским массивом связано среднее по запасам месторождение Nb, а также скопления микроклина и флюорита (Пикалова, 2017).

Обнаженность Большетагнинского массива плохая. Согласно работам предшественников (Кожевников и др., 1974; Фролов, Белов, 1999), массив имеет правильную округлую форму, диаметр около 4 км и зонально-кольцевое строение, обусловленное последовательным формированием серии пород: ийолиты-мельтейгиты, нефелиновые сиениты, субщелочные калишпатовые сиениты, пикритовые порфириты, карбонатиты (рис. 1, б). В современном эрозионном срезе среди щелочных пород преобладают ийолиты, которые, как правило, биотитизированы, калишпатизированы и карбонатизированы, особенно в экзоконтактовом ореоле карбонатитового штока. Отличительной чертой Большетагнинского массива является широкое развитие субщелочных калишпатовых сиенитов, которые некоторыми исследователями рассматриваются как метасоматиты (микроклиниты) (Пикалова, 2017). Кальцитовые карбонатиты слагают шток площадью около 3.8 км² в западной части массива; к центральной части штока приурочены зоны флюоритизации. Дайки пикритовых порфиритов образуют тела мощностью до 20 м и протяженностью до нескольких сотен метров. Начало формирования даек приходится на докарбонатитовый этап, часть даек интракарбонатитовые. Пироклорная минерализация приурочена, главным образом, к зонам катаклаза, перекристаллизации и апатитизации, захватывающим преимущественно калишпатовые сиениты, а также слюдитам (рис. 1, в).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диагностика минералов и изучение их химического состава выполнены на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энерго-

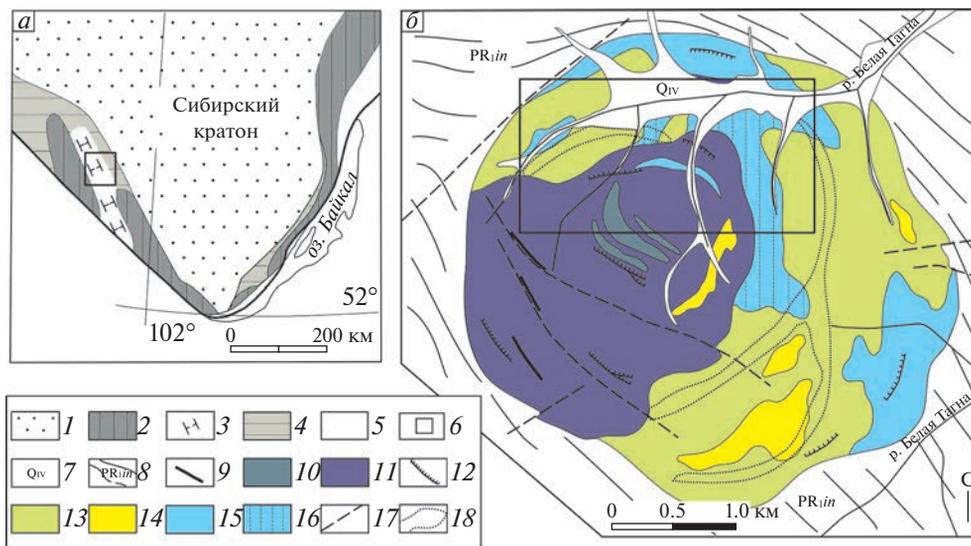


Рис. 1. Схемы геологического строения южной части Сибирского кратона (а) и Большетагнинского массива по (Фролов, Белов, 1999) с упрощением (б).

а: 1 – фанерозойский осадочный чехол; 2 – раннедокембрийские выступы фундамента; 3 – палеопротерозойский Урикско-Ийский грабен; 4 – отложения неопротерозойской окраины кратона; 5 – Центрально-Азиатский складчатый пояс; 6 – местонахождение Большетагнинского массива; б: 7 – кайнозойские отложения; 8 – ингашинская свита PR₁: сланцы, песчаники, кварциты, доломиты; 9 – гематитовые рудные тела; 10 – кальцитовые карбонатиты с флюоритом и гематитом; 11 – кальцитовые карбонатиты крупнозернистые и мелкозернистые; 12 – пикритовые порфириты; 13 – калишпатовые субщелочные сиениты, 14 – нефелиновые сиениты; 15 – ийолиты и мельтейгиты; 16 – карбонатизированные, биотитизированные, калишпатизированные ийолиты, калишпат-биотит-кальцитовые и биотит-кальцитовые породы (слюдиты) по (Кожевников и др., 1974); 17 – разломы; 18 – апатит-пироксеновые руды. На рис. б прямоугольником показан участок работ.

Fig. 1. Geological schemes of the southern part of the Siberian craton (а) and the Bolshetagninsky massif after (Frolov, Belov, 1999), simplified (б).

а: 1 – Phanerozoic sedimentary cover; 2 – projections of the Early Precambrian basement; 3 – Paleoproterozoic Uriksko-Iysky graben; (4) rocks of the Neoproterozoic margin of the craton; 5 – Central Asian folded belt; 6 – location of the Bolshetagninsky massif; б: 7 – Cenozoic deposits; 8 – Ingashinskaya formation PR₁: shales, sandstones, quartzites, dolomites; 9 – hematite ore bodies; 10 – calcite carbonatites with fluorite and hematite; 11 – coarse-grained and fine-grained calcite carbonatites; 12 – picrite porphyrites; 13 – K-feldspar subalkaline syenites, 14 – nepheline syenites; 15 – ijolites and melteigites; 16 – carbonatized, biotitized, K-feldspathized ijolites, K-feldspar-biotite-calcite and biotite-calcite rocks, after (Kozhevnikov et al., 1974); 17 – faults; 18 – apatite-pyroxene ores. On Fig. б rectangle shows the studied area.

дисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания) в ЦКП “Геоспектр” ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Определение содержаний Ва и Sr в породах выполнено в ЦКП “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН (г. Иркутск) методом рентгенофлуоресцентного анализа, аналитик Е.В. Худоногова.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД МАССИВА

Наши работы проводились в северной части массива, кроме того, изучались образцы из керна скважин. Мельтейгит (рис. 2, а) представляет собой мелкозернистую по-

роду; главными минералами являются диопсид ($\text{Di}_{66-78}\text{Aeg}_{13-24}\text{Ged}_{5-18}$) и кальцит, второстепенными калиевый полевой шпат, серицитизированный минерал (предположительно, нефелин), титаномagnetит, титансодержащий андрадит, флогопит ($X_{\text{Mg}} 0.69-0.76$). Ийолиты (рис. 2, б) средне-крупнозернистые породы, нередко пятнистые с обособлениями кальцита. Они сложены измененным нефелином (30–55%), диопсидом $\text{Di}_{49-86}\text{Ged}_{8-35}\text{Aeg}_{0-23}$ (25–40%), титансодержащим андрадитом (5–25%), кальцитом (10–40%). Вторичные минералы по нефелину представлены канкринитом, калиевым полевым шпатом, серицитом/мусковитом, реже мейонитом. Титансодержащий андрадит развивается по границам зерен диопсида, кальцита и нефелина. В промежутках между зернами клинопироксена присутствует биотит ($X_{\text{Mg}} 0.39-0.44$), отмечается рихтерит. Акцессорные минералы представлены апатитом, магнетитом, титаномagnetитом, титанитом, рутилом, баритом и др.

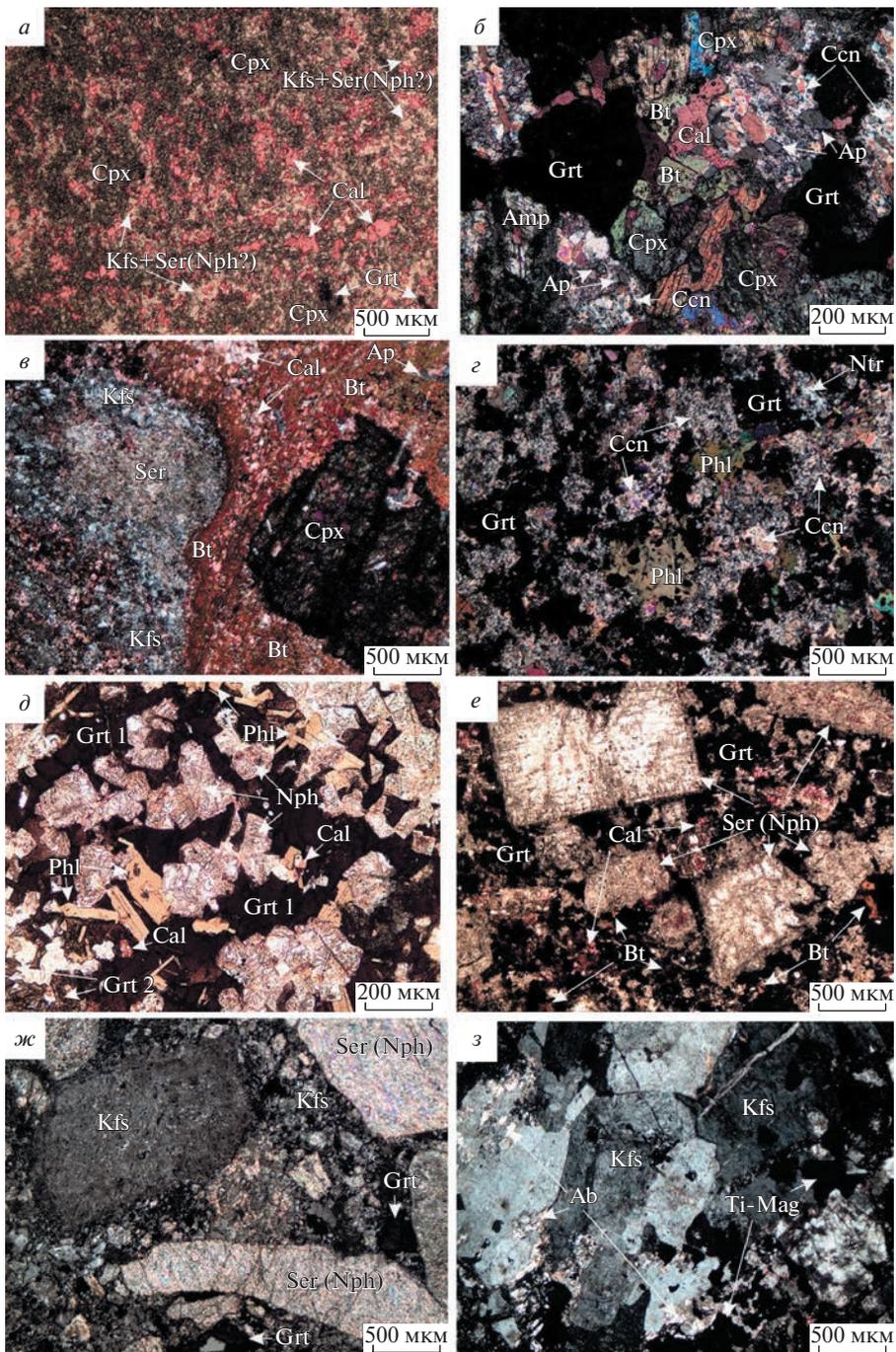
В северной части массива неизменные ийолиты встречаются редко. В основном они в разной степени замещены кальцитом, биотитом, калиевым полевым шпатом (рис. 2, в). Титансодержащий андрадит преобразован в агрегат рутила, андрадита и/или магнетита; нефелин нацело замещен серицитом (мусковитом), калиевым полевым шпатом, кальцитом.

Редкой породой, обнаруженной среди ийолитов, является уртит. Из-за очень плохой обнаженности массива морфология слагаемого уртитом тела не ясна, возможно, это жила. Уртит (рис. 2, г) представляет собой мелкозернистую мезократовую породу, сложенную канкринитизированным нефелином (70–75%), гранатом (12–15%), флогопитом (5–7%), кальцитом, с акцессорными перовскитом, апатитом, титаномagnetитом, титанитом, флюоритом и др. Реликты неизменного нефелина встречаются только во включениях в гранате (рис. 2, д). Кроме канкринита в состав продуктов замещения нефелина входят мусковит и стрональсит. Гранат представлен двумя генерациями (рис. 2, д). Титансодержащий андрадит ранней генерации выполняет промежутки между зернами нефелина и флогопита; андрадит или гроссуляр-андрадит поздней генерации обрастает зерна граната ранней генерации, перовскита, замещает титаномagnetит, кальцит, канкринит, флогопит.

Нефелиновые сиениты слагают участки среди калишпатовых сиенитов. Это средне-крупнозернистые породы, сложенные зернами нефелина, замещенного серицитом, промежутки между которыми выполнены калиевым полевым шпатом, мелким серицитизированным нефелином, кальцитом и редкими зернами клинопироксена, замещаемого кальцитом и хлоритом и сохранившимся только в реликтах.

Нефелиновые сиенит-порфиры (рис. 2, е, ж) встречаются в виде жил и даек мощностью до 2.5 м среди ийолитов. Породы имеют варьирующий минеральный состав: серицитизированный нефелин 20–50%, калиевый полевой шпат 5–35%, клинопироксен – титанистый авгит (TiO_2 3.1–3.8 мас. %, Al_2O_3 7.4–8.8 мас. %) и диопсид ($\text{Di}_{72-76}\text{Ged}_{20-25}\text{Aeg}_3$) 0–25%, аннит ($X_{\text{Mg}} 0.30-0.42$) 5–20%, гранат (титансодержащий андрадит, андрадит, андрадит-гроссуляр) до 20%, кальцит до 10%. Вкрапленники величиной до 8 мм образованы нефелином, в некоторых жилах также клинопироксеном или калиевым полевым шпатом. Акцессорные минералы представлены титаномagnetитом, магнетитом, апатитом, рутилом, цирконом, флюоритом, баритом и др. Измененный нефелин встречается только в виде реликтов в гранате; гранат содержит также включения титаномagnetита, биотита, калиевого полевого шпата и др. Клинопироксен частично или полностью замещен биотитом, хлоритом, кальцитом. Породы нередко катаклазированы; в них проявлены карбонатизация и замещение серицитизированного нефелина калиевым полевым шпатом.

Эгириновые сиениты, согласно О.К. Кожевникову и др. (1974), образуют небольшие поля среди нефелиновых и калишпатовых сиенитов. Образец из керна сложен ка-



←
Рис. 2. Основные разновидности изученных пород (фотографии прозрачных шлифов).

a – мельтейгит; *б* – ийолит; нефелин полностью замещен канкринитом; *в* – карбонатизированный и биотитизированный ийолит с нефелином, замещенным серицитом/мусковитом и калиевым полевым шпатом; *з*, *д* – уртит; на рис. *д* нефелин среди титаносодержащего андрадита частично или полностью замещен канкринитом, серицитом/мусковитом, стрональситом; *е*, *ж* – нефелиновый сиенит-порфир (*ж* – катаклазированный), нефелин замещен серицитом/мусковитом; *з* – калишпатовый сиенит катаклазированный. Ab – альбит, Adr – андрадит, Amp – амфибол, Ann – аннит, Ap – апатит, Ba-cal – баритокальцит, Ba Fs – бариевый полевой шпат, Ba-Mn ox – Ba-содержащие гидроксиды Mn, Ba Ms – Ba-содержащий мусковит, Brt – барит, Bt – биотит, Cal – кальцит, Ccn – канкринит, Chl – хлорит, Cpx – клинопироксен, Csl – цельзиан, Fkns – феррокиношталит, Grt – гранат (Grt 1 – гранат ранней генерации, титаносодержащий андрадит, Grt 2 – гранат поздней генерации, андрадит, гроссуляр-андрадит), Hm – генримейерит, Hy – гиалофан, Kfs – калиевый полевой шпат, K-Ba Fs – барийсодержащий калиевый полевой шпат, Kns – киношталит, Ms – мусковит, Nph – нефелин, Ntr – натролит, Pcl – пирохлор, Phl – флогопит, Pph – пиропанит, Prv – перовскит, Rt – рутил, Ser – серицит, Str – стронцианит, Sts – стрональсит, Ti-Mag – титаномagnetит, Ttn – титанит.

Fig. 2. Main varieties of studied rocks (photographs of thin sections).

a – melteigite; *b* – ijolite; nepheline is completely replaced by cancrinite; *v* – carbonatized and biotitized ijolite with nepheline replaced by sericite/muscovite and K-feldspar; *z*, *d* – urtite; in Fig. *d* nepheline among titanium-bearing andradite is partially or completely replaced by cancrinite, sericite/muscovite, stromalosite; *e*, *ж* – nepheline syenite porphyry (*ж* – cataclased), nepheline is replaced by sericite/muscovite; *z* – cataclased K-feldspar syenite. Ab – albite, Adr – andradite, Amp – amphibole, Ann – annite, Ap – apatite, Ba-cal – barytocalcite, Ba Fs – barium feldspar, Ba-Mn ox – Ba-containing Mn hydroxides, Ba Ms – Ba-containing muscovite, Brt – barite, Bt – biotite, Cal – calcite, Ccn – cancrinite, Chl – chlorite, Cpx – clinopyroxene, Csl – celsian, Fkns – ferrokinoshitalite, Grt – garnet (Grt 1 – early generation garnet, titanium-bearing andradite, Grt 2 – late generation garnet, andradite, grossular andradite), Hm – henrimeyerite, Hy – hyalophane, Kfs – potassium feldspar, K-Ba Fs – barium-bearing potassium feldspar, Kns – kinoshitalite, Ms – muscovite, Nph – nepheline, Ntr – natrolite, Pcl – pyrochlore, Phl – phlogopite, Pph – pyrophanite, Prv – perovskite, Rt – rutile, Ser – sericite, Str – strontianite, Sts – stromalosite, Ti-Mag – titanomagnetite, Ttn – titanite.

лиевым полевым шпатом (65–70%) и эгирином (25–30%), с аксессуарными фторапатитом, минералом группы пирохлора, монацитом, баритом, стронцианитом.

Калишпатовые сиениты (рис. 2, *з*) представляют собой лейкократовые породы, преимущественно неравномернозернистые, катакlastической или брекчиевидной структуры. Они почти нацело сложены калиевым полевым шпатом, темноцветные минералы представлены титаномagnetитом и magnetитом. Брекчирование сопровождалось перекристаллизацией калиевого полевого шпата в мелкозернистый агрегат, его замещением альбитом и побурением. В экзоконтактном ореоле карбонатитового штока в калишпатовых сиенитах проявлена карбонатизация.

Кальцитовые карбонатиты варьируют от мелко- до крупнозернистых. Среди зерен кальцита наблюдаются скопления апатита, отмечаются доломит, альбит, диопсид, эгирин, magnetит, минерал группы пирохлора, бурбанкит, стронцианит.

Слюдиты, образующие залежи на контакте ийолитов и карбонатитов, сложены биотитом (X_{Mg} 0.31–0.46), кальцитом и в переменном количестве калиевым полевым шпатом; они часто содержат реликты серицитизированного нефелина, хлоритизированного клинопироксена, альбит, железистый доломит, апатит, минерал группы пирохлора, пирит, пирротин. Апатитизация проявлена в виде прожилков и гнезд; содержание апатита достигает 40%. Наиболее поздними гидротермально-метасоматическими образованиями являются гематитовые жилы.

SR-СОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ

Наиболее распространенными Sr-содержащими минералами в породах Большететинского массива являются кальцит и фторапатит. *Кальцит* содержит 0.5–1.9 мас. % SrO; количество FeO составляет 0.3–0.7 мас. %, MnO – 0.3–0.6 мас. %. Содержание SrO в *фторапатите* составляет 0.6–1.9 мас. %; зональность в зернах фторапатита не выявлена.

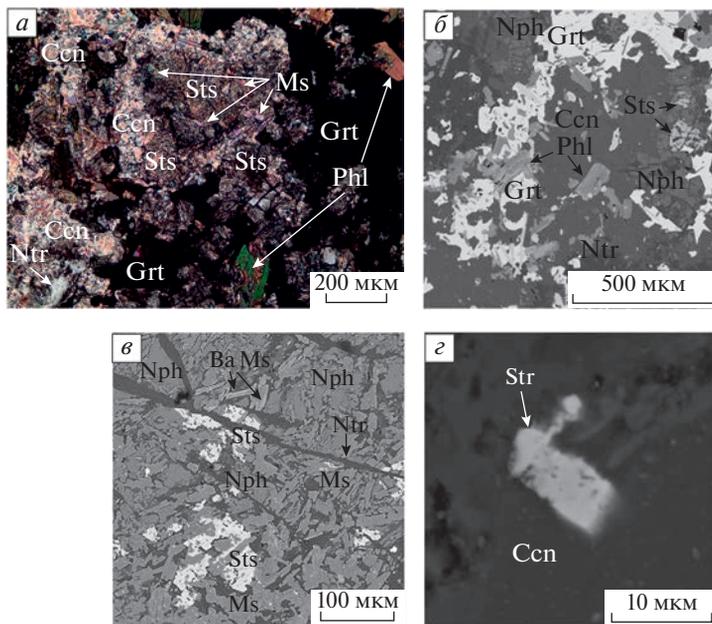


Рис. 3. Минералы Sr в породах массива.

a, б – стрональсит, в ассоциации с мусковитом и канкринитом замещающий нефелин в уртите; *в* – прожилки натролита, секущие стрональсит и мусковит; *г* – стронцианит среди канкринита; *д* – зональный пироклор в апатитовом метасоматите. *a* – фотография прозрачного шлифа, *б–д* – изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

Fig. 3. Strontium-bearing minerals in rocks of the massif.

a, б – stronalsite, in association with muscovite and cancrinite, replacing nepheline in urtite; *в* – natrolite veinlets intersecting stronalsite and muscovite; *г* – strontianite among cancrinite; *д* – zoned pyrochlore in apatite metasomatite. *a* – photograph of thin section, *б–д* – BSE-images.

Стрональсит обнаружен в уртите, где в ассоциации с мусковитом и канкринитом является продуктом замещения зерен нефелина (рис. 3, *a, б*, табл. 1). Канкринит, в свою очередь, замещается натролитом (табл. 1), а стрональсит сечется трещинками, выполненными натролитом (рис. 3, *в*), что указывает на более раннее образование стрональсита по отношению к цеолиту. Количество Sr в минерале составляет 0.89–0.96 к.ф., Ba – 0.02–0.07 к.ф., сумма (Sr + Ba) – 0.92–1.01 к.ф., дефицит катионов дополняется Ca. Отношение Si/Al в анализах близко к стехиометрическому или несколько превышает его (1.04–1.08). На долю стрональсита $\text{SrNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ приходится 89–96 мол. %, банальсита $\text{BaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ 2–7 мол. % и лисетита $\text{CaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ 0–8 мол. %.

В некоторых анализах *мусковита*, замещающего нефелин в нефелиновых сиенитах и ийолитах, присутствует примесь SrO в количестве до 1.9 мас. % (табл. 1, ан. 7). В ассоциации с мусковитом и манганильменитом отмечен *эпидот*, содержащий 2.5 мас. % SrO. *Кричтонит*, вторичный минерал по титаномagnetиту и титансодержащему андрадиту, содержит 7.0 мас. % SrO (табл. 2, ан. 1).

Минералы группы *пироклора* в изученных нефелинсодержащих породах являются редкими, в то же время они распространены в апатитизированных калишпатовых сиенитах, слюдитах, карбонатитах (рис. 3, *д*). В соответствии с современной классификацией (Atencio et al., 2010) это преимущественно фторкальциопироклор. Содержание

Таблица 1. Химический состав (мас. %) нефелина и продуктов его замещения
Table 1. Chemical composition (wt %) of nepheline and products of its alteration

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	41.18	34.79	40.03	39.21	39.71	47.15	43.27	42.12
Al ₂ O ₃	34.11	28.68	32.08	31.95	32.54	25.92	37.04	37.36
Fe ₂ O ₃	0.97		0.44	0.89	0.83	0.39	0.89	1.17
MgO							0.44	
CaO	0.28	7.39	1.29	1.11	0.73			
SrO			16.31	15.72	15.61		1.90	
BaO				1.69	0.51		0.78	3.46
Na ₂ O	14.49	17.94	9.10	9.04	9.15	14.75		
K ₂ O	8.71				0.25		11.27	11.40
SO ₃		0.67						
Сумма	99.74	89.47	99.97	99.61	99.33	88.21	95.59	95.51
Расчет*	O=4	O=26	O=16	O=16	O=16	O=10	O=11	O=11
Коэффициенты в формулах								
Si	1.01	6.21	4.07	4.03	4.05	3.04	2.93	2.89
Al	0.98	6.06	3.85	3.87	3.91	1.97	2.96	3.02
Fe ³⁺	0.02		0.03	0.07	0.06	0.02	0.05	0.06
Mg							0.04	
Ca	0.01	1.41	0.14	0.12	0.08			
Sr			0.96	0.94	0.92		0.07	
Ba			0.03	0.07	0.02		0.02	0.09
Na	0.69	6.21	1.79	1.80	1.81	1.85		
K	0.27				0.03		0.97	1.00
S		0.09						

Примечание. 1 – нефелин, 2 – канкринит, 3–5 – стрональсит, 6 – натролит, 7, 8 – мусковит. Fe₂O₃ расчетное. Расчет* – способ расчета коэффициентов в кристаллохимических формулах: O – количество атомов кислорода.

TiO₂ в анализах варьирует от 2.8 до 16.6 мас. %, Ta₂O₅ ниже пределов обнаружения, количество SrO составляет 0.7–4.6 мас. % (табл. 2, ан. 2).

Стронцианит отмечен в уртите в виде мелких (около 10 мкм) включений в минералах группы канкринита, замещающих нефелин (рис. 3, з). В эгириновом сиените стронцианит (табл. 2, ан. 3) в ассоциации с баритом образует включение в кальците. В карбонатите стронцианит обнаружен в ассоциации с *бурбанкитом* (табл. 2, ан. 4).

Распространенным минералом в породах массива является *барит*, содержащий 0.8–6.6 мас. % SrO. В ийолитах и нефелиновых сиенитах барит встречается в виде включений в гранате, калиевом полевом шпате, кальците, в ассоциации с биотитом, хлоритом, мусковитом и др. *Целестин* (SrO 54.3 мас. %) отмечен в виде включения в скаполите, заместившем нефелин в ийолите. *Флюорит*, наблюдающийся среди зерен кальцита в уртите и нефелиновом сиените, содержит 0.4–0.5 мас. % SrO.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) аксессуарных минералов Sr и Ba
Table 2. Chemical composition (wt %) of Sr- and Ba-bearing accessory minerals

Компоненты	1	2	3	4	5
Nb ₂ O ₅		44.96			
SiO ₂	2.82	2.95			
TiO ₂	54.63	14.83			
Al ₂ O ₃	0.93				
La ₂ O ₃		2.09		1.30	
Ce ₂ O ₃	0.94	3.03		1.18	
Fe ₂ O ₃	25.18	0.60			
MnO	2.70				
CaO	4.02	20.34	8.03	11.89	19.24
ZnO	1.85				
SrO	7.02	4.58	59.95	33.81	
BaO				9.22	51.66
Na ₂ O		4.37		8.53	
F		5.40			
—O(F)		2.27			
Сумма	100.09	100.88	67.98	65.93	70.90
Расчет	O=38	Σ _{кат} =2	Σ _{кат} =1	Σ _{кат} =6	Σ _{кат} =2
Nb		1.17			
Si	0.82	0.17			
Ti	11.97	0.64			
Al	0.32				
La		0.04		0.05	
Ce	0.10	0.06		0.05	
Fe ³⁺	5.52	0.03			
Mn	0.67				
Ca	1.25	1.25	0.20	1.43	1.01
Zn	0.40				
Sr	1.19	0.15	0.80	2.20	
Ba				0.41	0.99
Na		0.49		1.86	
F		0.98			

Примечание: 1 – кричтонит, 2 – фторкальциопироксид; 3 – стронцианит, 4 – бурбанкит, 5 – карбонат Ba и Ca (баритокальцит?). Fe₂O₃ расчетное. Σ_{кат} – сумма катионов.

В альбитизированных калишпатовых сиенитах в ассоциации с рибекитом, титаномагнетитом и магнетитом отмечен *монацит*-(Ce), содержащий 1.0–2.8 мас. % SrO. В измененных нефелиновых сиенитах в ассоциации с мусковитом и рутилом обнаружены *бастнезит*-(Ce-La) и *синхизит*-(Ce), содержащие около 1 мас. % SrO.

Ва-СОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ

Основными концентраторами бария являются минералы калия вследствие близости ионных радиусов K⁺ и Ba²⁺. В породах Большетагнинского массива это, в первую очередь, Mg-Fe слюды и калиевый полевой шпат. В нефелине Ba не обнаружен.

Состав магнезиально-железистой слюды в щелочных породах массива варьирует от флогопита (мельтейгит, уртит) до аннита (нефелиновые сиениты). Количество BaO в анализах изменяется от незначительного (ниже пределов обнаружения) до 3.1–3.5 мас. %

Таблица 3. Химический состав (мас. %) Ва-содержащих флогопита и аннита
Table 3. Chemical composition (wt %) of Ba-bearing phlogopite and annite

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7		8				9	
							Ц	Кр	Ц	Пр	Пр	Кр	Ц	Кр
SiO ₂	35.78	33.89	33.37	41.42	40.41	40.95	40.93	37.44	38.77	35.68	34.72	40.58	36.16	40.99
TiO ₂	0.80	2.44	2.25		0.38					0.88				
Al ₂ O ₃	13.07	13.04	12.43	11.73	11.26	11.24	11.49	14.06	11.75	14.32	14.91	11.70	16.19	12.05
FeO _{общ}	13.95	24.12	25.64	9.30	9.06	7.04	7.86	5.76	6.74	6.47	6.50	8.59	5.94	7.96
MnO	0.44	1.10	0.74	1.92	0.43	0.63			0.70	0.46	0.57	1.81		1.76
MgO	17.57	9.65	8.51	20.99	23.42	23.58	24.86	24.73	23.40	22.40	22.02	21.66	22.40	20.88
BaO	3.12	3.08	3.51	0.69	0.75	0.73	0.80	5.35	1.84	5.09	7.84		5.77	
Na ₂ O														
K ₂ O	9.83	9.56	8.54	10.83	11.12	11.08	11.41	9.42	10.60	9.03	8.35	10.36	8.91	10.58
F	1.41				1.31	2.49	1.16	1.72		2.85	1.93		2.11	
—O(F)	0.60				0.55	1.05	0.49	0.42		1.20	0.81		0.89	
Сумма	95.37	96.88	94.99	96.88	97.59	96.69	98.02	98.06	93.80	95.98	96.03	94.70	96.59	94.22
Расчет	O=11													
Коэффициенты в формулах														
Si	2.78	2.72	2.75	3.01	2.93	2.99	2.94	2.76	2.90	2.71	2.67	2.99	2.70	3.02
Ti	0.05	0.15	0.14		0.02					0.05				
Al	1.20	1.23	1.21	1.00	0.96	0.97	0.97	1.22	1.04	1.28	1.35	1.01	1.43	1.05
Fe ²⁺	0.91	1.62	1.76	0.56	0.55	0.43	0.47	0.35	0.42	0.41	0.42	0.53	0.37	0.49
Mn	0.03	0.07	0.05	0.12	0.03	0.04			0.04	0.03	0.04	0.11		0.11
Mg	2.03	1.15	1.04	2.27	2.53	2.56	2.66	2.71	2.61	2.53	2.52	2.38	2.49	2.29
Ba	0.09	0.10	0.11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.15	0.05	0.15	0.24		0.17	
Na														
K	0.97	0.98	0.90	1.00	1.03	1.03	1.04	0.88	1.01	0.87	0.82	0.97	0.85	0.99
F	0.35				0.30	0.57	0.26	0.40		0.68	0.47		0.50	
X _{Mg}	0.69	0.42	0.37	0.80	0.82	0.86	0.85	0.88	0.86	0.86	0.86	0.82	0.87	0.82
X _{Ba}	0.09	0.09	0.09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.15	0.05	0.15	0.22		0.17	
Компоненты	10				11			12			13			
	Ц	Пр	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Кр		
SiO ₂	38.04	37.59	34.23	38.98	39.00	37.87	34.21	41.16	35.79	34.85	40.69	34.64		
TiO ₂					0.43									
Al ₂ O ₃	13.60	14.04	16.95	15.46	11.45	12.45	15.34	10.83	15.13	15.89	11.34	16.21		
FeO	6.88	6.42	5.03	6.96	8.54	6.96	5.91	7.23	5.45	5.45	7.40	5.56		
MnO	0.68	0.46		1.27	0.67	0.72	0.41	0.45			0.65			
MgO	23.08	22.65	22.44	21.26	23.50	23.27	22.88	23.88	23.13	24.11	24.76	23.37		
BaO	2.80	5.34	6.55	0.82	1.00	3.67	8.43	0.96	7.77	7.59	1.35	7.39		
Na ₂ O			0.57											
K ₂ O	10.06	9.14	8.42	10.59	10.31	9.88	8.40	11.35	8.96	9.01	11.19	8.55		
F	2.79	2.06	1.84	1.88	2.07	1.38	1.96		2.01	1.55	2.18	2.22		
—O(F)	1.17	0.87	0.77	0.79	0.87	0.58	0.82		0.85	0.65	0.92	0.93		

Таблица 3. Окончание

Компоненты	10				11			12			13	
	Ц	Пр	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Кр
Сумма	96.76	96.83	95.26	97.43	96.10	95.62	96.72	95.86	97.39	97.80	98.64	97.01
Расчет	O=11											
Коэффициенты в формулах												
Si	2.82	2.81	2.61	2.84	2.89	2.84	2.62	3.00	2.69	2.61	2.93	2.61
Ti					0.02							
Al	1.19	1.23	1.52	1.33	1.00	1.10	1.38	0.93	1.34	1.40	0.96	1.44
Fe ²⁺	0.43	0.40	0.32	0.42	0.53	0.44	0.38	0.44	0.34	0.34	0.45	0.35
Mn	0.04	0.03		0.08	0.04	0.05	0.03	0.03			0.04	
Mg	2.55	2.52	2.54	2.31	2.59	2.60	2.61	2.59	2.59	2.69	2.66	2.63
Ba	0.08	0.16	0.20	0.02	0.03	0.11	0.25	0.03	0.23	0.22	0.04	0.22
Na			0.08									
K	0.95	0.87	0.82	0.98	0.97	0.95	0.82	1.05	0.86	0.86	1.03	0.82
F	0.65	0.49	0.44	0.43	0.48	0.33	0.47		0.48	0.37	0.50	0.53
X _{Mg}	0.86	0.86	0.89	0.84	0.83	0.86	0.87	0.85	0.88	0.89	0.86	0.88
X _{Ba}	0.08	0.15	0.18	0.02	0.03	0.10	0.24	0.03	0.21	0.21	0.04	0.21

Примечание. 1 – флогопит из мельтейгита; 2, 3 – аннит из нефелинового сиенит-порфира; 4–13 – флогопит из уррита; 4–6 – незональные зерна среди кальцита и нефелина, 7–13 – зональные зерна. Ц – центр, Пр – промежуточная точка, Кр – край. $X_{Mg} = Mg/(Fe + Mg)$; $X_{Ba} = Ba/(Ba + Na + K)$.

(табл. 3, зерна 1–3); содержание BaO обычно возрастает в краевых частях зерен (рис. 4, а). В биотите из слюдитов содержание BaO ниже пределов обнаружения.

Наибольший интерес представляет *бариевый флогопит*, содержащийся в уррите. В зернах слюды под электронным микроскопом наблюдается зональность, выражающаяся в присутствии светлой каймы, в некоторых зернах светлая кайма сменяется тонкой темной каемкой (рис. 4, б, з). В центральных частях зональных зерен и в мелких незональных зернах количество Si составляет 2.93–3.01 к.ф., Al – 0.93–1.04 к.ф., Ti – менее 0.02 к.ф., F – до 0.57 к.ф., Ba – 0.02–0.05 к.ф., X_{Mg} – 0.80–0.86 (табл. 3). Содержание BaO возрастает от центра к краю зерен, достигая 8.4 мас. % или 0.25 к.ф. Ba. Одновременно возрастает количество Al, X_{Mg} (0.87–0.89), в некоторых зернах – F и снижаются содержания Si, Fe, K и Mn при слабо меняющемся содержании Mg (рис. 5, а–е). В некоторых зернах содержание Ba снижается от центра к краю (табл. 3, зерно 9), а отдельные зерна имеют сложную зональность: содержание Ba сначала возрастает, а в краевой зоне снижается (табл. 3, зерна 8, 10; рис. 4, з). Одновременно с уменьшением Ba снижается содержание Mg и возрастают содержания Fe и Mn (рис. 5, а–е).

Триоктаэдрические бариевые слюды включают киношиталит $BaMg_3(Al_2Si_2)O_{10}(OH)_2$, феррокиношиталит $BaFe_3(Al_2Si_2)O_{10}(OH)_2$, оксикиношиталит $Ba(Mg_2Ti^{4+})(Al_2Si_2)O_{10}O_2$ и анандит $BaFe_3^{2+}(Fe^{3+}Si_3)O_{10}S(OH)$ (Čorjakova, Kotkova, 2018). В бариевом флогопите из уррита основным изоморфным замещением является $Ba[Al] \rightarrow K[Si]$, что отвечает росту доли киношиталитового компонента до 24 мол. % (рис. 5, ж). В то же время, уменьшение количества Fe с ростом содержаний Ba и Al при слабо меняющемся содержании Mg позволяет предполагать также замещение по схеме $Al[Al] \rightarrow Fe^{2+}[Si]$ (рис. 5, з). На поздней стадии проявлено замещение $(Fe^{2+}, Mn^{2+}) \rightarrow Mg$ (рис. 5, з).

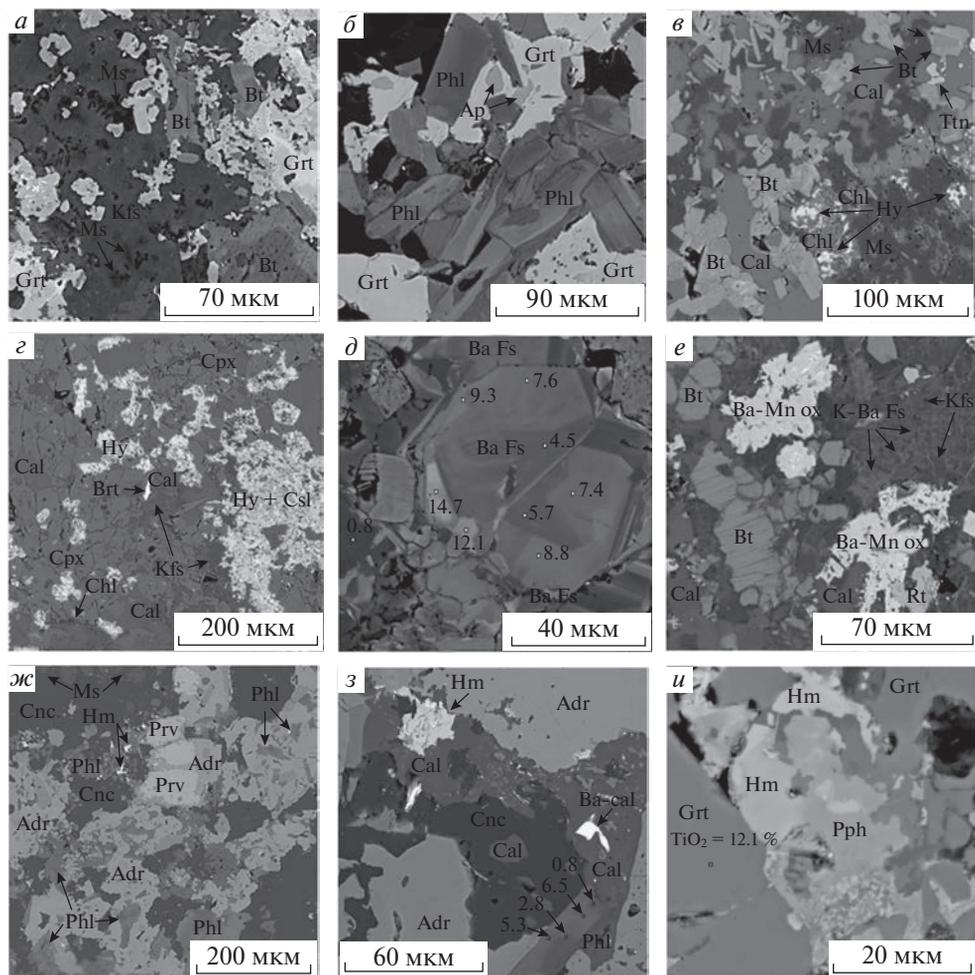


Рис. 4. Минералы Ва в породах массива.

a – зональный аннит с обогащенными Ва краями в нефелиновом сиенит-порфире; *б* – зональный флогопит в уртите; *в* – гиалофан в сростаниях с хлоритом в нефелиновом сиенит-порфире; *г* – гиалофан и целзиан (наиболее светлые участки среди гиалофана), замещающие минералы мельтейгита; *д* – прожилок, сложенный зональным бариевым полевым шпатом в биотитизированном и карбонатизированном ийолите (числами показано содержание ВаО в полево шпате); *е* – каемки Ва-содержащего полевого шпата вокруг зерен калиевого полевого шпата и Ва-содержащие гидроксиды Mn в сиените; *ж*, *з* – генримейрит (*ж*, *з*) и баритокальцит (*з*) в ассоциации с андрадитом, замещающим перовскит, бариевый флогопит, канкринит и кальцит в уртите; числами на рис. *з* показано содержание ВаО в флогопите (зерно 10 в табл. 3); *у* – генримейрит в сростании с пиррофанитом, замещающий титансодержащий андрадит в нефелиновом сиените. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

Fig. 4. Barium-bearing minerals in rocks of the massif.

a – zonal annite with enriched-in-Ba margins, in nepheline syenite porphyry; *b* – zonal phlogopite in urtite; *c* – hyalophane intergrowing with chlorite in nepheline syenite porphyry; *d* – veinlet of zonal barium feldspar in biotitized and carbonatized ijolite (numbers indicate the content of BaO in feldspar); *e* – rims of Ba-bearing feldspar around K-feldspar grains and Ba-bearing Mn hydroxides in syenite; *ж*, *з* – henimeyerite (*ж*, *з*) and barytocalcite (*з*) in association with andradite replacing perovskite, barium phlogopite, cancrinite, and calcite in urtite; numbers in Fig. *з* shows the content of BaO in phlogopite (grain 10 in Table 3); *у* – henimeyerite, in intergrowth with pyrophanite, replacing titanium-bearing andradite in nepheline syenite. BSE-images.

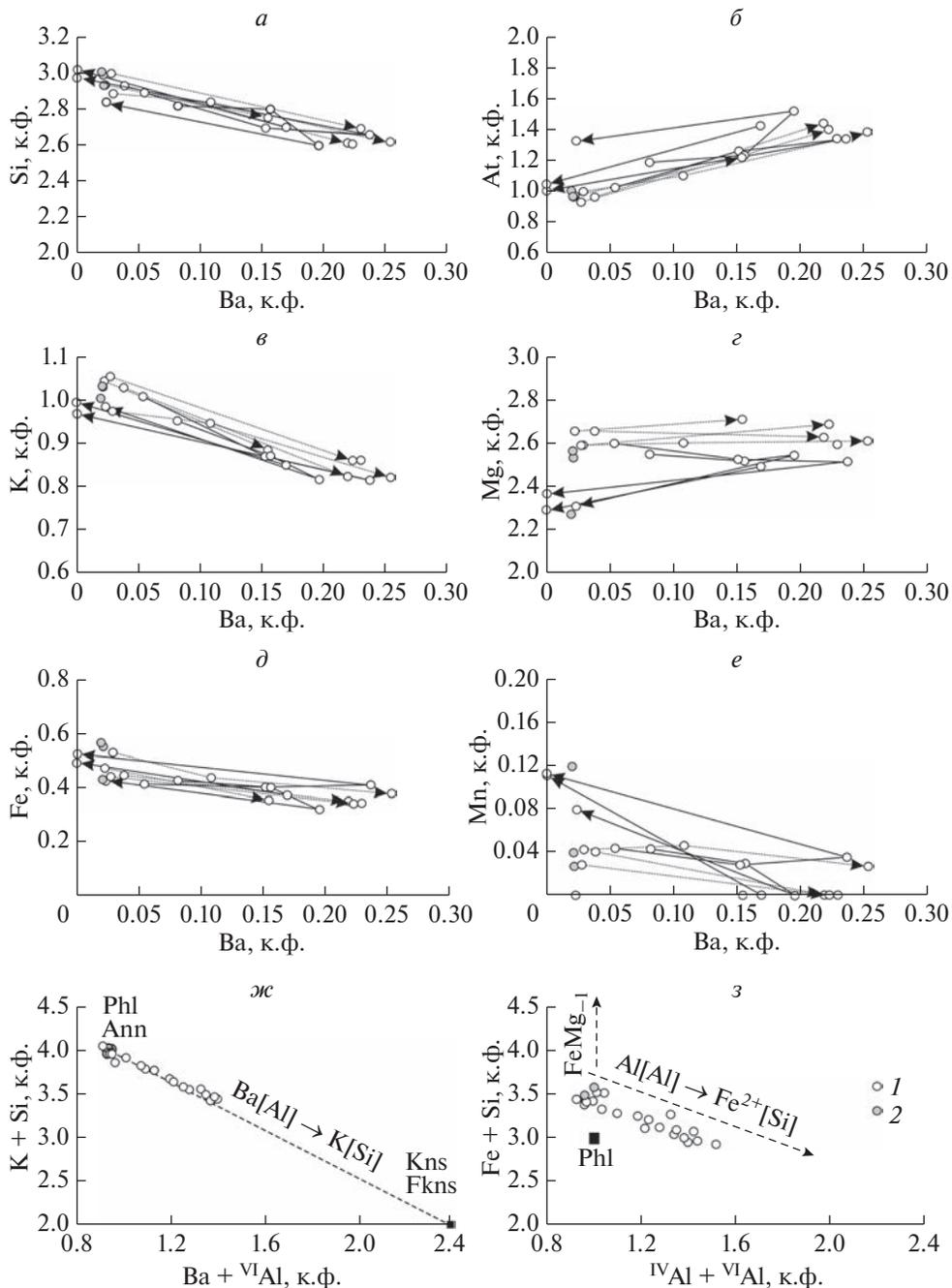


Рис. 5. Вариации химического состава Ва-флогопита в уртите.

1 – зональные зерна, 2 – незональные зерна. Точечными линиями показано изменение состава в зернах с прямой зональностью по Ва, сплошными – в зернах со сложной и обратной зональностью.

Fig. 5. Variations in chemical composition of the Ba-bearing phlogopite in urtite.

1 – zonal grains, 2 – non-zonal grains. Dotted lines show the change in composition of grains with direct zoning of Ba, continuous lines show the change in composition of grains with complicated and reverse zoning.

Таблица 4. Химический состав (мас. %) бариевого полевого шпата
Table 4. Chemical composition (wt %) of barium-bearing feldspar

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	49.72	51.75	43.38	40.82	46.02	35.17	36.05	60.14	58.30	55.64	52.70
Al ₂ O ₃	21.20	20.61	22.51	24.15	22.35	25.41	25.78	19.04	20.01	21.05	20.98
Fe ₂ O ₃	0.63										0.40
SrO								1.20			
BaO	18.02	14.56	27.92	32.29	24.85	37.56	36.91	4.48	8.88	12.19	14.68
K ₂ O	10.28	11.43	6.07	4.36	7.77	2.16	1.75	15.74	14.49	12.71	11.15
Сумма	99.85	98.35	99.88	101.62	100.99	100.30	100.52	100.60	101.68	101.59	99.91
Расчет	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8
Коэффициенты в формулах											
Si	2.63	2.71	2.46	2.34	2.52	2.14	2.16	2.89	2.83	2.76	2.71
Al	1.32	1.27	1.50	1.63	1.44	1.82	1.82	1.08	1.15	1.23	1.27
Fe ³⁺	0.03										0.02
Sr								0.03			
Ba	0.37	0.30	0.62	0.72	0.53	0.90	0.87	0.08	0.17	0.24	0.30
K	0.69	0.76	0.44	0.32	0.54	0.17	0.13	0.96	0.90	0.80	0.73
X _{Ba}	0.35	0.28	0.59	0.69	0.50	0.84	0.87	0.08	0.16	0.23	0.29

Примечание. 1, 2 – гиалофан из нефелинового сиенит-порфира; 3–7 – гиалофан (3–5) и цельзиан (6, 7) из мельтейгита; 8–11 – Ba-содержащий калиевый полевой шпат и гиалофан из ийолита. Fe₂O₃ расчетное. X_{Ba} = Ba/(Sr + Ba + K).

Калиевый полевой шпат является породообразующим минералом в нефелиновых и полевошпатовых сиенитах и второстепенным минералом в ийолитах-мельтейгитах. Количество BaO в анализах калиевого полевого шпата невысокое, составляет до 1.3 мас. % и зачастую ниже предела обнаружения. Минерал содержит также примеси Na₂O до 0.4 мас. % и Fe₂O₃ до 1.8 мас. %.

Бариевый полевой шпат обнаружен в нефелиновом сиенит-порфире в сростании с хлоритом, замещающим Ba-содержащий биотит (рис. 4, в); в виде скоплений, замещающих калиевый полевой шпат и диопсид в мельтейгите (рис. 4, з); прожилков в биотитизированном и карбонатизированном ийолите (рис. 4, д); в ассоциации с Ba-содержащими гидроксидами Mn в хлоритизированном биотитовом сиените (рис. 4, е). Количество BaO в анализах составляет от 4.5 до 37.6 мас. %, CaO – ниже пределов обнаружения, Na₂O – до 0.4 мас. % (табл. 4); на долю цельзиана BaAl₂Si₂O₈ приходится от 8 до 87 мол. % (рис. 6). Цельзиан образует участки среди гиалофана (рис. 4 з).

Ba-содержащий мусковит присутствует в уртите; барием обогащены краевые деформированные участки зерен мусковита на контакте с прожилком натролита (рис. 3, в). Содержание BaO достигает 3.5 мас. % (табл. 1, ан. 8). Примесь BaO в количестве 0.8–3.7 мас. % (до 0.10 к.ф. Ba) отмечается также в мусковите, замещающем нефелин в нефелиновых сиенитах.

Генримейерит обнаружен в уртите и нефелиновом сиените. Минерал представлен мелкими (до 25 мкм) зернами неправильной формы. В уртите он ассоциирует с андрадитом, замещающим перовскит, Ba-флогопит, кальцит и канкринит (рис. 4, ж, з), в нефелиновом сиените генримейерит в ассоциации с пирофанитом (рис. 4, и), титанитом или кричтонитом (не показаны на рисунках) является продуктом замещения титаносодержащего андрадита.

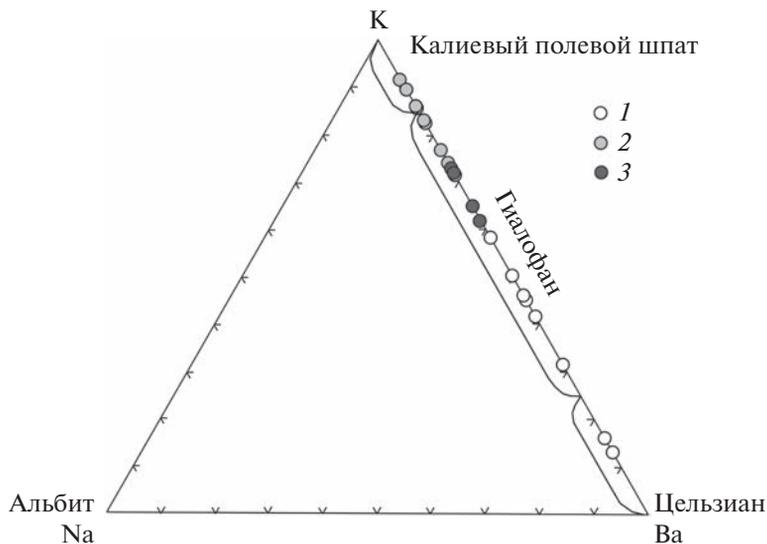


Рис. 6. Состав бариевого полевого шпата на диаграмме Na–K–Ba. Границы для калиевого полевого шпата, гиалофана и цельзиана показаны в соответствии с работой (Essene et al., 2005). Бариевые полевые шпаты: 1 – из мельтейгита, 2 – ийолита, 3 – нефелинового сиенит-порфира.

Fig. 6. Composition of Ba-bearing feldspar on the Na–K–Ba diagram. Boundaries for K-feldspar, hyalophane, and celsian are shown according to (Essene et al., 2005). Barium-bearing feldspars: 1 – from melteigite, 2 – from ijolite, 3 – from nepheline syenite porphyry.

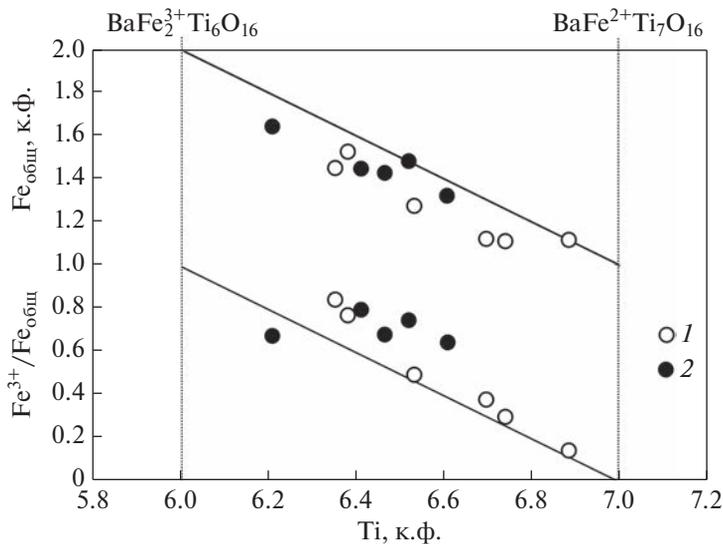


Рис. 7. Вариации химического состава генримейерита в породах массива. Генримейерит: 1 – из уррита, 2 – нефелинового сиенита. График заимствован из работы (Krmíček et al., 2011).

Fig. 7. Variations in chemical composition of henrimeyerite in rocks of the massif. Henmeyerite: 1 – from urtite, 2 – from nepheline syenite. Graph taken from (Krmíček et al., 2011).

Таблица 5. Химический состав (мас. %) генримейерита
Table 5. Chemical composition (wt %) of henrimeyerite

Компо- ненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TiO ₂	67.29	66.62	64.90	68.82	65.67	68.09	67.49	67.21	64.92	65.25	63.10
Al ₂ O ₃	0.96	1.27	0.62	1.21	1.32			0.47			
V ₂ O ₃									1.03	1.37	1.44
La ₂ O ₃											1.55
Ce ₂ O ₃										1.44	1.43
FeO _{общ}	9.97	11.68	13.95	10.36	13.47	9.93	13.79	12.09	12.89	13.24	15.00
BaO	19.54	20.67	19.24	19.74	18.63	19.67	18.43	18.20	19.19	16.39	18.49
Сумма	97.76	100.24	98.71	100.13	99.09	97.69	99.71	97.97	98.03	97.69	101.01
Расчет	Σкат = 8										
Коэффициенты в формулах											
Ti	6.74	6.53	6.38	6.69	6.35	6.88	6.52	6.61	6.46	6.41	6.21
Al	0.15	0.19	0.10	0.18	0.20			0.07			
Fe ³⁺	0.33	0.63	1.17	0.42	1.22	0.16	1.11	0.85	0.97	1.15	1.11
V									0.11	0.14	0.15
La											0.07
Ce										0.07	0.07
Fe ²⁺	0.78	0.64	0.35	0.70	0.23	0.96	0.37	0.47	0.45	0.29	0.53
Ba	1.02	1.06	0.98	1.00	0.94	1.04	0.93	0.93	1.00	0.84	0.95

Примечание. Генримейерит: 1–6 – из уррита, 7–11 – из нефелинового сиенита. Коэффициенты в формулах рассчитаны на 8 катионов в позиции В. Расчет Fe³⁺ выполнен из условия электронейтральности формулы (Droop, 1987).

Проанализированные зерна неоднородны по химическому составу, который отклоняется от идеальной формулы генримейерита ${}^A\text{Ba}^B(\text{Ti}_7\text{Fe}^{2+})\text{O}_{16}$ (Mitchell et al., 2000). Для генримейерита из Большетагинского массива (табл. 5) характерен дефицит Ti и присутствие в значительном количестве Fe³⁺ по сравнению с идеальной формулой, т.е. минерал принадлежит к серии твердых растворов гептатитанат $\text{BaFe}^{2+}\text{Ti}_7\text{O}_{16}$ – гексатитанат $\text{BaFe}_2^{3+}\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ (Mitchell et al., 2000). К генримейериту более близок по химическому составу минерал из уррита, тогда как в минерале из нефелинового сиенита выше доля гексатитанатового компонента (рис. 7). Генримейерит из уррита содержит примесь Al, тогда как минерал из нефелинового сиенита – примеси V, Ce и La (табл. 5).

Во всех изученных породах массива присутствует акцессорный *барит* (см. предыдущий раздел). Кальцит в уррите содержит вроски карбоната Ba и Ca (*баритокальцит*?) (табл. 2, ан. 5; рис. 4, з). Карбонат Ba и Ca в сростаниях с бурбанкитом (табл. 2, ан. 4), баритом и стронцианитом обнаружен также в карбонатите.

Ва-содержащие *гидроксиды Mn* присутствуют в виде скоплений в биотитовом нефелиновом сиените, где ассоциируют с Ва-содержащим полевым шпатом, замещающим зерна калиевого полевого шпата (рис. 4, е). Содержание главных компонентов в анализах гидроксидов сильно варьирует: MnO₂ 52.4–76.4, Fe₂O₃ 0.7–25.8, BaO 3.2–10.2, CaO 3.5–5.2, сумма оксидов 82.7–90.2 мас. %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное изучение распределения Sr и Ba между щелочным расплавом и водно-солевым флюидом (Сук, Котельников, 2011) показало, что эти элементы преимущественно распределяются в расплав и, соответственно, входят в состав кристал-

лизующихся на магматической стадии породообразующих и акцессорных минералов. В щелочных породах Большешетагнинского массива главными концентраторами стронция на магматической стадии являлись кальцит и фторапатит. Содержание Sr в этих минералах из разных типов пород примерно одинаковое и достигает 1.9 мас. %. Зональность по Sr в зернах фторапатита не отмечена; это позволяет предполагать, что в процессе кристаллизации накопление Sr в остаточных расплавах не происходило.

Концентраторами бария на магматической стадии в ийолите, мельтейгите и уртите являются флогопит и биотит, а в нефелиновых сиенитах также калиевый полевошпат. На образование Ba-содержащих биотита и флогопита на магматической стадии указывает их более ранняя кристаллизация по отношению к титансодержащему андрадиту (рис. 2, *з–е*). Зональность, проявленная в биотите и флогопите преимущественно выражается в росте содержания Ba в краевой зоне, что указывает на постепенное увеличение концентрации бария в остаточном расплаве. Как следует из анализов флогопита из уррита, рост содержания Ba не сопровождался скачкообразным изменением содержания других компонентов (рис. 5), что указывало бы на смену условий минералообразования, следовательно, изменение состава слюды связано, вероятнее всего, с кристаллизационной дифференциацией. Признаком, указывающим на накопление Ba в остаточном расплаве является также присутствие микровключений баритокальцита (?) в интерстициальном кальците, ассоциирующемся с флогопитом в уртите.

Бариевый флогопит, член изоморфного ряда флогопит-киношпиталит, нередко встречается в бедных кремнеземом породах повышенной щелочности: он обычен для кимберлитов (Опарин и др., 2017; Beard et al., 2000; Dongre, Tappe, 2019; Zurevinski, Mitchell, 2011 и др.), карбонатитов (Gaspar, Wyllie, 1982; Giebel et al., 2019; Rampilova et al., 2021), обнаружен в оливините Гулинского ультраосновного–щелочного массива (Когарко и др., 2012), фергусите высококалийевого базальтоидного комплекса Ю-В Памира (Соловова и др., 2009), мелилититах (Doroshkevich et al., 2019) и айлликитах (Соловова и др., 2009). Во всех указанных породах бариевый флогопит образуется на поздних стадиях кристаллизации. В уртите Большешетагнинского массива образование флогопита обусловлено, по-видимому, низкой активностью кремнезема в расплаве на ранней стадии кристаллизации, что препятствовало образованию клинопироксена, а магнезиальный состав слюды указывает на повышенную f_{O_2} на поздних стадиях кристаллизации.

Большинство Sr- и Ba-содержащих минералов в щелочных породах Большешетагнинского массива образуются на постмагматической стадии. Это стрональсит, генримейерит, Sr-содержащий фторкальциопироксид, Sr- и Ba-содержащий мусковит, бариевые полевые шпаты и другие минералы (рис. 8).

Стрональсит $SrNa_2Al_4Si_4O_{16}$ является сравнительно распространенным акцессорным минералом в щелочных породах. Как самостоятельный минерал и в виде твердого раствора с банальситом $BaNa_2Al_4Si_4O_{16}$ он обнаружен в измененных куспидин-мелилитовых ксенолитах среди нефелиновых сиенитов Хибинского комплекса (Хомяков и др., 1990; Лиферович и др., 2005); пироксенитах Жидойского ультраосновного щелочного массива в Южной Сибири (Конева, 1996), урритах и нефелиновых сиенитах массивов Сахарйок и Гремяха-Вырмес (Liferovich, Mitchell, 2006), мелилитовых породах и ийолите комплекса Турьего Мыса (Лиферович и др., 2005); ийолитах и карбонатитах комплекса Прери Лейк в Канаде, фельдшпатоидных сиенитах комплекса Пилансберг в Южной Африке (Liferovich, Mitchell, 2006), ийолитах интрузива Чик-Хем в Туве (Спиридонов и др., 2018). Образование стрональсита связывается с пост-

Рис. 8. Схема последовательности кристаллизации минералов в щелочных породах Большешетагнинского массива.

Fig. 8. Scheme of the consequence of crystallization of minerals in alkaline rocks of the Bolshetagninskii massif.

Минерал	Стадии		
	Магматическая	Пневмато-литовая, $T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	Гидротермальная $T < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$
Диопсид-геденбергит/титан-авгит	-----		
Нефелин	-----		
Перовскит	-----		
Флогопит (Ba)	-----		
Аннит (Ba)	-----		
Титаномagnetит	-----		
Калиевый полевой шпат (Ba)	-----		
Кальцит (Sr)	-----		
Фторапатит (Sr)	-----		
Флюорит (Sr)	-----		
Баритокальцит (Ba)	-----		
Титансодержащий андрадит	-----		
Бадделейт	-----		
Циркон	-----		
Фторкальциопирохлор (Sr)	-----		
Магнетит		-----	
Канкринит		-----	
Стрональсит (Sr)		-----	
Мусковит (Sr, Ba)		-----	
Гроссуляр-андрадит		-----	
Эпидот (Sr)		-----	
Титанит		-----	
Генримейерит (Ba)		-----	
Кричтонит (Sr)		-----	
Манганильменит		-----	
Рутил/анатаз		-----	
Барит (Ba, Sr)		-----	
Целестин (Sr)		-----	
Натролит			-----
Хлорит			-----
Гиалофан/цельзиан (Ba)			-----
Бастнезит/синхизит (Sr)			-----
Кварц			-----
Гидроксиды Ми (Ba)			-----
Гётит			-----

магматическим изменением нефелина под воздействием щелочного флюида (Liferovich, Mitchell, 2006).

В уртите Большетагнинского массива стрональсит также является продуктом постмагматического изменения нефелина: он ассоциирует с канкринитом и мусковитом и является более ранним минералом по отношению к натролиту (рис. 3, *в*). При этом преимущественно стрональсит образуется по нефелину, находящемуся среди граната (рис. 3, *а, б*). Это позволяет предполагать, что причиной замещения нефелина стрональситом послужил рост концентрации Sr во флюиде вследствие высвобождения стронция из кальцита, участвовавшего в образовании граната (и канкринита). Это же явилось причиной кристаллизации стронцианита среди канкринита. Отсутствие банальсита указывает на очень низкую концентрацию Ba во флюиде, отделявшемся при кристаллизации уррита. Обнаружение стрональсита только в уртите объясняется, по видимому, высокой активностью Na^+ на постмагматической стадии формирования этой породы. При пониженной активности Na^+ стронций входил в состав других постмагматических минералов – кричтонита, эпидота, мусковита, барита, целестина.

Генримейрит, как самостоятельный минерал, впервые был описан в кальцит-доломитовом карбонате Ковдорского массива (Mitchell et al., 2000). Генримейрит обнаружен также в Себляврском карбонатитовом массиве, Кольский п-ов (Сорохтина, 2000), нефелин-сиенитовых пегматитах Монтаны, США (Chakhmouradian, Mitchell, 2002), метасоматизированных мантийных ксенолитах Восточной Антарктиды (Kogarko et al., 2007), лампроитах Чехии (Krmíček et al., 2011). Бариевый прайдерит выявлен в карбонатитах Ковдорского массива (Журавлева и др., 1978), рихчорритах Хибинского массива (Меньшиков и др., 1979), ультраосновных лампрофирах Канады (Platt, 1994), сиенитах и щелочно-сиенитовых пегматитах Маломурунского массива, Алданский щит (Mitchell, Vadykin, 1993; Шахмурадян, Евдокимов, 1997) и Монтаны, США (Chakhmouradian, Mitchell, 1999), лампроитах Восточной Индии (Maitra, Bhattacharyya, 2015). Во всех этих проявлениях генримейрит встречается в виде каймы вокруг минералов ранних стадий или является продуктом их замещения.

В уртите из Большетагнинского массива генримейрит обнаружен в ассоциации с андрадитом, что позволяет связывать его образование с высвобождением титана из титансодержащего андрадита, перовскита или титаномагнетита и бария из Ba-содержащего флогопита в результате замещения этих минералов андрадитом (рис. 4, *ж*). Образование генримейрита, а не прайдерита, свидетельствует о низкой активности K^+ во флюиде, что обусловлено одновременной кристаллизацией каемок низкобариевого флогопита вокруг бариевого флогопита (рис. 4, *з*; зерна с обратной зональностью на рис. 5). Замещение титансодержащего андрадита в нефелиновом сиените генримейритом в ассоциации с пирофанитом (рис. 4, *и*) и кричтонитом (не показано на рисунке) указывает на накопление Ba наряду с Sr и Mn во флюидной фазе, также, вероятно, вследствие перекристаллизации ранних минеральных ассоциаций.

Наиболее высокие концентрации Ba в Большетагнинском массиве присущи щелочным породам, содержащим бариевые полевые шпаты. Гиалофан и цельзиан являются сравнительно редкими минералами в щелочных комплексах. Первично магматические гиалофан и цельзиан выявлены в полевошпатовом уртите Хибинского массива (Иванюк и др., 2009) и нефелиновых сиенитах и ювитах из щелочных массивов Тувы (Козулина, 2012). Согласно данным из работы (Essene et al., 2005), гиалофан и бариевый санидин обнаружены в анализититах, фонолитах, мончиките, нефелините, шонкинитах и лейцититах. Как постмагматические минералы, гиалофан, цельзиан, парцельзиан присутствуют в ийолитах, глиммерите и щелочном пироксените комплекса Прери Лейк, Канада (Liferovich et al., 2006); K-Ba полевой шпат и цельзиан обнаружены в метаморфических породах и метасоматитах вблизи миаскитов Ильменогорского массива (Чередниченко, Дубинина, 2017).

В Большетагнинском массиве гиалофан и более редкий цельзиан встречаются в щелочных породах в виде скоплений в ассоциации с хлоритом, а также слагают прожилки в биотитизированных, карбонатизированных и калишпатизированных ийолитах (рис. 4, *в–д*), т.е. образуются на низкотемпературной гидротермальной стадии. На повышенную активность Ba^{2+} в гидротермальных растворах указывает, кроме того, обогащение барием краевых деформированных зон в зернах мусковита на контакте с прожилками натролита (рис. 3, *в*) и отложение на завершающей стадии Ba-содержащих гидроксидов Mn (рис. 4, *е*). Ассоциация гиалофана с хлоритом позволяет предполагать, что причиной образования K-Ba полевых шпатов являлось разложение первично-магматических Ba-содержащих слюд под воздействием низкотемпературных гидротермальных растворов, мигрировавших по зонам катаклаза и трещинам в породах массива. Важную роль в высвобождении Ba из первично-магматических флогопита/аннита и росте его концентрации в гидротермальных растворах могли играть также предшествовавшие хлоритизации процессы карбонатизации, калишпатизации и перекристаллизации слюды в экзоконтактовом ореоле карбонатитового штока. Присутствие в измененных щелочных породах массива бариевых полевых шпатов свидетельствует о невысокой, в целом, активности SO_4^{2-} в гидротермальных растворах.

ВЫВОДЫ

1. Образование минералов Sr и Ba в щелочных силикатных породах Большетагнинского массива являлось многостадийным процессом. На магматической стадии основными концентраторами стронция являлись кальцит и фторапатит, а бария — преимущественно магнезиально-железистые слюды. Отсутствие зональности по Sr в зернах апатита указывает на то, что при кристаллизации не происходило накопление Sr в остаточных щелочных расплавах. Барий, напротив, накапливался в остаточных расплавах, на что указывает рост его содержания в краевых частях зерен флогопита/аннита и присутствие включений карбоната Ba и Ca в интерстициальном кальците, ассоциирующем с флогопитом в уртите.

2. Наиболее разнообразные минералы стронция и бария образовались в щелочных породах Большетагнинского массива на высокотемпературной постмагматической стадии. Это — стрональсит, стронцианит, целестин, барит, генримейрит, кричтонит, а также Sr-содержащий фторкальциопирохлор, Sr-содержащие мусковит и эпидот, образование которых связано, преимущественно, с процессами замещения минералов магматической стадии при участии флюидов, отделявшихся при кристаллизации щелочных расплавов. Преобладание Sr-содержащих минералов на этой стадии указывает на низкую концентрацию бария во флюидной фазе.

3. Карбонатизация и калишпатизация, проявившиеся в экзоконтактовом ореоле карбонатитового штока, и последующее воздействие на щелочные породы массива низкотемпературных гидротермальных растворов, мигрировавших по зонам катаклаза и трещинам, вызвали разложение первично-магматических Ba-содержащих слюд. Это послужило причиной образования на некоторых участках в щелочных породах скоплений и прожилков гиалофана и цельзиана, замещение мусковита барийсодержащим мусковитом и на заключительной стадии отложение Ba-содержащих гидроксидов марганца. Присутствие гиалофана и цельзиана в измененных щелочных силикатных породах является особенностью Большетагнинского массива, указывающей на низкую активность аниона SO_4^{2-} в гидротермальных растворах на низкотемпературной стадии.

При выполнении работы задействовалось оборудование ЦКП “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. Изучение химического состава минералов в выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту АААА-А21-121011390002-2.

Авторы выражают искреннюю признательность анонимному рецензенту за замечания и рекомендации, послужившие улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреева Е.Д., Кононова В.А., Свешникова Е.В., Яшина Р.М. Магматические горные породы. Щелочные породы. М.: Наука, **1984**. 415 с.

Гладкохуб Д.П., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Донская Т.В., Мотова З.Л., Ванин В.А. Возрастные уровни и геодинамические режимы накопления докембрийских толщ Урикско-Ийского грабена, юг Сибирского кратона // Геотектоника. **2014**. № 5. С. 17–31.

Журавлева Л.Н., Юркина К.В., Рябева Е.Г. Прайдерит – первая находка в СССР // Доклады АН СССР. **1978**. Т. 239. № 2. С. 435–438.

Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Калашиников А.О., Корчак Ю.А., Селиванова Е.А., Яковенчук В.Н. Породообразующие полевые шпаты Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров, Россия) // ЗРМО. **2009**. № 6. С. 1–17.

Капустин Ю.Л. Минералогия карбонатитов. Л.: Наука, **1971**. 290 с.

Когарко Л.Н., Рябчиков И.Д., Кузьмин Д.В. Высокобариевая слюда в оливинитах Гулинского массива (Маймечка-Котуйская провинция, Сибирь) // Геология и геофизика. **2012**. Т. 53. № 11. С. 1572–1579.

Кожевников О.К., Кухринкова Н.В., Туголукова Г.А. Больше-Тагнинский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов / Эндегенные полезные ископаемые Саяно-Байкальской горной области. Иркутск: Вост.-Сиб. книжное изд-во, **1974**. С. 134–163.

Козулина Т.В. Состав породообразующих минералов щелочных массивов Центрального Сангилены, Юго-Восточная Тува / Современные проблемы магматизма и метаморфизма. Мат. Всероссийск. конф. Т. 1. СПб.: Изд-во СПбГУ, **2012**. С. 275–277.

Конева М.А. Банальсит и стрональсит из пироксенитов Жидойского массива // ЗВМО. **1996**. № 2. С. 103–105.

Лиферович Р.П., Митчелл Р.Х., Шпаченко А.К., Зозуля Д.Р. Акцессорный минерал нефелиновых сиенитов – твердый раствор банальсит-стрональсит / Минералогия во всем пространстве сего слова. Труды II Фермановской научной сессии Кольского отделения РМО. Апатиты: Изд-во “K & M”, **2005**. С. 54–57.

Меньшиков Ю.П., Полежаева Л.И., Ганнибал Л.Ф. Калиевый и бариевый прайдериты из Хибинского щелочного массива / Новые данные о минералах Кольского полуострова. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, **1979**. С. 18–24.

Отарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // Отечественная геология. **2017**. № 5. С. 37–44.

Пикалова В.С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Большетагнинского месторождения / Автореф. дис. ... канд. г.-м.н. М., **2017**. 24 с.

Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д., Кононова Н.Н. Механизмы образования высокобариевого флогопита и высокостронциевого апатита на заключительных стадиях эволюции щелочных магм // Геохимия. **2009**. № 6. С. 613–627.

Сорохтина Н.В. Минералогия карбонатитов в зонах контакта с ультраосновными, щелочными породами и фенитами Себьяврского массива. Автореф. дис. ... канд. г.-м.н. М., 2000. 20 с.

Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В., Кужугет Р.В., Монгуш А.А. Стрональсит $\text{SrNa}_2[(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_2]$ и ассоциирующие послемагматические амфиболы, гранаты и канкринит кальцитовых ийолитов интрузива Чик-Хем, Тува / Геология, магматизм и металлогения Центра Азии. 2018: Рудно-магматические системы Сангилены (щелочные интрузивы, карбонатиты). Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, **2018**. С. 108–113.

Сук Н.И., Котельников А.Р. Экспериментальное изучение распределения REE, Ва и Sr между силикатным расплавом и низкоконцентрированным водно-солевым флюидом при $T = 1250^\circ\text{C}$ и $P = 2$ кбар // Вестник ОНЗ РАН. **2011**. Т. 3. NZ6092.

Фролов А.А., Белов С.В. Комплексные карбонатитовые месторождения Зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия) // Геология рудн. месторожд. **1999**. Т. 41. № 2. С. 109–130.

Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ-Природа, **2003**. 494 с.

Хомяков А.П., Шпаченко А.К., Полежаева Л.И. Мелилитовая и редкоземельно-фосфорная минерализация г. Намуайв (Хибины) / Щелочной магматизм северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, **1990**. С. 106–119.

Чередищенко С.В., Дубинина Е.В. Бариевые полевые шпаты Ильмено-Вишневогорского комплекса (Южный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. **2017**. № 8. С. 17–22.

Шахмурадян А.Р., Евдокимов М.Д. Титановые и циркониевые минералы щелочно-сиенитовых пегматитов Маломурунского массива, Якутия // ЗВМО. **1997**. № 3. С. 32–42.

Strontium and Barium Minerals in Alkaline Rocks of the Bolshetagninsky Ijolite-Syenite-Carbonatite Massif (Southwestern Margin of the Siberian Craton)**V. B. Savelyeva^{a, *}, E. P. Bazarova^{a, **}, and E. A. Khromova^{b, ***}**^a*Institute of the Earth's Crust Siberian Branch RAS, Lermontova st., 128, Irkutsk, 664033 Russia*^b*Geological Institute N.L. Dobretsov Siberian Branch RAS, Sakhyanova st., 6a, Ulan-Ude, 670047 Russia***e-mail: vsavel@crust.irk.ru****e-mail: bazarova@crust.irk.ru*****e-mail: lena.khromova.00@mail.ru*

The paper displays data on Sr- and Ba-bearing minerals occurring in melteigite, ijolite, urtite, and nepheline syenite of the Bolshetagninsky ijolite-syenite-carbonatite massif. At the magmatic stage, strontium enters as an isomorphous admixture into calcite (SrO = 0.5–1.9 wt %) and fluorapatite (SrO = 0.6–2.6 wt %), while barium mainly enters in phlogopite and annite. Zonal phlogopite in urtite contains up to 8.4 wt % BaO (24 mol. % of kinoshitalite component); interstitial calcite in the same rock contains small ingrowths of barytocalcite. Stronalsite, strontianite, crichtonite, henrimeyerite, barite, celestite, Sr-bearing fluorocalcipyrochlore, Sr-bearing muscovite, and epidote have crystallized at the high-temperature post-magmatic stage. In the exocontact zone of the carbonatite stock, ijolite and nepheline syenite underwent biotitization, carbonatization, and K-feldspathization, followed by chloritization and formation, in some spots, of hyalophane and celsian segregations and veinlets. The formation of Ba-bearing muscovite and Ba-bearing manganese hydroxides took also place at the low-temperature hydrothermal stage. The presence of hyalophane and celsian in altered alkaline rocks is a peculiarity of the Bolshetagninsky massif, indicating the low activity of SO_4^{2-} in hydrothermal solutions.

Keywords: Bolshetagninsky massif, Uriksko-lysky graben, barium phlogopite, stronalsite, henrimeyerite, hyalophane, celsian

REFERENCES

- Andreeva E.D., Kononova V.A., Sveshnikova E.V., Yashina R.M. Igneous rocks. Alkaline rocks. Moscow: Nauka, **1984**. 415 p. (in Russian).
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Gieré R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: Nomenclature. *Canad. Miner.* **2010**. Vol. 48. P. 673–698.
- Beard A.D., Downes H., Hegner E., Sablukov S.M. Geochemistry and mineralogy of kimberlites from the Arkhangelsk Region, NW Russia: evidence for transitional kimberlite magma types. *Lithos.* **2000**. Vol. 51. P. 47–73.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. Primary, agpaite and deuteric stages in the evolution of accessory Sr, REE, Ba and Nb-mineralization in nepheline-syenite pegmatites at Pegmatite Peak, Bearpaw Mts, Montana. *Miner. Petrol.* **1999**. Vol. 67. P. 85–110.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. The mineralogy of Ba- and Zr-rich alkaline pegmatites from Gordon Butte, Crazy Mountains (Montana, USA): Comparisons between potassic and sodic agpaite pegmatites. *Contrib. Miner. Petrol.* **2002**. Vol. 143. P. 93–114.
- Cherednichenko S.V., Dubinina E.V. Barium feldspars of the Ilmeno-Vishnegorsky complex (Southern Urals). *Bull. IG Komi SC UB RAS.* **2017**. N 8. P. 17–22 (in Russian).
- Čopjakova R., Kotkova J. Composition of barian mica in multiphase solid inclusions from orogenic garnet peridotites as evidence of mantle metasomatism in a subduction zone setting. *Contrib. Miner. Petrol.* **2018**. Vol. 173. P. 106.
- Dongre A., Tappe S. Kimberlite and carbonatite dykes within the Premier diatreme root (Cullinan Diamond Mine, South Africa): New insights to mineralogical-genetic classifications and magma CO₂ degassing. *Lithos.* **2019**. Vol. 338–339. P. 155–173.
- Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: Sources, evolution and relation to the Triassic Siberian LIP. *Lithos.* **2019**. Vol. 332–333. P. 245–260.
- Droop G.T.R. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Miner. Mag.* **1987**. Vol. 51. P. 431–435.

Frolov A.A., Belov S.V. Complex carbonatite deposits of the Ziminsky ore region (Vostochny Sayan, Russia). *Geol. Ore Deposits*. **1999**. Vol. 41. N 2. P. 109–130 (in Russian).

Frolov A.A., Tolstov A.V., Belov S.V. Carbonatite deposits in Russia. Moscow: NIA–Priroda, **2003**. 494 p. (in Russian).

Essene E.J., Claflin C.L., Giorgetti G., Mata P.M., Peacor D.R., Árkai P., Rathmell M.A. Two-, three- and four-feldspar assemblages with hyalophane and celsian: implications for phase equilibria in BaAl₂Si₂O₈–CaAl₂Si₂O₈–NaAlSi₃O₈–KAlSi₃O₈. *Eur. J. Miner.* **2005**. Vol. 17. P. 515–535.

Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil. *Amer. Miner.* **1982**. Vol. 67. P. 997–1000.

Giebel R.J., Parsapoor A., Walter B.F., Braunger S., Marks M.A.W., Wenzel T., Markl G. Evidence for Magma–Wall rock interaction in carbonatites from the Kaiserstuhl volcanic complex (Southwest Germany). *J. Petrol.* **2019**. Vol. 60. N 6. P. 1163–1194.

Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Donskaya T.V., Motova Z.L., Vanin V.A. Age levels and geodynamic regimes of accumulation of the Precambrian strata of the Urik-Iya graben, south of the Siberian craton. *Geotectonics*. **2014**. N 5. P. 17–31 (in Russian).

Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Konopleva N.G., Kalashnikov A.O., Korchak Yu.A., Selivanova E.A., Yakovenchuk V.N. Rock-forming feldspars of the Khibiny alkaline massif (Kola Peninsula, Russia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. N 6. P. 1–17 (in Russian).

Kapustin Yu.L. Mineralogy of carbonatites. Leningrad: Nauka, **1971**. 290 p. (in Russian).

Khomyakov A.P., Shpachenko A.K., Polezhaeva L.I. Melilitic and rare earth-phosphorus mineralization of Namuaiv (Khibiny). In: *Alkaline magmatism of the northeastern part of the Baltic Shield*. Apatity: Publishing House of the KSC RAS, **1990**. P. 106–119 (in Russian).

Kogarko L.N., Kurat G., Ntaflou T. Henrymeyerite in the metasomatized upper mantle of eastern Antarctica. *Canad. Miner.* **2007**. Vol. 45. P. 497–501.

Kogarko L.N., Ryabchikov I.D., Kuzmin D.V. High-barium mica in olivinites of the Guli massif (Maimcha-Kotui province, Siberia). *Russian Geol. Geophys.* **2012**. Vol. 53. N 11. P. 1572–1579 (in Russian).

Koneva M.A. Banalsite and stronalsite from the pyroxenites of the Zhidoi massif. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1996**. N 2. P. 103–105 (in Russian).

Kozhevnikov O.K., Kukhrinkova N.V., Tugolukova G.A. Bolshe-Tagninsky massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites. In: *Endogenous minerals of the Sayano-Baikal mountain region*. Irkutsk: East Siberian Book Publishing House, **1974**. P. 134–163 (in Russian).

Kozulina T.V. Composition of rock-forming minerals in alkaline massifs of the Central Sangilen, South-Eastern Tuva. In: *Modern problems of magmatism and metamorphism*. Proc. All-Russian Conference. Vol. 1. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, **2012**. P. 275–277 (in Russian).

Krmíček L., Cempírek J., Havlín A., Přichystal A., Stanislav Houzar S., Krmíčková M., Gadas P. Mineralogy and petrogenesis of a Ba–Ti–Zr-rich peralkaline dyke from Šebkovice (Czech Republic): Recognition of the most lamproitic Variscan intrusion. *Lithos*. **2011**. Vol. 121. P. 74–86.

Liferovich R.P., Mitchell R.Kh., Shpachenko A.K., Zozulya D.R. An accessory mineral of nepheline syenites is a solid solution of banalsite–stronalsite. In: *Mineralogy throughout the entire space of this word. Proc. II Fersman Scientific Session of the Kola Branch of the Russian Mineralogical Society*. Apatity: Publishing House “K & M”, **2005**. P. 54–57 (in Russian).

Liferovich R.P., Mitchell R.H. Paragenesis and composition of banalsite, stronalsite, and their solid solution in nepheline syenite and ultramafic alkaline rocks. *Canad. Miner.* **2006**. Vol. 44. P. 929–942.

Maitra M., Bhattacharyya A. Report of Ba–Fe–titanate in lamproite dyke of Nonia Nala, Barakar formation, Gondwana coalfield, Eastern India and its significance. *J. Geol. Soc. India*. **2015**. Vol. 86. P. 295–299.

Menshikov Yu.P., Polezhaeva L.I., Hannibal L.F. Potassium and barium priderites from the Khibiny alkaline massif. In: *New data on the minerals of the Kola Peninsula*. Apatity: Kola Branch of the USSR Acad. Sci., **1979**. P. 18–24 (in Russian).

Mitchell R.H., Vladykin N.V. Rare earth element-bearing tausonite and potassium barium titanates from the Little Murun potassic alkaline complex, Yakutia, Russia. *Miner. Mag.* **1993**. Vol. 57. P. 651–664.

Mitchell R.H., Yakovenchuk V.N., Chakhmouradian A.R., Burns P.C., Pakhomovsky Ya.A. Henrymeyerite, a new hollandite–type Ba–Fe titanate from the Kovdor complex, Russia. *Canad. Miner.* **2000**. Vol. 38. P. 617–626.

Oparin N.A., Oleinikov O.B., Babushkina S.A. Phlogopite from the Manchara and Aprelskaya pipes (Khompu-Maya kimberlite field, Central Yakutia). *Otechestvennaya geologiya*. **2017**. N 5. P. 37–44 (in Russian).

Pikalova V.S. Geological and economic assessment of a new potentially industrial type of niobium ores on the example of the Bolshetagninskoye deposit. Ph. D. thesis syn. Moscow: VIMS, **2017**. 24 p. (in Russian).

Platt R.G. Perovskite, loparite and Ba–Fe hollandite from the Schryburt Lake carbonatite complex, northwestern Ontario, Canada. *Miner. Mag.* **1994**. Vol. 58. Is. 390. P. 49–57.

Rampilova M., Doroshkevich A., Shrinivas Viladkar S., Zubakova E. Mineralogy of Dolomite Carbonatites of Sevathur Complex, Tamil Nadu, India. *Minerals*. **2021**. Vol. 11. P. 355.

Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Kononkova N.N. Mechanisms of formation of high-barium phlogopite and high-strontium apatite at the final stages of evolution of alkaline magmas. *Geochemistry*. **2009**. N 6. P. 613–627 (in Russian).

Sorokhtina N.V. Mineralogy of carbonatites in zones of contact with ultrabasic, alkaline rocks and fenites of the Sebyavr massif. Ph. D. thesis syn. Moscow, **2000**. 20 p. (in Russian).

Spiridonov E.M., Putintseva E.V., Kuzhuget R.V., Mongush A.A. Stronalsite $\text{SrNa}_2[(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_2]$ and associated postmagmatic amphiboles, garnets and cancrinite in calcite ijolites of the Chik-Khem intrusion, Tuva. In: *Geology, magmatism and metallogeny of Central Asia. 2018: Ore-magmatic systems of Sangilen (alkaline intrusions, carbonatites)*. Kyzyl: TuvIKOPR SB RAS, **2018**. P. 108–113 (in Russian).

Suk N.I., Kotelnikov A.R. Experimental study of the distribution of REE, Ba and Sr between a silicate melt and a low-concentration water-salt fluid at $T = 1250^\circ\text{C}$ and $P = 2$ kbar. *Bull. ESB RAS*. **2011**. Vol. 3. NZ6092 (in Russian).

Shakhmuradyan A.R., Eydokimov M.D. Titanium and zirconium minerals of alkaline-syenite pegmatites of the Malomurun massif, Yakutia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1997**. N 3. P. 32–42 (in Russian).

Zhuravleva L.N., Yurkina K.V., Ryabeva E.G. Praiderite is the first find in the USSR. *Dokl. Acad. Sci. USSR*. **1978**. Vol. 239. N 2. P. 435–438 (in Russian).

Zurevinski S.E., Mitchell R.H. Highly evolved hypabyssal kimberlite sills from Wemindji, Quebec, Canada: insights into the process of flow differentiation in kimberlite magmas. *Contrib. Miner. Petrol.* **2011**. Vol. 161. P. 765–776.

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

ФЛЮОБОРИТ В РУДОВМЕЩАЮЩИХ СКАРНАХ МАГНЕТИТ-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАШ В КАРАМАЗАРЕ (СЕВЕРНЫЙ ТАДЖИКИСТАН)

© 2023 г. У. А. Ятимов^{1, *}, д. чл. В. В. Масленников¹,
М. А. Рассомахин¹, П. В. Хворов¹, д. чл. С. М. Лебедева¹

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, тер. Ильменский заповедник, Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия

*e-mail: umed1990@list.ru

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 21.10.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Флюоборит $Mg_3(BO_3)(F,OH)_3$ обнаружен в магнетитсодержащих скарнах в нескольких метрах от контакта доломит-известковых и гранодиоритовых пород месторождения Акташ. Его диагностика осуществлена с помощью оптических, электронно-микроскопических исследований и определения химического состава (мас. %): MgO 63.29–64.56, F 18.35–21.91, B_2O_3 18.44–18.58, H_2O 4.02–5.62, $-O=F_2$ 7.73–9.23, сумма 99.27–99.85. Так же минерал диагностирован методами рентгенофазового анализа (рефлексы 7.702, 4.445, 3.584, 2.908, 2.417, 2.22, 2.133, 1.806, 1.763, 1.678, 1.635, 1.554, 1.534, 1.485 и 1.477 Å) и рамановской спектроскопии (КР спектры с полосами 952, 848, 534, 423, 345, 239 и 175 cm^{-1}). Радиально-лучистые агрегаты флюоборита, встречающиеся в серпентине, частично замещены флюоритом. На отдельные вершины кристаллов флюоборита выросли метакристаллы магнетита. В метакристаллах магнетита сохраняются пойкилитовые включения флюоборита и флюорита.

Ключевые слова: флюоборит, бораты, серпентин-флюорит-флюоборит-магнетитовая ассоциация, скарны, месторождение Акташ, Карамазар

DOI: 10.31857/S0869605523010100, **EDN:** NIAWVN

Флюоборит $Mg_3(BO_3)(F,OH)_3$ – конечный член изоморфного ряда флюоборит–гидроксилборит, относится к гексагональным моноборатам с треугольными BO_3 -группами (Takeuchi, 1950; Руднев и др., 2007; Булах и др., 2021). Этот минерал впервые описан в 1926 г. под названием “фторгидроксилборат магния” на скарновом железорудном месторождении Норберг в Швеции (Geijer, 1926). Наиболее характерен он для борных, олово-борных и бор-железорудных месторождений (Граменицкий, 1966; Перцев, 1971; Александров, 1982; Kwak, Nicholson, 1988; Maginsea, 2000). Флюоборит отмечается в вулканогенно-осадочных и галогенных толщах. Например, он описан на Непском месторождении калийных солей в галит-кальцитовых и галит-ангидритовых породах (Аполлонов и др., 1988), а его проявления были обнаружены в туфовых покровах Ноцера и Лацио Италии (Caronera et al., 2003; Lacalamita et al., 2017). Максимально фтористый флюоборит обнаружен в активных фумарольных эксгаляциях (вулкан Толбачик, Камчатка); для данного бората это новые условия минерализации (Булах и др., 2021). На территории Чаткало-Кураминских гор (Узбекистан) флюоборит найден на железорудных месторождениях Сюреньята и Гавасай (Едовин, Утехин, 1962; Попов, 1975). Нами флюоборит обнаружен в скарнированных породах железо-

рудного месторождения Акташ в Кармазаре. Это первая находка флюоборита не только на этом месторождении, но и для всей территории района Кармазара.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Акташ расположено в Кансайском рудном поле Западно-Кармазарского рудного района (юго-западные отроги Кураминского хребта) в северной части Республики Таджикистан. Район месторождения Акташ сложен осадочными, изверженными породами и скарнами, образовавшимися по вулканогенно-осадочным отложениям (рис. 1). Осадочные толщи сформированы доломитами и известняками (D_3-C_1), а также молассовыми отложениями (MZ–KZ), слагающими южную предгорную часть хребта Кармазар (Вольфсон, 1951; Рахимов, 1978). Интрузивные породы представлены гранодиоритами (C_2), гранодиорит-порфирами и диоритами (C_2-T_2), с которыми и связано развитие скарнов (Вольфсон, Титов, 1965).

Скарны залегают в основном на контакте карбонатных пород с гранодиоритами или гранодиорит-порфирами. В ассоциации со скарнами и известняками находится крупное стратиформное магнетитовое тело. Главными минералами скарнов являются пироксены ряда диопсид–геденбергит, амфиболы ряда актинолит–тремолит, гранаты ряда гроссуляр–андрадит, серпентин, эпидот и кальцит. Руды по минеральному составу подразделены на три типа: галенит-пирит-магнетитовые, галенит-сфалеритовые и халькопирит-пирротин-пиритовые (Рахимов, 1978; Ятимов и др., 2022).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы для исследований были отобраны штучным методом из небольшого выхода магнетитовых руд на месторождении Акташ в 2019 г. Минеральный состав изучен в аншлифах и шлифах на микроскопе Olympus BX51 с цифровой приставкой Olympus DP12. Для определения химического состава минералов использован сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Количественный анализ проведен с использованием эталонов MINM-25-53 фирм “AS-TIMEX Scientific Limited” (стандарт № 01-044) и “Microanalysis Consultants Ltd.” (стандарт № 1362).

Спектры комбинационного рассеяния света (КР) получены на спектрометре iHR 320 LabRAM фирмы Horiba Jobin Yvon, оснащенным микроскопом Olympus BX41, TV камерой и охлаждаемым CCD детектором (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Возбуждающей служила линия 632.8 нм He-Ne лазера ($P_{max} = 20$ мВт), спектральная ширина щели составляла 2 см^{-1} . Сбор рассеянного света осуществлен по схеме на отражение (180°) с зерен размером от 5 мкм со временем накопления 10 с. Запись спектров осуществлялась в программе Labspec v.5, спектры диагностированы с использованием базы данных RRUFF (<http://rruff.info>).

Количественный рентгенофазовый анализ руд выполнен на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Расчет количества кристаллических фаз проведен методом Ритвельда (программы SIROQUANT V4).

ФЛЮОБОРИТ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАШ

На месторождении Акташ флюоборит встречается в ассоциации с флюоритом и магнетитом. Эти минералы образуют прожилки и линзы с пятнистой и вкрапленной текстурами (рис. 2, а) в скарнированных доломит-известковистых породах в 3–5 м от их контакта с гранодиоритами. Участки, обогащенные флюоборитом, имеют слоистость, которая подчеркивается вкрапленностью мелкозернистого магнетита. Слои пересечены прожилками грубозернистого магнетита, ассоциирующего с флюоритом,

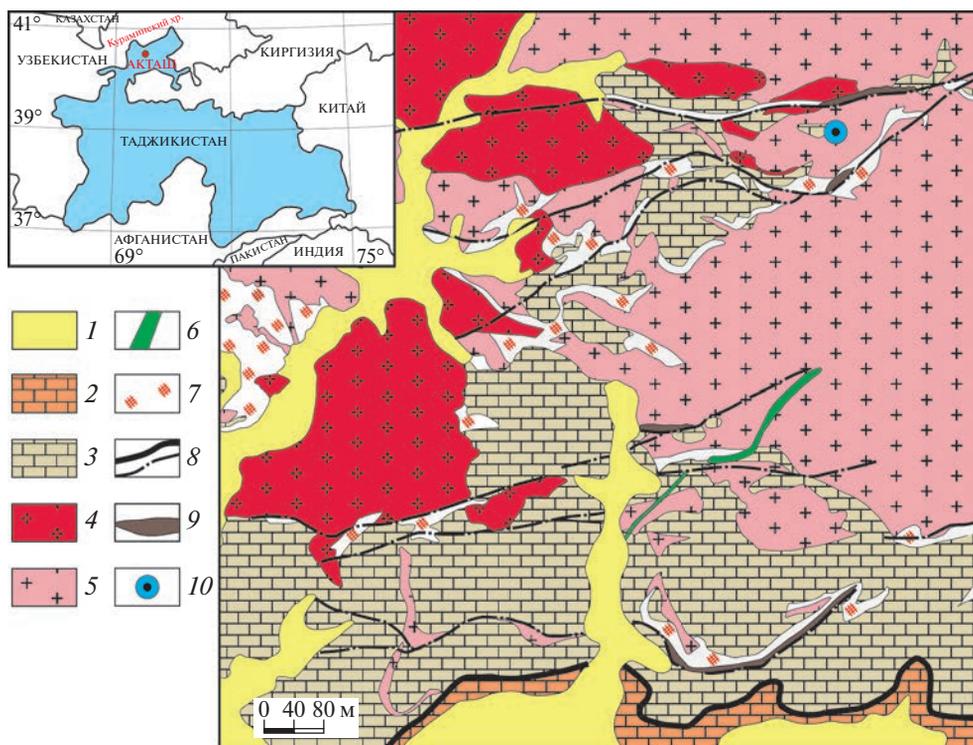


Рис. 1. Географическое положение (врезка) и геологическая карта восточной части месторождения Акташ (Фахриддинов и др., 1974 г., с упрощениями).

1 – четвертичные отложения; 2 – карбонатные породы палеогена; 3 – карбонатные породы верхнего девона–нижнего карбона; 4 – гранодиорит-порфиры среднего карбона–нижнего триаса; 5 – гранодиориты среднего карбона; 6 – диоритовые порфириды верхнего триасса; 7 – скарны; 8 – разрывные нарушения; 9 – полиметаллические рудные тела; 10 – точка отбора образцов.

Fig. 1. Geographical position and geological map of the Aktash deposit, simplified after (Fakhriddinov et al., 1974). 1 – Quaternary sediments; 2 – Paleogene carbonate rocks; 3 – Upper Devonian–Lower Carboniferous carbonate rocks; 4 – Middle Carboniferous–Early Triassic porphyry granodiorite; 5 – Middle Carboniferous granodiorite; 6 – Late Triassic porphyry diorite; 7 – skarns; 8 – thrusts and ore zones; 9 – polymetallic ore bodies; 10 – location of samples.

хлоритом и серпентином (рис. 2, а). В качестве второстепенных и аксессуарных минералов в ассоциации с флюоборитом диагностированы серпентин, доломит, хлорит, пирит, халькопирит, гематит, бадделейт, апатит, гранат, пироксен, валлериит и ангидрит.

Флюоборит представлен тонкими игольчатыми, удлинённо-пластинчатыми субгедральными кристаллами, собранными в радиально-лучистые агрегаты. (рис. 2, б, в). Толщина отдельных индивидов достигает 30 мкм при длине до 150 мкм. Кристаллы флюоборита частично замещались флюоритом. Вершины кристаллов обрастали метакристаллами магнетита.

Цвет агрегатов флюоборита – белый (рис. 2, а), отдельные кристаллы – полупрозрачные. В подавляющем большинстве случаев кристаллы флюоборита формируют сноповидные или радиально-лучистые сростания (рис. 2, б, в). Наблюдаются признаки замещения кристаллов флюоборита флюоритом и обрастание их метакристаллами магнетита (рис. 2, в). Редко отмечаются включения флюоборита в магнетите. Иногда в

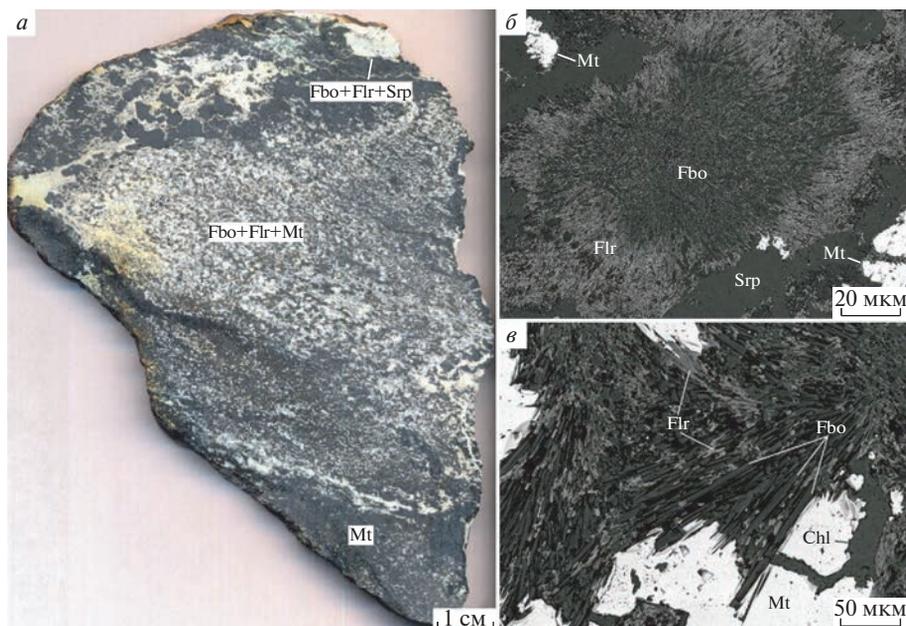


Рис. 2. Текстурно-структурные особенности флюорит-флюоборит-магнетитовой ассоциации.

a – сочетание вкрапленной и пятнистой текстур; *б* – радиально-лучистое гнездо спутанно-волокнистого и игольчатого флюоборита, частично замещенное флюоритом в серпентине; *в* – вершины игольчатых кристаллов флюоборита, частично замещенные флюоритом, обросли кристаллами магнетита, с прожилками хлорита. Mt – магнетит, Flr – флюорит, Fbo – флюоборит, Srp – серпентин, Chl – хлорит. Полированный образец (*a*), СЭМ-фото (*б*, *в*).

Fig. 2. Textural and structural features of the fluorite–fluoroborite–magnetite assemblage.

a – combination of interspersed and spotted textures; *б* – radiant nest of entangled-fibrous and acicular fluoroborite, partially replaced by fluorite in serpentine; *в* – acicular tops of fluorite crystals, partially replaced by fluorite, overgrown with magnetite crystals which are crossed by chlorite veinlets. Mt, magnetite, Flr, fluorite, Fbo, fluoroborite, Srp, serpentine, Chl, chlorite. Polished sample (*a*), BSE images (*б*, *в*).

пористых флюорит-флюоборитовых агрегатах встречаются гипергенные гидроксиды марганца, меди и магния с примесью алюминия, цинка, кобальта, кремния и кальция.

В химическом составе флюоборита в качестве элементов-примесей обнаружены CaO (0.10–1.45 мас. %) и FeO (0.48–1.29 мас. %) (табл. 1). Содержания фтора колеблются в пределах 18.35–21.91 мас. %, что соответствует содержанию минала $Mg_3[BO_3]F_3$ (61–72 мол. %).

Полученные рентгеновские порошковые данные для агрегата флюоборита соответствуют смеси флюоборита (рефлексы 7.702, 4.445, 3.584, 2.908, 2.417, 2.22, 2.133, 1.806, 1.763, 1.678, 1.635, 1.554, 1.534, 1.485 и 1.477 Å, эталон ICDD 11-346), флюорита (рефлексы 3.156, 1.93, 1.647 и 1.366 Å, эталон ICDD 35-816), магнетита (рефлексы 4.849, 2.971, 2.533, 2.099, 1.715, 1.617 и 1.485 Å, эталон ICDD 86-1345) и хлорита (рефлексы 14.349, 7.19, 4.784, 3.584, 2.012 и 1.974 Å, эталон ICDD 29-853) (рис. 3).

Сопоставление зарегистрированных в различных точках исследуемого образца КР-спектров со спектрами из базы данных Rruff.info показало, что положения КР-полос соответствуют флюобориту (эталонный спектр № R061042) (рис. 4, *a*, *б*). КР спектры флюоборита из месторождения Акташ с полосами 952, 848, 534, 423, 345, 239 и 175 cm^{-1} ,

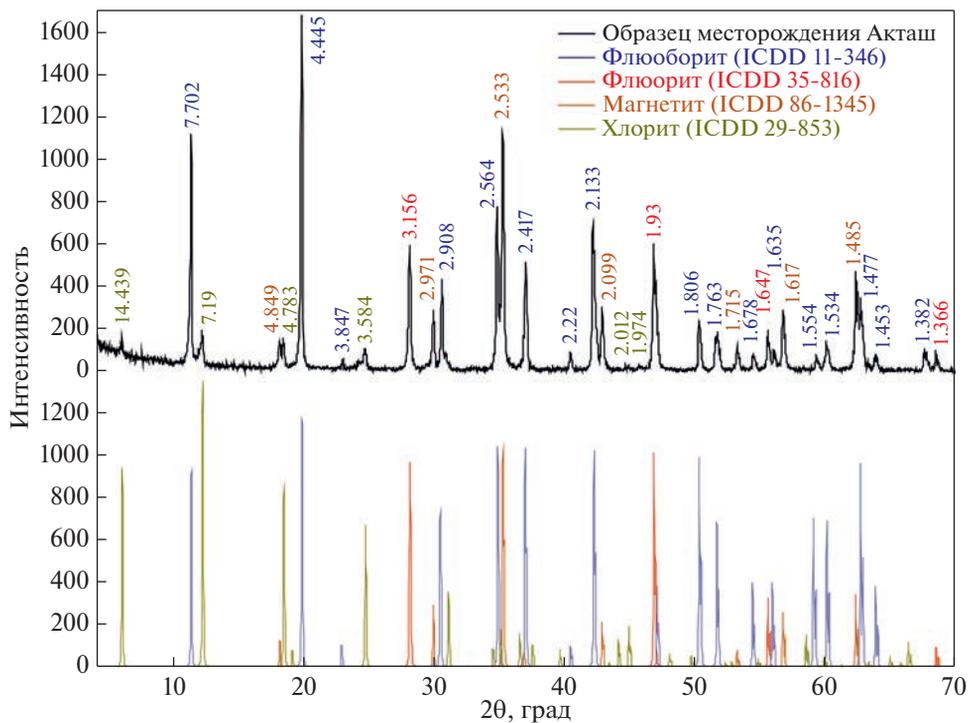


Рис. 3. Результаты рентгеновских порошковых данных.

Fig. 3. Results of X-ray powder data.

сходны со спектром флюоборита № R061042 в области $1200\text{--}150\text{ см}^{-1}$ (рис. 4), дополнительные линии могут быть вызваны тонкой примесью флюорита.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В магнетитовых рудах месторождения Акташ сохранились признаки двух стадий формирования – доскарновой и скарновой. Разнообразные по микроструктуре доскарновые разновидности магнетита, слагающие слоистые руды, “уничтожались” серпентин-магнетит-пироксеновыми скарнами (Ятимов и др., 2022). Эти магнетитовые руды не содержат боратов. Подобная флюорит-флюоборит-магнетитовая ассоциация типична и для других скарнированных железорудных месторождений (Граменицкий, 1966; Перцев, 1971; Александров, 1982, 1990). Однако на месторождении Акташ основная флюорит-магнетит-скарновая минерализация по отношению к флюобориту оказывается более поздней.

Считается, что в скарнах он образуется путем взаимодействия насыщенных бором и фтором водных флюидов с магнезиальными карбонатными породами при температурах около $380\text{--}450\text{ °C}$ (Tell, 1972; Lacalamita et al., 2017). Для флюоборита источником бора и фтора, предположительно, служили гидротермальные флюиды, а источником магния являлись доломитовые породы (Булах и др., 2021). Другим источником могли бы быть осадочные и вулканогенно-осадочные отложения, имеющие более высокое содержание бора, чем магматические породы (Барсуков и др., 1965).

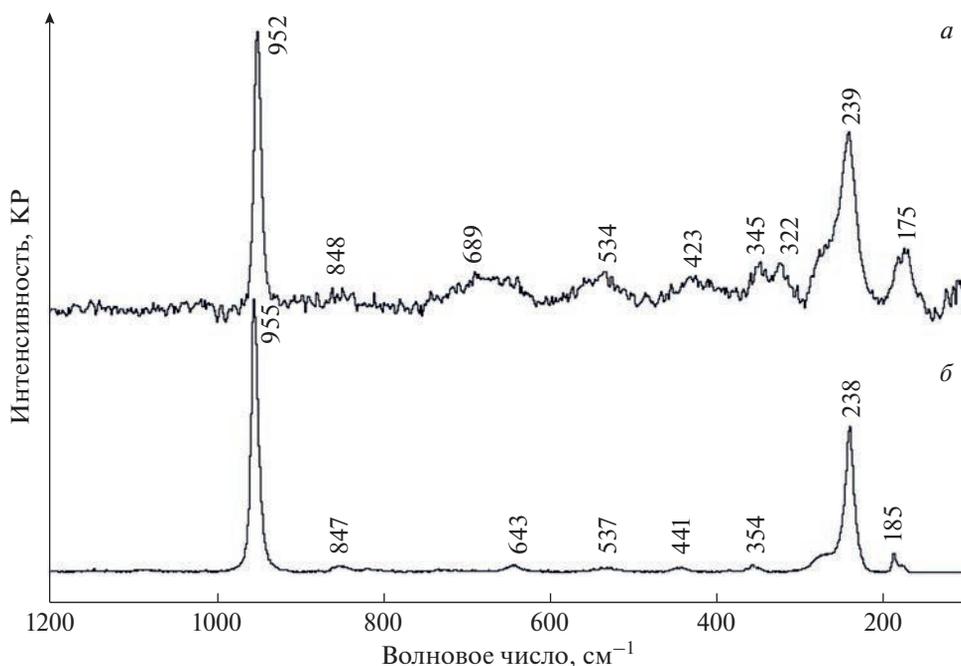


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния (КР) флюоборита из месторождения Акташ (а) и флюоборита из базы RRUFF (б).

Fig. 4. The Raman spectra of fluoroborite from the Aktash deposit (a) and fluoroborite data from RRUFF (b).

Таблица 1. Химический состав (мас. %) флюоборита месторождения Акташ
Table 1. Chemical composition (wt %) of fluoroborite from the Aktash deposit

№	MgO	CaO	FeO	F	Σ	*B ₂ O ₃	*H ₂ O	-O=F ₂	Σ _{общ}	F
1	63.34	—	1.29	18.35	82.98	18.44	5.62	7.73	99.31	61
2	63.73	—	0.94	18.83	83.50	18.50	5.43	7.93	99.50	62
3	63.89	—	0.48	19.92	84.29	18.47	4.89	8.39	99.26	66
4	64.31	0.19	—	20.67	85.17	18.56	4.61	8.70	99.64	68
5	63.29	1.45	—	20.29	85.03	18.47	4.72	8.54	99.68	67
6	64.46	—	—	21.91	86.37	18.55	4.02	9.23	99.71	72
7	64.37	0.10	—	21.24	85.71	18.55	4.33	8.94	99.65	70

Формула

1	(Mg _{2.97} Fe _{0.03}) _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{1.82} (OH) _{1.18}) _{3.00}
2	(Mg _{2.98} Fe _{0.02}) _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{1.87} (OH) _{1.13}) _{3.00}
3	(Mg _{2.99} Fe _{0.01}) _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{1.98} (OH) _{1.02}) _{3.00}
4	(Mg _{2.99} Ca _{0.01}) _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{2.04} (OH) _{0.96}) _{3.00}
5	(Mg _{2.96} Ca _{0.04}) _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{2.01} (OH) _{0.99}) _{3.00}
6	Mg _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{2.16} (OH) _{0.84}) _{3.00}
7	(Mg _{2.99} Ca _{0.01}) _{3.00} (BO ₃) _{1.00} (F _{2.10} (OH) _{0.90}) _{3.00}

Примечание. Формула флюоборита рассчитана на сумму катионов равную 3. * Содержания B₂O₃ и H₂O рассчитаны с учетом электронной нейтральности формул минералов. Указана фтористость (F) флюоборита, рассчитанная по формуле $F = F / (F + OH) \times 100\%$. Прочерк — содержание компонента ниже порога чувствительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиально-лучистые агрегаты флюоборита обнаружены в флюорит-магнетитсодержащих скарнах в нескольких метрах от контакта доломит-известковых и гранодиоритовых пород месторождения Акташ. Для диагностики флюоборита, кроме определения состава и рентгенофазового анализа, были получены спектры комбинационного рассеяния. Игольчатые кристаллы флюоборита частично замещены флюоритом и обросли поздними метакристаллами магнетита.

Минералогические исследования проведены при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00215). Полевые работы выполнялись в рамках госбюджетной темы Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (№ 122031600292-6).

Авторы благодарны к. г.-м. н. С.С. Сафаралиеву за оказанную помощь и содействие в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров С.М.* Геохимия бора и олова в месторождениях магнезиально-скарновой формации. М.: Наука, **1982**. 272 с.
- Александров С.М.* Геохимия скарно- и рудообразования в доломитах. М.: Наука, **1990**. 344 с.
- Аполлонов В.Н., Галкин Г.А., Кошуг Д.Г., Кривопапов О.А., Садовый В.Ф.* О борной минерализации в калиеносной пачке Непского месторождения // Геология и геофизика. **1988**. № 3. С. 24–30.
- Барсуков В.И., Камишина Е.М., Лисицын А.Е., Соколов Г.А., Шабинь Л.И.* Геохимия бора, условия образования и размещения борных месторождений. Москва: Недра, **1965**. 328 с.
- Булах М.О., Пеков И.В., Чуканов Н.В., Япаскурт В.О., Кошлякова Н.Н., Бритвин С.Н., Сидоров Е.Г.* Максимально фтористый флюоборит из фумарольных эксгаляций вулкана Толбачик (Камчатка) // ЗРМО. **2021**. Т. 150. № 2. С. 42–56.
- Вольфсон Ф.И.* Структура и генезис свинцово-цинковых месторождений Западного Карамазара. М.: Изд. АН СССР, **1951**. 245 с.
- Вольфсон Ф.И., Титов В.Н.* Основные особенности геологического строения Кансайского рудного поля / Геология свинцово-цинковых месторождений Кансайского рудного поля. М.: Наука, **1965**. С. 21–29.
- Граменицкий Е.Н.* Анализ парагенезисов флюоборита // Геология рудн. месторожд. **1966**. № 1. С. 16–32.
- Едовин Ю.И., Утехин Г.М.* О флюоборите из Средней Азии // Доклады АН СССР. **1962**. Т. 142. №. 3. С. 674–678.
- Перцев Н.Н.* Парагенезисы борных минералов магнезиальных скарнов. М.: Наука, **1971**. 193 с.
- Попов В.С.* Флюоборит / Минералы Узбекистана. Ташкент: Фан УзССР, **1975**. Т. 2. С. 149–150.
- Рахимов Ш.Х.* Геолого-структурные условия локализации скарново-полиметаллических месторождений Карамазара. Ташкент: Фан, **1978**. 142 с.
- Руднев В.В., Чуканов Н.В., Нечелюстов Г.Н., Ямнова Н.А.* Гидроксилборит, $Mg_3[BO_3](OH)_3$ – новый минерал и изоморфный ряд флюоборит–гидроксилборит // ЗРМО. **2007**. № 1. С. 69–82.
- Ятимов У.А., Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Котляров В.А., Шиловских В.В.* Золото-теллуридная минерализация в рудах Pb-Zn-Fe скарнового месторождения Акташ (Западный Карамазар, Таджикистан) // Геология рудн. месторожд. **2022**. Т. 64. № 4. С. 362–381.

**Fluoborite in the Ore-Bearing Skarns of the Aktash
Magnetite-Polymetallic Deposit in the Karamazar (Northhern Tajikistan)**

**U. A. Yatimov^{a, *}, V. V. Maslennikov^a,
M. A. Rassomakhin^a, P. V. Hvorov^a, and S. M. Lebedeva^a**

^a*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Ilmeny Reserve, 1, Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia*

^{*}*e-mail: umed1990@list.ru*

Fluoborite has been for the first time discovered in magnetite-bearing skarns at the distance of few meters from the contact between dolomite-carbonate and granodiorite of the Aktash deposit. Fluoborite, $Mg_3(BO_3)(F,OH)_3$, was revealed and studied with optical and electron microscopy and determination of its chemical composition (wt %): MgO 63.29–64.56,

F 18.35–21.91, B₂O₃ 18.44–18.58, H₂O 4.02–5.62, –O=F₂ 7.73–9.23, total 99.27–99.85. The identity of the mineral has been confirmed by X-ray phase analysis (reflections 7.702, 4.445, 3.584, 2.908, 2.417, 2.22, 2.133, 1.806, 1.763, 1.678, 1.635, 1.554, 1.534, 1.485, 1.477 Å) and Raman spectroscopy (Raman spectra with bands 952, 848, 534, 423, 345, 239 and 175 cm⁻¹). Radial-columnar aggregates of fluoborite occurring in serpentine are partially replaced by fluorite, and some tops of its crystals are overgrown by magnetite metacrystals. These magnetite metacrystals contain poikilites of fluoroborite and fluorite.

Keywords: fluoborite, borates, serpentine-fluorite-fluoborite-magnetite associations, skarns, Aktash deposit, Karamazar

REFERENCES

- Alexandrov S.M. Geochemistry of boron and tin in deposits of the magnesian-skarn formation. Moscow: Nauka, **1982**. 272 p. (in Russian).
- Aleksandrov S.M. Geochemistry of skarn and ore formation in dolomites. Utrecht, Tokyo: VSP, **1998**. 300 p.
- Apollonov V.N., Galkin G.A., Koshchug D.G., Krovopalov O.A., Sadovyi V.F. On boron mineralization in the potassium-bearing member of the Nepskoe Deposit. *Russian Geol. Geophys.* **1988**. N 3. P. 24–30 (in Russian).
- Barsukov V.I., Kamshilina E.M., Lisitsyn A.E., Sokolov G.A., Shabinyan L.I. Geochemistry of boron, conditions of formation and location of boron deposits. Moscow: Nedra, **1965**. 328 p. (in Russian).
- Bulakh M.O., Pekov I.V., Chukanov N.V., Yapaskurt V.O., Koshlyakova N.N., Britvin S.N., Sidorov E.G. Extremely fluorine-rich fluoborite from fumarolic exhalations of the Tolbachik volcano (Kamchatka). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2021**. Vol. 150. N 2. P. 42–56 (in Russian).
- Caponera I., Fiori S., Pucci R. Fluoborite, piombo nativo, richterite ed altri interessanti ritrovamenti Colli Albani. *Gruppo Mineralogico Romano*. **2003**. Vol. 1–2. P. 3–13.
- Edovin Yu.I., Utekhin G.M. On fluoroborite from Central Asia. *Doklady Acad. Sci. USSR*. **1962**. Vol. 142. N 3. P. 674–678 (in Russian).
- Geijer P. Norbergite and fluoborite, two new minerals from the Norberg mining district. *Geologiska Foreningen i Stockholm Forhandlingar*. **1926**. Vol. 48. P. 84–85.
- Gramenitskii E.N. The analysis of the fluoborite's paragenesis. *Geol. Ore Deposits*. **1966**. N 1. P. 16–32 (in Russian).
- Kwak T.A.P., Nicholson M. Szaibelyite and fluoborite from the St. Dizier Sn-borate skarn deposit, NW Tasmania, Australia. *Miner. Mag.* **1988**. Vol. 52. P. 713–716.
- Lacalamita M., Balassone G., Schingaro E., Mesto E., Mormone A., Piochi M., Ventrucci G., Joachimski M. Fluorophlogopite-bearing and carbonate metamorphosed xenoliths from the Campanian Ignimbrite (Fiano, southern Italy): crystal chemical, geochemical and volcanological insights. *Miner. Mag.* **2017**. Vol. 81. N 5. P. 1165–1189.
- Marincea St. Fluoborite in magnesian skarns from Baita Bihor (Bihor Massif, Apuseni Mountains, Romania). *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*. **2000**. Vol. 8. P. 357–371.
- Pertsev N.N. Boron mineral assemblages in magnesian skarns. Moscow: Nauka, **1971**. 193 p. (in Russian).
- Popov V.S. Fluoborite. In: *Minerals of Uzbekistan*. Tashkent: Fan UzSSR, **1975**. Vol. 2. P. 149–150 (in Russian).
- RRUFF Project. An integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals. **2015**. <http://rruff.info>.
- Rakhimov Sh.Kh. Geological and structural conditions of localization of skarn-polymetallic deposits of the Karamazar. Tashkent: Fan, **1978**. 142 p. (in Russian).
- Rudnev V.V., Chukanov N.V., Nechelyustov G.N., Yamnova N.A. Hydroxylborite, Mg₃(BO₃)(OH)₃, a new mineral species and isomorphous series fluoborite–hydroxylborite. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2007**. N 1. P. 69–82 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2007**. Vol. 49. P. 710–719).
- Takeuchi Y. The structure of fluoborite. *Acta Cryst.* **1950**. Vol. 3. P. 208–209.
- Tell I. Hydrothermal studies of fluorine and boron metamorphic reactions in dolomite. In: *Publications from the Institutes of Mineralogy, Paleontology and Quaternary Geology, University of Lund, Sweden*. **1972**. Vol. 176. P. 1–63.
- Vol'fon F.I. The structure and genesis of lead-zinc deposits of Western Karamazar. Moscow: Acad. Sci. USSR, **1951**. 245 p. (in Russian).
- Vol'fon F.I., Titov V.N. Main features of geological structure of the Kansai ore field. In: *Geology of Pb–Zn deposits of the Kansai ore field*. Moscow: Nauka, **1965**. P. 21–29 (in Russian).
- Yatimov U.A., Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Shilovskikh V.V. Gold-telluride mineralization of the Aktash Pb–Zn–Fe skarn deposit (Western Karamazar, Tajikistan). *Geol. Ore Deposits*. **2022**. Vol. 64. N 4. P. 362–381.

ИСТОРИЯ НАУКИ

**МИНЕРАЛЫ, НАЗВАННЫЕ В ЧЕСТЬ ВЫПУСКНИКОВ И СОТРУДНИКОВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА
(к 250-летию юбилею Санкт-Петербургского Горного университета)**

© 2023 г. Почетный член В. Г. Кривовичев¹, *, д. чл. В. В. Смоленский², **

¹*Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

²*Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия, 2,
Санкт-Петербург, 199106 Россия*

**e-mail: v.krivovichev@spbu.ru*

***e-mail: smolenskiy_vv@pers.spmi.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принята к публикации 20.12.2022 г.

Статья посвящена 250-летию юбилею Санкт-Петербургского горного университета (Горного института). История университета тесно связана с именами ученых, внесших огромный вклад в развитие минералогии и сопредельных наук. Имена 57 геологов и минералогов — выпускников и сотрудников института всегда вошли в историю минералогии. В их честь названо 62 минеральных вида. В статье кратко изложены научные интересы и достижения педагогов, ученых и горных инженеров, именами которых названы минералы.

Ключевые слова: Санкт-Петербургский горный университет, виды минералов, названия минералов, история наук, общая минералогия

DOI: 10.31857/S0869605523010069, **EDN:** NHVOPM

250-летняя история Санкт-Петербургского горного университета тесно связана с именами ученых и педагогов, выпускников и сотрудников, которые внесли огромный вклад в развитие минералогии и сопредельных наук. В статье кратко изложены биографические сведения, научные интересы и достижения выпускников и педагогов Горного, именами которых названы минералы.

Предварительно отметим, что минералы в данном обзоре расположены не алфавитном порядке, а в “историческом” — в соответствии с годами учебы и работы в Горном тех, в честь кого они названы, чтобы таким образом отразить 250-летнюю историю развития Горного института через судьбы его выпускников и сотрудников. В конце каждого блока приведены современный вариант кристаллохимической формулы минерального вида, место первой находки (type locality) и библиографическая ссылка на авторов открытия минерала. Основная часть биографической информации получена из открытых источников — биографических справочников и энциклопедий. Некоторые спорные моменты дополнительно уточнялись в архивах Горного музея. Поскольку на протяжении 250 лет Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ) несколько раз менял свое название, напомним те из них, которые упоминаются в тексте статьи: Горный кадетский корпус (1804–1834), Институт Корпуса горных инженеров (1834–1866), Горный институт (1866–1924) и Ленинградский горный институт (1924–1992).

XIX век.

1. **Дмисоколовит** (dmisokolovite) – в память о минералогe и геологе, профессоре Дмитрии Ивановиче Соколове (1788–1852). Выпускник Горного кадетского корпуса 1805 г. Был оставлен при корпусе для подготовки к званию преподавателя. С 1809 г. – преподаватель горных наук – геологии, геогнозии и минералогии. Главный смотритель музея (1827), а также минералогического магазина. Автор двухтомного “Руководства к минералогии” (1832) и трехтомного “Курса геогнозии” (1839) – первого русского учебника геологии. Инспектор классов Горного корпуса (1826–1840), помощник директора корпуса по учебной части, член Ученого комитета. Инженер-генерал-майор (1840). Проработал в Горном более 40 лет. Одновременно заведовал кафедрой минералогии и геогнозии Санкт-Петербургского университета (1822–1844), руководил работами по геологической съемке горных округов Урала, впервые обосновал (1839) выделение красноцветных отложений Заволжья в самостоятельную систему, позднее названную пермской. Организатор (1825) и редактор “Горного журнала”. Один из основателей Российского минералогического общества (1817). Академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук (1839), почетный член отделения языка и словесности Петербургской Академии наук (1841). $[K_3Cu_5AlO_2(AsO_4)_4]$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Pekov et al., 2015)].

2. **Гессит** (hessite) – в честь химика, профессора Германа Ивановича Гесса (1802–1850). После окончания медицинского факультета Дерптского университета получил назначение в Иркутск, где увлекся геологическими наблюдениями, минералогией и химией настолько, что, уже в 1828 г. получил звание адъюнкта Академии наук, а в 1830 г. – академика Академии наук “по части химии”. В 1832–1849 гг. состоял профессором Горного института и был заведующим кафедрой химии. В период службы в Горном институте провел целый ряд термохимических исследований, предшествовавших открытию первого закона термодинамики. Известен как один из основоположников термохимии и автор закона, названного его именем (закон Гесса). В 1843 г. немецкий минералог Юлиус Фрëбель, разбираясь с материалами по каменной коллекции Рудного Алтая, предложил назвать обнаруженный в них в 1830 г. безымянный минерал – теллурид серебра в честь человека, который первым изучил состав этого минерала и даже предложил технологию получения из него металлического теллура. Хронологически, гессит является первым минералом, названным в честь человека, имеющего непосредственное отношение к Горному институту. $[Ag_2Te]$. Космодемьянская шахта, Второе Заводинское м-ние, Рудный Алтай, Казахстан (Fröbel J., 1843)].

Самарскит (samarskite) – серия минералов (**самарскит-(Y)**, **самарскит-(Yb)**) названа в честь горного инженера Василия Евграфовича Самарского-Быховца (1803–1870). Выпускник Горного кадетского корпуса 1823 г. Сразу после выпуска служил на Колывано-Воскресенских заводах, был смотрителем Салаирского рудника, приставом Риддерского и Крюковского рудников. С 1828 г. переведен в Санкт-Петербург на должность помощника столоначальника в Кабинете Его Императорского Величества, позже – столоначальника Горного департамента. С 1834 г. – капитан, старший адъютант и дежурный штаб-офицер штаба Корпуса горных инженеров. В 1846–1860 – полковник, начальник штаба Корпуса горных инженеров. В 1847 г. участвовал в работе комитета под председательством герцога Лейхтенбергского по составлению проектов устава и штата Горного Института. В 1855 г. был назначен председателем Горного аудиториата, членом Совета и Ученого комитета и преподавал в Институте Корпуса горных инженеров. Генерал-лейтенант (1860). В дальнейшем – председатель совета Корпуса горных инженеров (позднее – Горного совета), а также председатель комиссии по пересмотру Горного устава. В 1839 г. Густав Розе обнаруживает в уральских образцах новый минерал и (в 1847) предлагает назвать его в честь В.Е. Самарского–Быховца, предоставившего ему эти образцы для исследований. В 1879 г. П.Э. Лекоком де Буабодраном в этом минерале был открыт новый химический элемент, названный са-

марием (первый случай, когда в названии химического элемента фигурирует реально существовавший человек).

3. Самарскит-(Y) (samarskite-(Y)) $[\text{YFe}^{3+}\text{Nb}_2\text{O}_8]$. Блюмовская копь, Ильменский заводник, Челябинская обл., Южный Урал, Россия (Rose, 1847)], и

4. Самарскит-(Yb) (samarskite-(Yb)) $[\text{YbFe}^{3+}\text{Nb}_2\text{O}_8]$. Пегматит Литтл Паци, округ Джефферсон, шт. Колорадо, США (Simmons et al., 2006)],

5. Широкинит (shirokshinite) – в память о геологе и горном инженере Николае Васильевиче Широкине (1809–?). Выпускник Горного кадетского корпуса 1827 г. После окончания работал в Архангельской и Олонецкой губерниях. В 1830–1831 гг. руководил на Сибирских заводах приемом и отправкой в Луганский завод чугуна. Инженер-майор Корпуса Горных инженеров. В 1834 г. был командирован для “геогностического обзора” берегов Белого моря и первым описал западные склоны Хибинского массива. В 1834 г. переведен на Екатеринбургские золотые промыслы Уральских горных заводов. В 1836 г. назначен их управляющим. С 1839 г. – управляющий заводом и золотыми промыслами в Миассе. Именно в бытность Широкина в должности управляющего золотыми промыслами на Урале был обнаружен (1842) самый большой в России самородок золота “Большой треугольник” весом около 36 кг. $[\text{K}(\text{NaMg}_2)_{\Sigma 3}(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2]$. Хибинский массив, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Pekov et al., 2003)].

6. Авдеевит (avdeevite) – в честь химика Ивана Васильевича Авдеева (1818–1865). Выпускник Института корпуса горных инженеров 1836 года. Работал на Урале на Нижне-Исетском железоделательном заводе. С 1840 года – управляющий Екатеринбургской заводской лабораторией и смотритель минералогического кабинета при ней. В 1856 г. переводится в Москву на должность старшего лаборанта Главной пробирной палаты, а с 1861 г. становится ее управляющим. Создатель ряда методик амальгамации золота и электрохимического метода извлечения золота из руд. Уточнил валентную форму природных соединений бериллия и впервые рассчитал корректные формулы берилла, фенакита и хризоберилла. $[\text{Na}(\text{Be}_2\text{Li})_{\Sigma 3}\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$. Пегматиты в р-оне Момейк, Шан, Мьянма (бывш. Бирма) (Агаханов и др., 2020)].

7. Кокшаровит (koksharovite) – в честь минералога и кристаллографа, профессора Николая Ивановича Кокшарова (1818–1892). Выпускник Института Корпуса горных инженеров 1840 г. По окончании, несколько лет работал в экспедиции, руководимой Р. Мурчисоном, по изучению геологии и картированию северных губерний России. В 1842–1845 годах, по просьбе Мурчисона, был командирован правительством в Париж и Берлин для продолжения образования. В 1846 г. возвращается в Горный, с которым окажется связана практически вся его жизнь: репетитор, преподаватель геологии и минералогии (1847–1854), профессор (1851) и директор Института Корпуса горных инженеров (1872–1881). Генерал-майор, член Горного совета и Горного ученого комитета Корпуса горных инженеров. Кроме работ по стратиграфии, геологии и магматическим породам, Н.И. Кокшаров внедрил новые для тех лет принципы характеристики минералов, по сути, заменив словесные описания морфологическими, с приведением соответствующих кристаллографических данных, с точными изображениями кристаллов, для чего провел кропотливейшие гониометрические измерения более 400 минералов. Именно Н.И. Кокшаров заложил основы систематического, углубленного изучения минералогии России. Его фундаментальный труд “Материалы по минералогии России”, опубликованный в 11 томах с 1853 по 1892 год на русском и немецком языках – является первым подобным обобщением в мировой геологической литературе. Адъюнкт (с 1855) и академик (1866) Императорской Санкт-Петербургской Академии наук. Одновременно с работой в Горном преподавал Санкт-Петербургском университете, в Пажеском и в Первом кадетском корпусах, в Технологическом, Земледельческом и других петербургских институтах. Директор (с 1865) и почетный член (1865) Императорского минералогического общества и целого ряда иностранных академий и научных сообществ. $[\text{CaMg}_2\text{Fe}_4(\text{VO}_4)_6]$. Вулкан Безымянный, Камчатка, Россия (Pekov et al., 2014)].

8. Планерит (planerite) – в честь горного инженера Дмитрия Ивановича Планера (1821–1882). Выпускник Института Корпуса горных инженеров 1841 г. После выпуска был направлен на Урал, где работал управляющим Юговского и Мотовилихинского казенных медеплавильных заводов, затем – Гумешевских медных рудников и Сысертского горного округа. Полковник корпуса горных инженеров. Кроме основной работы, увлекался переводами зарубежных статей по геологии, минералогии и горному делу. В 1865 г. возвращается в Петербург и назначается временным директором Санкт-Петербургской физической обсерватории, а с 1866 по 1876 – библиотекарем Горного института и секретарем совета Горного института: занимался сбором статистических данных о горнозаводской промышленности Урала, проводил опыты по прокатке железа на Ижорском заводе. С 1868 г. состоял членом-учредителем Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей по отделению геологии и минералогии. Автор обзорных публикаций по истории горного дела и минералогии Урала и ряда других регионов. $[Al_6(PO_4)_2(PO_3OH)_2(OH)_8 \cdot 4H_2O]$. Гумешевский рудник, Свердловская обл., Средний Урал, Россия (Hermann, 1862)].

9. Еремеевит (jeremejevit) – в честь минералога и кристаллографа Павла Владимировича Еремеева (1830–1899). Выпускник Института корпуса горных инженеров 1851 года. Сразу по окончании назначается на должность помощника смотрителя Горного музея, на которой будет числиться до 1866 г., но при этом постоянно пребывает в длительных командировках. Несколько лет занимался геологическими исследованиями месторождений каменного угля в Тульской губернии. С 1856 по 1862 год был командирован на Урал и Алтай для ознакомления с горнозаводскими производствами в этих регионах Российской империи, слушал лекции во Фрайбергской горной академии, Лейпцигском университете и в Парижской горной школе. В 1862 г. возвращается в Россию и начинает преподавать минералогию в Петербургском технологическом институте. В 1866 г. становится профессором кристаллографии и минералогии в Горном институте, а в 1877 г. организует в нем отдельную кафедру минералогии и до 1896 г. является ее первым заведующим. Параллельно читает отдельные лекции по минералогии, кристаллографии и геологии в нескольких других петербургских институтах – Технологическом, Лесном и Инженеров путей сообщения. Автор более 300 работ, посвященных минералам месторождений Урала, Алтая и Сибири. По точности описания кристаллов труды П.В. Еремеева считаются одними из лучших в мировой литературе. Кроме того, большое внимание в них уделено изучению законов срастания минералов и наблюдениям над процессами замещения (псевдоморфозами). Член-корреспондент Императорской академии наук (1875), член Горного ученого комитета. В течение 22 лет исполнял должность секретаря Императорского Санкт-Петербургского минералогического общества, редактор 22 томов “Записок минералогического общества”, с 1876 года – почетный член РМО, а с 1892 по 1899 – его директор. $[Al_6(VO_3)_5F_3]$. Адун-Чилон, Читинская обл., Забайкалье, Россия (Damour, 1883)].

10. Ауэрбахит (auebakhite) – в честь горного инженера, предпринимателя, профессора Александра Андреевича Ауэрбаха (1844–1916). Выпускник Института корпуса горных инженеров 1863 г. В 1868 г. защитил диссертацию: “О турмалине русских месторождений” и был избран адъюнкт-профессором Горного института по кафедре минералогии, которую оставил в 1871 г. В конце XIX века его деятельность была тесно связана с Северным Уралом. В 1884 г. он основал Турьинское горное училище на знаменитых Турьинских медных рудниках. В 1881–1896 гг. руководил Богословским горным округом, развивал и совершенствовал медеплавильное производство региона. В его честь названы Ауэрбахская интрузия и Ауэрбахский рудный район, включающий Воронцовское золоторудное месторождение. $[MnPt_2As_2S_5]$. Воронцовское м-ние, Свердловская обл., Северный Урал, Россия (Kasatkin et al., 2020)].

11. Карпинскит (karpinskyite) – в честь геолога, организатора науки, профессора Александра Петровича Карпинского (1846–1936). Выпускник (с золотой медалью) Института корпуса горных инженеров 1866 г. Проработав два года на Урале, в 1868 г.

был вызван в Санкт-Петербург для преподавательской работы в Горном институте. В 1869 году защитил диссертацию на звание адъюнкта по кафедре геологии, а в 1877 г. избран профессором кафедры геологии, геогнозии и рудных месторождений Горного института, где читал лекции по исторической геологии, петрографии и рудным месторождениям до 1896 г. С 1894 г. — заслуженный профессор Горного института. Автор многочисленных классических работ по палеонтологии, стратиграфии и тектонике, петрографии, геологии и полезным ископаемым Урала и России. В 1886 г. избран в Императорскую Санкт-Петербургскую академию наук, с 1916 г. — исполняющий обязанности вице-президента, с 1917 по 1936 год — президент Академии наук СССР. Один из организаторов и директор (1885—1903) Геологического комитета. Президент Российского минералогического общества (1899—1936), почетный член целого ряда зарубежных геологических, минералогических и палеонтологических обществ [(спорный) $Mg_2(Si_2O_5)(OH)_2$. Авроринская россыпь, р. Актай, Баранчинский массив, Нижний Тагил, Свердловская обл., Средний Урал, Россия (Рукавишникова, 1956)].

12. Лоранскит-(Y) (loranskite-(Y)) — в честь инспектора и преподавателя Горного института Аполлония Михайловича Лоранского (1847—1917). Выпускник Института корпуса горных инженеров 1866 г. По его окончании работал в Богословском горном округе на Урале, а позже — помощником управляющего лабораторией Петербургского монетного двора. Помимо службы при Монетном дворе преподавал горную статистику в Горном институте, а также был инспектором (в 1897—1899 гг.) и заведующим музеем Горного института. В 1870—90-х гг. участвовал в работе правительственных комиссий по подготовке Горного устава. $[Y(ZrTa)_2O_6$. Метамиктный. Импилахти, северный берег Ладожского озера, Карелия, Россия (Melnikov, 1899)].

13. Феодосиит (feodosiyite) — в память о геологе и палеонтологе Феодосии Николаевиче Чернышеве (1856—1914). Выпускник Горного института 1880 года. Сразу по окончании был откомандирован на Южный Урал для работ по составлению геологической карты его западных склонов. С 1882 г. — сотрудник Геологического комитета, активно участвующий в работах по геологическому картированию различных регионов России. Автор ряда работ по палеонтологии и стратиграфии Урала, Шпицбергена, Новой Земли, Донбасса, Алтая, и Средней Азии. Один из организаторов геологического музея при Геолкоме — ныне Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный музей им. Ф.Н. Чернышева. С 1903 по 1914 г. — директор Геологического комитета. Академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук (1909); председатель отделения физической географии Российского географического общества. Совмещал работу в Геологическом комитете с преподаванием в Горном институте. $[Cu_{11}Mg_2Cl_{18}(OH)_8 \cdot 16H_2O$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Pekov et al., 2018)].

14. Курнаковит (kurnakovite) — в честь физико-химика, профессора Николая Семеновича Курнакова (1860—1941). Выпускник Горного института 1882 г. С 1885 по 1893 г. — адъюнкт по кафедре металлургии, галургии и пробирного искусства, с 1893 г. — профессор неорганической химии, а с 1899 г. — профессор аналитической химии и заведующий лабораторией физической химии Горного института. Одновременно с Горным, преподавал в петербургских Политехническом и Электротехническом институтах. Основатель отечественной школы физико-химического анализа. Разработал “пирометр Курнакова” (1904) — наиболее совершенный в то время прибор для термического анализа. С 1936 г. — профессор, а с 1937 г. по 1941 г. — заведующий кафедрой неорганической химии Московского государственного университета. Академик Петербургской АН (1913) и АН СССР. Организатор и директор Института физико-химического анализа АН СССР (1918—1934), Государственного института прикладной химии (ГИПХ) и его первый директор (1919—1927), Государственного института научно-технических исследований (ГОНТИ) (1921), Института по изучению платины и других благородных металлов АН СССР (1922—1924), Химического института АН СССР (1924), Института общей и неорганической химии АН СССР (1934—1941). $[Mg_3(B_3O_3(OH)_5) \cdot 5H_2O$. М-ние Индер, Атырауская обл., Казахстан (Годлевский, 1940)].

15. Федорит (fedorite) – в честь кристаллографа, минералога и петрографа, профессора Евграфа Степановича Федорова (1853–1919). Поступил в Горный институт в 1880 г. в возрасте почти 27 лет, сразу на третий курс, а в 1883 г. закончил его первым по списку с занесением имени на мраморную доску. Не был оставлен при Горном институте, переехал в Москву и до 1895 г. занимал должность делопроизводителя Геологического комитета, принимая участие в геологических работах на Северном Урале. В 1890 г. публикует работу “Симметрия правильных систем фигур”, в которой сделал теоретический вывод всех возможных 230 пространственных групп симметрии, ставшей фундаментальной для дальнейшего развития современных кристаллографии и кристаллохимии. В 1895 г. приглашается к чтению лекций в Горном институте, приезжая для этого в Петербург два раза в неделю из Москвы, где одновременно ведет курс кристаллографии в Сельскохозяйственном институте. В 1905 г. Ученый совет Петербургского Горного института обратился к Е.С. Федорову с просьбой занять директорскую должность, и он становится первым выборным директором в истории Горного (1905–1910). Профессор кристаллографии и петрографии, организатор и первый заведующий кафедрой кристаллографии (1906–1919) Горного института. В период его директорства в Горном институте открыто разведочно-геологические отделение и начато издание журнала “Записки Горного института” (1907). Создатель двукружного гониометра и четырехосного “федоровского” столика для измерения кристаллооптических характеристик, обеспечивших прорыв в описании и диагностике минералов. Старший петрограф Геологического комитета. С 1919 г. – действительный член Академии наук по отделению физико-математических наук (кристаллография). Почетный член целого ряда зарубежных научных академий и организаций. $[K_5(Ca_9Na_5)_{\Sigma 14}(Si_{32}O_{76})(OH)_4 \cdot 7H_2O]$. Турий массив, Турий мыс, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Кухаренко и др., 1965); С. 479–481].

16. Высоцкит (vysotskite) – в память о геологе Николае Константиновиче Высоцком (1864–1932). Выпускник Горного института 1891 г. По окончании был прикомандирован к Геологическому комитету и принимал участие в работах по инженерно-геологическим изысканиям в Воронежской губернии и Западной Сибири. С 1896 г. изучал месторождения платины Среднего и Южного Урала. В 1921–1923 гг. первым обнаружил и исследовал платину в образцах минералов из месторождений Норильска. Автор известной четырехтомной монографии “Платина и районы ее добычи” (1923). С 1922 г. – заведующий секцией золота и платины, а в дальнейшем – Уральской секцией Геологического комитета. Под редакцией Н.К. Высоцкого в 1930 г. вышла первая государственная сводная геологическая карта Урала. $[PdS]$. Норильское м-ние, Норильск, Пудранское плато, Таймыр, Россия (Генкин, Звягинцев, 1962)].

XX век.

17. Преображенскит (preobrazhenskite) – в память о геологе, профессоре Павле Ивановиче Преображенском (1874–1944). Выпускник Горного института 1900 г. С 1901 по 1913 г. работал в группе по исследованию области Ленских золотых приисков, руководил геологической партией на Урале, преподавал в Горном институте. С 1913 года – старший геолог, а с 1916 г. – заведующий Сибирской секцией Геологического комитета. В 1919 г. – министр народного просвещения при правительстве А.В. Колчака. С 1921 г. – профессор Пермского университета. Заложил основы методики поисков и разведки соляных месторождений Урала и других регионов Советского Союза. В 1929 г. под его руководством было открыто первое месторождение нефти в пределах будущей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. В 1937–1941 гг. – организатор и один из руководителей Всесоюзного научно-исследовательского института галургии в Ленинграде $[Mg_3(B_{11}O_{15}(OH)_9)]$. М-ние Индер, Атырауская обл., Казахстан (Яржемский, 1956)].

18. Котульскит (kotulskite) – в память о геологе, профессоре Владимире Климентьевиче Котульском (1879–1951). Выпускник Горного института 1903 г. С 1908 г. начал

преподавательскую работу в Горном институте на кафедре минералогии. С 1929 г. читал лекции, а в 1930 г. избран заведующим кафедрой полезных ископаемых. В интервале 1915–1930 гг. — главный геолог, руководитель металлической секции Геологического комитета, вице-директор Геолкома. Директор Геологоразведочного института цветных металлов (1929–1930). Председатель (1928–1930) Особой комиссии по подсчету запасов полезных ископаемых (ныне ГКЗ). Под его руководством открыты и разведаны медно-никелевые месторождения Мончегорска. Инициатор и организатор создания Государственного фонда геологической информации и единой геофизической службы [PdTe. Мончегорское м-ние, Монче-Тундра, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Генкин и др., 1963)].

19. Ненадкевичит (*nenadkevichite*) — в честь минералога и геохимика Константина Автономовича Ненадкевича (1880–1963). Выпускник Горного института 1906 г. По окончании начал работать в Минералогическом музее Академии наук. В дальнейшем был научным сотрудником и руководителем ряда лабораторий Государственного радиевого института, Геохимического института АН СССР, Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. Разработал технологию производства металлического висмута из отечественного сырья, участвовал в первых минералогических исследованиях урановых руд и проектировании первого радиевого завода в СССР. В 1940 г. предложил мокрый процесс разложения руды и извлечения золота из нерастворимого осадка, а также электролитический способ рафинирования золота из амальгам. Разработал теоретические основы и практические методики химического разделения элементов, близких по химическим и физическим свойствам (бериллий-алюминий, цирконий-гафний, никель-кобальт, тантал-ниобий). [$\text{Na}_2\text{Nb}_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})\text{O}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Карнасурт, Ловозерский массив, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Кузьменко, Казакова, 1955)].

20. Степановит (*stepanovite*) — в память о геологе, профессоре Павле Ивановиче Степанове (1880–1947). Выпускник Горного института 1907 г. С 1908 г. в качестве сотрудника Геологического комитета занялся исследованием геологии угольных толщ Донецкого бассейна. Член Санкт-Петербургского минералогического общества (с 1907) и один из основателей Русского палеонтологического общества (1916). С 1919 г. профессор Петроградского горного института, где организовал кафедру нерудных ископаемых и ископаемого угля, которую возглавлял до 1926 г. В 1917–1920 гг. заведующий угольной секцией Геологического комитета. С 1919 по 1922 год — председатель совета Бюро учета полезных ископаемых Геологического комитета. Академик АН СССР (1939). Почетный член РМО (1946). Автор ряда монографий по геологии угольных бассейнов СССР и закономерностям их размещения. [$\text{NaMgFe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Тылахское месторождение бурого угля, бассейн реки Лена, Булунский район, Полярная Якутия, Саха, Россия (Нефедов Е.И., 1953)].

21. Заварицкит (*zavaritskite*) — в память о геологе и петрографе, профессоре Александре Николаевиче Заварицком (1884–1952). Выпускник Горного института 1909 г. После окончания был оставлен ассистентом на кафедре рудных месторождений и одновременно вел занятия на кафедре петрографии. Параллельно, в 1915–1935 гг. работал геологом в Геологическом комитете, участвуя в экспедиционных исследованиях на Урале, послуживших основой для разработки месторождений железных руд и строительства металлургического комбината в Магнитогорске. В 1920 г. получил звание профессора Горного института и с 1926 по 1938 год возглавлял кафедру петрографии. Автор многочисленных работ по теоретической петрографии и геологии рудных месторождений. Разработал графический метод интерпретации состава горных пород с помощью диаграмм, наглядно показывающих главные особенности их химизма, и положил начало развитию новой научной отрасли — петрохимии. Усовершенствовал метод исследования минералов в шлифах, созданный Е.С. Федоровым, введя новые координаты для определения ориентировки оптической индикатрисы. С 1939 по 1941 год — директор института геологических наук АН СССР. В 1944 г. создал Лабораторию вул-

канологии АН СССР и стал ее директором. Академик АН СССР (1939), с 1946 г. — академик-секретарь отделения геолого-географических наук АН СССР. Почетный член РМО (1946) и целого ряда зарубежных научных организаций. [ВиОФ. М-ние Шерлова гора, Читинская обл., Россия (Доломанова и др., 1962)].

22. Кассит (kassite) — в память о геологе Николае Григорьевиче Кассине (1885–1949). Выпускник Горного института 1913 г. С 1917 г. работал в Геологическом комитете. Проводил геологические исследования в Донбассе, Казахстане, Киргизии, на Кольском полуострове (открыл массив Африканда). Преподавал в Ленинградском Горном институте и Ленинградском институте инженеров путей сообщения (1918–1926). Был первооткрывателем многих полезных ископаемых в Казахстане. Сотрудник Института геологических наук АН КазССР (1941–1949). Один из организаторов Академии наук Казахстана, академик АН Казахской ССР (1946). Награжден Большой золотой медалью им. Н.М. Пржевальского за монографию по геологии бывшей Вятской губернии (1930). Лауреат Сталинской премии за подготовку 20-го тома “Геологии СССР” (Восточный Казахстан) и “Материалов по палеографии Казахстана” (1946). [CaTi₂O₄(OH)₂. Массив Африканда, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия. (Кухаренко и др., 1965; С. 372-375)].

23. Наливкинит (nalivkinite) — в память о геологе и палеонтологе, профессоре Дмитрие Васильевиче Наливкине (1889–1982). В 1915 г. окончил Горный институт и продолжил работу в Геологическом комитете, начатую еще в 1907 году. С 1920 г. — профессор Горного института, где с 1921 г., впервые в СССР, начал читать курс учения о фациях, а с 1925 г. — курс “Геология СССР”. С 1930 г. — заведующий кафедрой исторической геологии, которой руководил почти пятьдесят лет. Основные труды по стратиграфии, палеонтологии, палеогеографии палеозоя и полезным ископаемым Урала, Средней Азии и Восточно-Европейской платформы. Работы Д.В. Наливкина привели к уточнению ярусного расчленения среднего и верхнего девона и нижнего карбона Урала, а также геологического возраста и перспективности месторождений бокситов Урала и нефти Предуралья. С 1937 по 1982 год — главный редактор всех 13 изданий мелкомасштабных геологических карт СССР. Академик АН СССР (1946). В 1946–1951 председатель Президиума Туркменского филиала АН СССР. В 1946–1952 директор Лаборатории озерадения АН СССР. Инициатор создания (1954) и первый председатель Межведомственного стратиграфического комитета АН СССР. Почетный член РМО (1976), а также целого ряда отечественных и зарубежных научных обществ и организаций. [Li₂NaFe₇Ti₂(Si₄O₁₂)₂O₂(OH)₄F·2H₂O. Дарай-Пиёз, Алайский хребет, Тянь Шань, Таджикистан (Uvarova et al., 2008)].

24. Жемчужниковит (zhemchuzhnikovite) — в память о геологе, профессоре Юрии Аполлоновиче Жемчужникове (1885–1957). Выпускник Горного института 1915 г. В 1917 г. начал преподавать в нем в должности ассистента на кафедре исторической геологии, но в октябре 1917 г. его преподавательская деятельность была прервана в связи с отъездом на фронт. Вновь был избран ассистентом-совместителем по кафедре нерудных полезных ископаемых в 1920 г., в 1926 г. — доцентом-совместителем, а в 1930 г. назначен профессором-совместителем, в 1940 г. — штатным профессором. В 1944 г. возглавил кафедру месторождений полезных ископаемых — вначале в качестве исполняющего обязанности заведующего, а с 1946 по 1950 гг. — заведующим кафедрой. Параллельно с учебной и рабочей в Горном институте, с 1904 по 1941 (с перерывами) работал в Геологическом комитете, с 1945 по 1957 — в Институте геологических наук Академии Наук СССР (ныне ГИН). Разработал методику составления геолого-химических карт платформенных угленосных бассейнов и развивал методику фациально-циклического анализа угленосных толщ. Предложил принципы видового спорового анализа для сопоставления угольных пластов. Член-корреспондент АН СССР (1946). Автор учебных руководств по петрографии углей и геологии каустобиолитов. Руководил составлением углепетрографических атласов угленосных бассейнов СССР и подготовкой ат-

ласа микроструктур углей СССР. $[\text{NaMgAl}(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (оксалат). Бассейн р. Лена, Булун, Республика Саха (Якутия), Россия (Книпович и др., 1963)].

25. Анатолиит (anatoiyite) – в память о кристаллографе, минералогe и математике, профессоре Анатолии Капитоновиче Болдыреве (1883–1946). Поступил в Горный институт в 1901 году, но за участие в политической деятельности был отчислен и выслан из Петербурга. Работал в геологических партиях на Урале и Средней Азии, занимался кристаллографическими исследованиями, опубликовал ряд научных статей. Восстановлен в 1918, окончил Горный только в 1919 г. и был оставлен в нем в должности преподавателя кристаллографии. Уже с 1921 г. – профессор и заведующий кафедрой минералогии и кристаллографии, с 1924 г. – декан геологоразведочного факультета. Организовал в Горном институте одну из первых в СССР рентгенометрических лабораторий и создал на основе добровольного объединения ряда кафедр научно-исследовательскую организацию под названием “Федоровский институт кристаллографии, минералогии, петрографии и рудных месторождений”. Одновременно с учебой и дальнейшей деятельностью в Горном институте, с 1918 г. работал в Геологическом комитете и в течение последующих двадцати лет руководил исследованиями полезных ископаемых на Урале, Алтае, в Восточном Забайкалье. Разработал общепринятую классификацию запасов (по категориям А, В, С1 и С2). В 1934 г., после введения докторских степеней, стал первым доктором геологических наук в СССР. В 1938 году незаконно репрессирован и выслан в Магадан, где продолжил работу в геологоразведочном управлении “Дальстроя”, руководил созданием обобщающих материалов по региону и трагически погиб в 1946 г. Незадолго до смерти выдвинут в действительные члены АН СССР. Автор ставших классическими “Курса описательной минералогии”, “Кристаллографии”, “Определителя кристаллов” и “Рентгенометрического определителя минералов”. Почетный член целого ряда зарубежных научных организаций. $[\text{Na}_6\text{Ca}(\text{Mg}_2\text{Fe})_{\Sigma 3}\text{Al}(\text{AsO}_4)_6$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Pekov et al., 2019)].

26. Сергейсмирновит (sergeysmirnovite) – в память о геологе и минералогe, профессоре Сергее Сергеевиче Смирнове (1895–1947). После окончания Горного института (1919) был оставлен ассистентом при кафедре минералогии. В 1930 году избран профессором и с 1930 по 1933 г. был заведующим кафедрой минералогии. Одновременно с педагогической деятельностью принимал участие в работе ЦНИГРИ (ныне ВСЕГЕИ), где вел исследования в области минералогии и генезиса рудных месторождений Дальнего Востока, Забайкалья и других регионов. Основоположник создания в стране металлогенического направления, выдвинул понятие о рудных поясах в металлогенических провинциях. В 1939 г. был избран членом-корреспондентом, а в 1943 г. – академиком АН СССР. Заместитель академика-секретаря Отделения геолого-географических наук АН СССР. С 1945 г. – руководитель рудного отдела Института геологических наук АН СССР. С 1945 – президент Всесоюзного минералогического общества и главный редактор “Записок ВМО”. В 1947 г. был избран почетным членом Французского минералогического общества. $[\text{MgZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. месторождение Кестер, Верхоянский район (улус), Восточная Якутия, Якутия, Россия (Yakovenchuk et al., 2022)].

27. Русаковит (rusakovite) – в честь геолога Михаила Петровича Русакова (1892–1963). В 1911 г. поступил на геологоразведочный факультет Петербургского горного института. В 1915 г. продолжать образование в предреволюционном Петрограде стало невозможно и два года М.В.Русakov работает в геологических партиях на Урале, а затем продолжает образование в Томском технологическом институте. Но, в 1921 г. возвращается и получает диплом Горного института. Работал в Урало-Сибирском отделении Геологического комитета, а затем в геологическом отделе Казахского филиала АН СССР. В 1946 г. был избран академиком АН Казахской ССР. Основные труды посвящены изучению рудных месторождений и геологии Казахстана. С именем М.В. Русакова связано открытие Коунрадского (медь), Семизбургского (корунд, андалузит), Карагайлинского (свинец, барит), Кайрактинского (асбест, барит, полиметаллы) и ряда других место-

рождений полезных ископаемых. $[\text{Fe}_5^{3+}(\text{VO}_4)_2(\text{OH})_9 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$. Баласаускандыкское м-ние, хребет Каратау, Южно-Казахстанская обл., Казахстан (Анкинович, 1960)].

28. Черныхит (chernykhite) – в память о минералогe Викторе Васильевиче Черных (1889–1941). В 1916 поступил в Петроградский горный институт. После запрета на въезд в Петроград (1917) оказался в Екатеринбургe, работал в музее Уральского общества любителей естествознания. С 1920 продолжил учебу в Петрограде, одновременно работая (без содержания) научным сотрудником минералогического отдела Горного музея. В 1922–1926 – ученый хранитель, заместитель директора Горного музея; одновременно – сотрудник ЦНИГРИ. С 1929 г. начал вести занятия, в 1930 г. принял должность заведующего кабинетом минералогии, а с 1933 – заведующего кафедрой минералогии. При нем (в 1934) в Горном институте была организована одна из первых в СССР исследовательская лаборатория экспериментальной минералогии и петрологии – и, таким образом, заложено экспериментальное направление в работе кафедры. С 1934 по 1936 г. был деканом геологоразведочного факультета. Принимал активное участие в экспедиционных работах на Урале, Кавказе и Средней Азии. $[\text{BaV}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2]$. Баласаускандыкское м-ние, хребет Каратау, Южно-Казахстанская обл., Казахстан (Анкинович и др., 1972)].

29. Бетехтинит (betechtinite) – в честь минералогa и специалиста по рудным месторождениям, профессора Анатолия Георгиевича Бетехтина (1897–1962). В 1917 г. поступил в Варшавский политехнический институт, откуда перевелся на горно-технический факультет Нижегородского государственного университета, но решил продолжить свое обучение в Петрограде, в Горном институте. Выпускник Ленинградского горного института 1924 г. С 1923 г. начал работу в качестве геолога Нижнетагильского управления треста “Уралплатина”. В 1927 г. возвращается в Горный институт на должность младшего хранителя Горного музея. Старший ассистент кафедры минералогии (1928), доцент (1929), профессор (1937) кафедры полезных ископаемых. Создатель курса минераграфии, автор неоднократно переиздававшегося и ставшего классическим учебника “Курс минералогии”. Читал курсы лекций по рудным месторождениям в Ленинградском и Ростовском университетах, профессор Московского института цветных металлов и золота (1949–1961). Крупный специалист в области минералогии и процессов рудообразования месторождений платиновых, хромитовых, марганцевых и сульфидных руд. Заведующий лабораторией минераграфии (1937–1962), заместитель директора (1939–1942), заведующий отделом рудных месторождений Института геологических наук АН СССР (1953–1955); заведующий лабораторией Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР (1956–1962). Академик АН СССР (1953). Организатор и главный редактор журнала “Геология рудных месторождений” (1959). Вице-президент Всесоюзного минералогического общества (1960). Почетный член целого ряда зарубежных научных организаций. $[\text{Cu}_{10}\text{FeS}_6]$. Мансфельд, Айсleben, Саксония-Анхальт, Германия (Schüller, Wohlmann, 1955)].

30. Елисеевит (eliseevite) – в память о геологе и петрографе Николае Александровиче Елисееве (1897–1966). Выпускник геологического отделения физико-математического факультета ЛГУ (1924). В 1925 г. стал ассистентом кафедры геологии и начал экспедиционную деятельность в Геологическом комитете. С 1930 г. – сотрудник кафедры петрографии Ленинградского горного института: доцент (1930–1937), профессор (1938–1947) и заведующий (1942–1943, 1945–1947) кафедры петрографии Ленинградского горного института. В 1947 г. стал штатным профессором одноименной кафедры в Ленинградском государственном университете, возглавлял ее с 1960 по 1966 г. Одновременно был сотрудником Лаборатории геологии докембрия АН СССР (1949–1966). Доктор геол.-мин. наук (1938), профессор (1938), член-корреспондент АН СССР (1953). Один из главных основоположников структурной петрологии, уделял особое внимание структурному анализу интрузивных тел и рудных полей. Сочетание структурного и физико-химического анализа привело его к обоснованию естественных рядов щелочных магматических пород в сложных многофазных

интрузиях. $[\text{Na}_3\text{Li}_2\{\text{Ti}_4\text{O}_4[\text{Si}_8\text{O}_{21}(\text{OH})_3]\}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Ловозерский массив, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия. (Yakovenchuk et al., 2011)].

31. Татариновит (tatarinovite) — в память о геологе и специалисте по рудным месторождениям, профессоре Павле Михайловиче Татаринове (1895–1976). Выпускник Ленинградского горного института 1925 г. На старших курсах начал работу сотрудником Геологического комитета (ныне ВСЕГЕИ), где с 1954 по 1960 становится заместителем директора. С 1930 г. начинает вести занятия в Горном институте, с 1938 — заведующий кафедрой геологии месторождений полезных ископаемых, с 1940 — профессор, с 1947 по 1952 — заместитель директора (проректор). Председатель Всесоюзной Комиссии по запасам полезных ископаемых (1942–1946). Один из создателей отечественной базы асбестового сырья. Крупный специалист в области общих вопросов генезиса месторождений и проблем региональной металлогении. Один из авторов концепции металлогенического картирования. Редактор “Карты полезных ископаемых мира” (1971), первой “Металлогенической карты СССР” масштаба 1 : 2500000 (1973). Автор первого отечественного учебника “Условия образования месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых” (1955). Член-корреспондент Академии Наук СССР (1953). Президент Всесоюзного минералогического общества (1962–1976) и главный редактор журнала “Записки ВМО” (1963–1976); почетный член РМО (1971). $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{SO}_4)\text{B}(\text{OH})_4](\text{OH})_6\cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Баженовское м-ние, Асбест, Свердловская обл., Урал, Россия (Чуканов и др., 2016)].

32. Коржинскит (korzhinskite) — в честь геолога и петролога Дмитрия Сергеевича Коржинского (1899–1985). Выпускник Ленинградского горного института 1926 г. Работал в Геологическом комитете, ныне — ВСЕГЕИ, где с 1932 по 1937 был заведующим петрографической секцией. С 1929 г. преподавал в Ленинградском горном институте — сначала ассистентом, с 1932 г. — доцентом, а с 1940 г. — внештатным профессором. В 1934–1935 г. прочитал в институте авторский курс “Теория метаморфизма”. С 1937 работал в АН СССР (организатор и директор Института экспериментальной минералогии с 1969). Один из основателей физико-химической петрологии, минералогии и геохимии. Разработал основы физико-химической теории процессов минералообразования: термодинамический анализ природных минеральных систем с вполне подвижными компонентами, физико-химический анализ парагенезисов минералов и теорию метасоматической зональности. Выдвинул теорию биметасоматического и контактово-инфильтрационного скарнообразования и кислотно-основной гидротермальной эволюции растворов. Обосновал принцип кислотно-основной взаимодействия при кристаллизации магматических расплавов. Академик АН СССР (1953). Вице-президент Всесоюзного минералогического общества (1964) и Международной минералогической ассоциации (1960–1970). Председатель Национального комитета геологов СССР (с 1969). Почетный член РМО (1964) и многочисленных зарубежных обществ и академий. $[\text{Ca}_2(\text{B}_2\text{O}_4)_2\cdot \text{H}_2\text{O}$. Ново-Фроловское м-ние, Турьинские рудн., Краснотурьинск, Северный Урал, Россия (Малинко, 1963)].

33. Билибинскит (bilibinskite) — в честь геолога и специалиста по рудным месторождениям, профессора Юрия Александровича Билибина (1901–1952). Выпускник Ленинградского горного института 1926 г. Работал в тресте “Алданзолото” и Геологическом комитете, один из организаторов и руководитель первых геолого-поисковых работ, приведших к открытию месторождений золота на Колыме и Северо-Востоке СССР. В 1935 г. вернулся в Ленинград и стал вести в Горном институте курс геологии россыпей золота и платины. Автор фундаментальной монографии “Основы геологии россыпей”, заложившей научный подход к поисковым работам россыпных месторождений золота. С начала 1940-х гг. — сотрудник Всесоюзного геологического института (ВСЕГЕИ), где с 1947 возглавлял сектор металлогении и занимался проблемами геологии урана. С 1950 г. — заведующий кафедрой полезных ископаемых геологического факультета Ленинградского государственного университета. Основные труды посвящены выявлению связи в распределении определенных типов рудных месторождений с этапами развития подвижных поясов земной коры и сопровождающего их магматизма. Член-корре-

спондент АН СССР (1946). [$\text{Cu}_2\text{Au}_3\text{PbTe}_2$. Места первых находок: (1) Агинское м-ние, Камчатка, Россия; и (2) м-ние Джеламбет, Казахстан (Спиридонов и др., 1978)].

34. Крейтерит (kreiterite) — в память о геологе и специалисте по рудным месторождениям, профессоре Владимире Михайловиче Крейтере (1897–1966). Поступил в Петрограде в Горный институт в 1915 г., в 1917 был призван на фронт и смог закончить уже Ленинградский горный только в 1928 г. Работал в Геологическом комитете и тресте “Союзгеоразведка”. Преподавал в Московском геологоразведочном институте (1932–1949), где создал (1932) и заведовал кафедрой разведочного дела. Одновременно преподавал в Московском институте цветных металлов и золота (1932–1949 и 1954–1966). Организатор и заведующий кафедрой месторождений полезных ископаемых и их разведки в Российском университете дружбы народов (1962–1966). Разработал классификацию промышленных типов месторождений и их поисковые критерии, а также произвел группировку месторождений для целей разведки, послужившую теоретической основой для развития поисковых и разведочных работ в различных районах СССР. [$\text{CsLi}_2\text{Fe}^{3+}\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$. Дарай-Пиёз, Алайский хребет, Тянь Шань, Таджикистан (Agakhapov et al., 2019)].

35. Никсергиевит (niksergievite) — в память о геологе, профессоре Николае Григорьевиче Сергиеве (1901–1960) Выпускник Ленинградского горного института 1928 г. Работал в Центрально-Казахстанской геолого-съёмочной партии, один из первооткрывателей Коунрадского месторождения меди. С 1931 по 1942 год преподавал в Ленинградском горном институте в должности ассистента (1931–1933) и доцента (1936–1942) кафедры минералогии. Одновременно, с 1933 по 1936 год — старший научный сотрудник в Институте геологических наук АН СССР, где занимался исследованием эффузивных комплексов пород. После эвакуации в Казахстан, с 1942 по 1947 год — заведующий сектором металлов Института геологических наук АН КазССР, где опубликовал монографию “Эффузивы Центрального Казахстана”, зачтенную в 1946 г. в качестве докторской диссертации. Преподавал на геологоразведочном факультете Казахского политехнического института. В 1947 г. получил звание профессора и с 1947 по 1960 год был в нем заведующим кафедрой кристаллографии, минералогии и петрографии. Член-корреспондент АН КазССР (1956). [$\text{Ba}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{CO}_3)(\text{OH})_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Рудн. Текели, Текели, Алма-Атинская обл., Казахстан (Saburov et al., 2005)].

36. Годлевскит (godlevskite) — в честь минералога, профессора Михаила Николаевича Годлевского (1902–1984). Выпускник Ленинградского горного института 1930 г. По окончании института начал преподавать на кафедре минералогии. Автор “Краткого курса кристаллографии” (1932) — одного из лучших учебных пособий тех лет по этой дисциплине. Перед началом войны — доцент кафедры минералогии и руководитель петрографо-минералогической группы ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ. В 1955 г. перешел в Норильскую комплексную геологоразведочную экспедицию. С 1961 г. работал в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте цветных и благородных металлов. Крупный специалист в области теории рудообразования, геологии и генезиса медно-никелевых руд. Разработал научные основы прогноза и поисков месторождений сульфидного никеля. Автор первой классификации медно-никелевых месторождений мира. Первооткрыватель ряда месторождений и минералов (айдырлит, курнаковит, гидроборацит). Координатор деятельности геологической службы СССР по никелевой отрасли. Почетный член РМО (1976). [Ni_9S_8 . М-ние Заполярный, рудник Маяк, Норильск, Путоранское плато, Таймыр, Россия (Кулагов, 1969)].

37. Дуткевичит-(Ce) (dutkevichite-(Ce)) — в память о геологе Георгие Александровиче Дуткевиче (1907–1937). В 1925 г. поступил в Днепропетровский горный институт, но через год перевелся в Ленинградский горный институт, который окончил в 1930 г. С 1929 г. совмещал учебу с работой в Отделе нефти Геологического комитета (ВСЕГЕИ), сначала в должности геолога, а затем — начальника геологической партии. С 1931 г. — научный руководитель Северной экспедиции Нефтяного геологоразведочного института (ныне — ВНИГРИ). Одновременно организовал и возглавил Микропалеонтологиче-

скую лабораторию и палеонтологическую службу треста “Востокнефть”, осуществлявшего в те годы все нефтепоисковые работы на Урале. В 1933 г. возвращается в ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ и здесь также создает микропалеонтологическую лабораторию. В том же году включен в состав Таджикско-Памирской комплексной экспедиции Академии наук СССР, где ему было поручено проведение геолого-съёмочных и стратиграфических исследований на Памире. При этом он оставался научным консультантом Нефтяного геологоразведочного института и курировал организацию палеонтологических лабораторий в нефтяных организациях Урала и угольных экспедициях Донбасса. Крупный специалист и организатор отечественной микропалеонтологии. [NaZnBa₂Ce₂Ti₂Si₈O₂₆F·H₂O. Дарай-Пиёз, Алайский хребет, Тянь Шань, Таджикистан (Agakhanov et al., 2020)].

38. Судовиковит (sudovikovite) – в память о петрологе, профессоре Николае Георгиевиче Судовикове (1903–1966). Выпускник Ленинградского государственного университета (1930). Преподавал в Ленинградском горном институте с 1930 по 1933 год. Специалист по петрологии магматических и метаморфических пород Карелии, Кольского полуострова и Алдана, автор работ по проблемам гранитообразования, тектоники и регионального метаморфизма. После демобилизации в 1944 – доцент, с 1949 г. профессор кафедры петрографии ЛГУ, одновременно – научный сотрудник Лаборатории докембрия АН СССР (ныне ИГГД РАН). Организатор и заведующий кафедрой геологии месторождений радиоактивных элементов ЛГУ (1950–1962). [PtSe₂. М-ние Средняя Падма, Заонежье, Карелия, Россия (Полеховский и др., 1997)].

39. Соболевит (sobolevite) – в честь геолога, минералога и петролога, профессора Владимира Степановича Соболева (1908–1982). Выпускник Ленинградского горного института 1930 г. Сразу по окончании начал преподавать в своей альма-матер – ассистент, доцент; с 1938 г. – заведующий кафедрой минералогии, с 1939 г. – профессор кафедр кристаллографии и петрографии. Одновременно (1930–1941) – научный сотрудник ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ. В 1941–1945 гг. – профессор Иркутского госуниверситета, консультант Восточно-Сибирского геологического управления и продолжает заведовать кафедрой минералогии Ленинградского горного, эвакуированного в Иркутск. После войны во Львове с 1945 по 1958 г. заведует кафедрой петрографии Львовского госуниверситета и руководит отделом петрографии Института геологии полезных ископаемых АН УССР. В 1951 году избран членом-корреспондентом АН УССР; в 1958 – академиком АН СССР. С 1958 по 1981 год в Новосибирске – заместитель директора Института геологии и геофизики СО АН СССР и одновременно с 1960 – заведующий кафедрой петрографии и минералогии, а в 1962–1971 гг. – декан геологического факультета Новосибирского госуниверситета. 1981–1982 гг. – директор Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. Крупный специалист в области минералогии силикатов, теоретической петрологии, процессов магматизма и метаморфизма. Исследует траппы Сибирской платформы, предсказал существование кимберлитовых трубок в ее северной части. После открытия алмазных месторождений в СССР, возглавлял работы по исследованию кимберлитов и мантийных ксенолитов. Заложил основы экспериментальной минералогии сверхвысокого давления. Автор и соавтор ставших классическими трудов “Петрология траппов Сибирской платформы” (1936), “Введение в минералогии силикатов” (1949), “Фации метаморфизма” (1970), первых карт метаморфических фаций СССР (1966) и Европы (1974). Президент Международной минералогической ассоциации (1974–1978), председатель Петрографического комитета СССР (1975–1982). Почетный член РМО (1964) и ряда зарубежных научных сообществ. [Na₆(Na₂Ca)_{Σ3}(NaCaMn)_{Σ3}Na₂Ti₂Na₂(TiMn)_{Σ2}(Si₂O₇)₂(PO₄)₄O₂(OF)F₂. Ловозерский массив, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Хомяков и др., 1983)].

40. Георгбокит (georgbokiite) – в честь кристаллографа и кристаллохимика, профессора Георгия Борисовича Бокия (1909–2001). Выпускник Ленинградского горного института 1930 г. С 1930 г. работал в Институте общей и неорганической химии АН СССР и в ряде минералогических и кристаллографических лабораторий Ленинграда, Казани,

Новосибирска и Москвы. В 1939–1963 преподавал в МГУ (с 1944 – профессор), где организовал кафедры кристаллографии и кристаллохимии на геологическом и химическом факультетах. Заведующий отделами монокристаллических исследований Института радиотехники и радиоэлектроники АН СССР (1963–1969) и информации по химии ВИНТИ АН СССР (1969–1976). Руководитель рентгеновской лаборатории (1973–1988), главный советник при дирекции (1973–2001) Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Создатель научного направления по кристаллохимии комплексных соединений, организатор и руководитель работ по систематическому исследованию кристаллохимии минералов. С 1993 г. возглавлял работу по выпуску многотомного справочника “Минералы”. Разработал современные классификационные схемы для силикатов, боратов, сульфатов, сульфидов и их аналогов. Автор неоднократно переиздававшегося учебника “Кристаллохимия” (1954), соавтор многотомного “Практического курса рентгеноструктурного анализа” (1951) и книг по истории кристаллографии. Член-корреспондент АН СССР (1958); почетный член РМО (1976). [α - $\text{Cu}_5(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}_2$. Диморф **парагеоргобокита**. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Вергасова и др., 1999)].

41. Парагеоргобокит (parageorgbokiite) (диморф. **георгобокита**). [β - $\text{Cu}_5(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}_2$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Вергасова и др., 2006)].

42. Шафрановскит (shafranovskite) – в честь кристаллографа и историка науки, профессора Илариона Иларионовича Шафрановского (1907–1994). Выпускник кафедры минералогии геологического отделения физико-математического факультета Ленинградского университета (1930). С 1931 г. начинает свою преподавательскую и научную деятельность в Ленинградском горном институте в должности ассистента кафедры кристаллографии, проработав на ней более пятидесяти лет: доцент (1936), профессор (1944), заведующий кафедрой (1946–1984). В 1934–1948 гг. преподавал также на кафедре кристаллографии в Ленинградском университете. Крупнейший ученый-кристаллограф, связавший морфологию кристаллов с условиями их образования и влиянием симметрии среды. Разработал гониометрический метод описания округлых алмазов. Популяризатор и историк науки. Автор фундаментального двухтомника “Кристаллы минералов” (1957–1961), книг “История кристаллографии в России” (1962), “Лекции по кристалломорфологии минералов” (1968), “Очерки по минералогической кристаллографии” (1974), “Симметрия в природе” (1985), а также нескольких изданий, ставшего классическим, учебника по кристаллографии. Почетный член РМО (1971), Международного общества междисциплинарного исследования симметрии и еще целого ряда зарубежных научных обществ. [$\text{K}_2\text{Na}_3\text{Mn}_4[\text{Si}_9\text{O}_{11}(\text{OH})_{16}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Хибинский и Ловозерский массивы, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Хомяков и др., 1982)].

43. Стрелкинит (strelkinite) – в память о минералогe, профессоре Михаиле Федоровиче Стрелкине (1905–1965). Выпускник Ленинградского горного института 1931 г. Доктор геолого-минералогических наук, профессор (1963) Московского геологоразведочного института, в котором основал кафедру геохимии, минералогии, геологии руд редких и радиоактивных элементов. Автор работ в области минералогии и геохимии месторождений олова, пегматитов и грейзенов. Основоположник научной школы по геологии и минералогии урановых месторождений. [$\text{Na}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Места первых находок: (1) Бота-Бурум У м-ние, Чу-Илийские горы, Джезказганская обл., Казахстан; и (2) горы Кендыктас, Кызылкумы, Узбекистан (Алексеева др., 1974)].

44. Пийпит (piirpite) – в память о вулканологе Борисе Ивановиче Пийпе (1906–1966). Выпускник Ленинградского горного института 1931 г. После окончания института и до 1938 г., преподавал на кафедре петрографии, сначала, в должности ассистента, а затем – доцента. С 1931 г. участвовал в экспедиционных работах на вулканах Камчатки. В 1935 г. принимал активное участие в создании первой Камчатской вулканологической станции, начальником и научным руководителем которой был с 1940 по 1945 и с 1950 по 1954 год. В 1956 г. участвует в выборе места для Паужетской геотермальной станции и становится ее первым директором. В 1958 г. избран членом-корреспондентом

том АН СССР и с этого момента возглавлял работу всей вулканологической службы на Камчатке в качестве начальника Камчатской комплексной экспедиции АН СССР и одновременно директора Камчатской геолого-геофизической лаборатории. С 1962 г. — первый директор Института вулканологии АН СССР. Крупнейший специалист в области вулканологии, динамики извержений и геотермальных источников. Вице-президент Международной ассоциации вулканологии (1963). [NaK₄Cu₄(SO₄)₄O₂Cl. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Вергасова и др, 1984)].

45. Саранчинаит (saranchinaite) — в память о петрографе и геологе, профессоре Галине Михайловне Саранчиной (1911–2004). Выпускница Ленинградского горного института 1933 года. После окончания средней школы поступила на геолого-почвенное отделение Ленинградского университета. В 1931 году этот факультет присоединили к Горному институту, после окончания которого в 1933 году, вся дальнейшая научная деятельность Галины Михайловны была связана с Ленинградским (Санкт-Петербургским) государственным университетом, где она проработала 71 год преподавателем, ассистентом, доцентом и профессором кафедры петрографии геологического факультета; одновременно работала в Петрографическом институте АН СССР (1933–1936), Карело-Финском филиале АН СССР (1946–1948), Таджикском геологическом управлении (1957–1959). Доктор геол.—мин. наук (1969), Почетный разведчик недр (1996); Почетный академик РАЕН (1995). Ею написано около 100 научных работ, включая учебники и учебные пособия. Учебник “Федоровский метод” (1954, 1963, 1985) был переведен на немецкий язык и издан в Берлине. Автор монографий: “Гранитоидный магматизм, метаморфизм и метасоматоз докембрия” (1972); “Петрология магматических и метаморфических пород” (в соавторстве с Н.Ф.Шинкаревым, 1974, 1978) и учебных пособий “Физхимия для геологов” (1994) и “Породообразующие минералы” (1998, 2000). [Na₂Cu(SO₄)₂. Мон. P21. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия. (Siidra et al., 2018)].

46. Григорьевит (grigorievite) — в память о минералогe и педагоге, профессоре Дмитрие Павловиче Григорьеве (1909–2003). Выпускник Ленинградского горного института 1934 г. В том же году организовал при кафедре минералогии первую в стране лабораторию экспериментальной минералогии и петрологии, где провел новаторские работы по синтезу минералов — фторсодержащих слюд и амфиболов. Профессор и заведующий кафедрой минералогии (1946–1985), научный руководитель Горного музея. Создал и возглавил новое направление генетической минералогии — онтогенению минералов, став признанным мировым авторитетом в вопросах зарождения, роста и изменения минеральных индивидов и их агрегатов. Много работ посвятил фундаментальным понятиям — минеральным индивидам, минеральным видам, конституции минералов, а также теории преподавания минералогии. Член-учредитель и вице-президент Международной минералогической ассоциации (1958). Почетный член РМО (1971) и целого ряда зарубежных минералогических сообществ. [Cu₃Fe₂Al₂(VO₄)₆. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Pekov et al., 2014)].

47. Набокоит (nabokoite) — в честь вулканолога, профессора Софьи Ивановны Набоко (1909–2005). Выпускница Ленинградского горного института 1934 г. Проработав год после окончания института в отделе оптического сырья ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ и еще год — в Институте геологических наук АН СССР, в 1936 г. начала работу геологом на Камчатской вулканологической станции. На основе наблюдения многочисленных извержений Камчатской и Курильской групп вулканов, разработала модели процессов опалитизации, алунификации и аргиллизации на современных вулканах и геотермальных полях. С 1962 г. — заместитель директора Института вулканологии АН СССР и руководитель, созданной ею Лаборатории постмагматических процессов. Крупный специалист в области термодинамических параметров формирования минеральных комплексов гидротермальных систем. Разработала систему представления анализов вулканических газов, получившую международное признание. Автор известной монографии “Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях”. Почет-

ный член РМО (1992). $[KCu_7Te(SO_4)_5O_4Cl]$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Попова и др., 1987)].

48. Софиит (sofiite) (этимологию см. **набокоит**). $[Zn_2(SeO_3)Cl_2]$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Вергасова и др., 1989)].

49. Нефедовит (nefedovite) — в память о минералогe Евгении Ивановиче Нефёдове (1910–1976). Выпускник Ленинградского горного института 1934 г. После окончания института работал в должности начальника Адун-Челонской геологоразведочной партии на одноименном месторождении драгоценных камней. В дальнейшем — научный сотрудник ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ. Занимался исследованиями минералогии гранитных и щелочных пегматитов, грейзенов, карбонатитов, скарнов в различных регионах СССР, в том числе в Забайкалье и Саянах, в последние годы — в Карелии и на Кольском полуострове. $[Na_5Ca_4(PO_4)_4F]$. Хибинский массив, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Хомяков и др., 1983)].

50. Алсахаровит-Zn (alsakharovite-Zn) — в память о геологе Алексее Сергеевиче Сахарове (1910–1996). Выпускник Ленинградского горного института 1934 г. По окончании института работал в составе геологических партий Народного комиссариата путей сообщения СССР, Северо-Западного отделения “Союзредметразведки”, Ленинградского отделения треста “Дальстрой” и других организаций. В 1946–1947 гг. был научным сотрудником Ленинградского горного института. В 1947–1951 гг. работал от треста “Союзспецразведка” Министерства цветной металлургии, изучая Ловозерское лопаритовое месторождение, которому и посвящена его кандидатская диссертация (1952). Научный сотрудник Геологического института КФАН СССР с 1954 по 1987 годы. Научный редактор и соавтор тома справочно-информационного издания “Геологическая изученность СССР”, посвященного геологии Мурманской области, составитель карты Ловозерского массива. $[KNaSrZnTi_4(Si_4O_{12})_2(O_2(OH)_2) \cdot 7H_2O]$. Гора Лепхе-Нельм, Ловозерский массив, Кольский п-ов, Мурманская обл., Россия (Пеков и др., 2003)].

51. Мелковит (melkovite) — в честь минералогa Вячеслава Гавриловича Мелкова (1911–1991). Выпускник Ленинградского горного института 1934 г. После выпуска начал работу в Таджикско-Памирской экспедиции АН СССР. Учился в аспирантуре Ленинградского горного института (1935–1939), защитив диссертацию “История урана на Тибшарском месторождении”. В 1939 г. был назначен ученым-хранителем Горного музея по отделу минералогии, геохимии, и кристаллографии. С 1939 г. — доцент, с 1941 — заместитель декана. В 1942 г. был откомандирован в Институт геологических наук АН СССР, а с 1944 г. работал во Всесоюзном институте минерального сырья (ВИМС), где организовал редкометалльную геолого-минералогическую лабораторию. В 1954–1955 гг. был заместителем директора института по научной части; с 1954 г. последовательно заведовал отделом геохимических и экспериментальных исследований, минералого-геохимическим сектором и лабораторией моделирования процессов рудообразования. Крупный специалист в области геологии и минералогии урановых месторождений. Один из авторов исследований, заложивших основу научного направления — люминесцентной битуминологии, а также методик диагностики, поисков, исследования и синтеза целого ряда редкометалльных минералов. $[CaFe_2Mo_5O_{10}(PO_4)_2(OH)_{12} \cdot 8H_2O]$. Горы Шунак, Балхашский регион, Карагандинская обл., Казахстан (Егоров и др., 1969)].

52. Вячеславит (vyacheslavite) (этимологию см. **мелковит**). $[U(PO_4)(OH)]$. М-ния Джантуар и Рудное, Центральные Кызылкумы, Узбекистан (Белова и др., 1984)].

53. Ефремовит (efremovite) — в честь геолога, палеонтолога и писателя-фантаста Ивана Антоновича Ефремова (1907–1972). С 1924 по 1926 год учился на биологическом отделении физико-математического факультета Ленинградского государственного университета, но оставил учебу на третьем курсе и начал работу в палеонтологических и геологических экспедициях на Урале, Средней Азии, Сибири и Дальнем Востоке, где вел систематические исследования, результаты которых публиковал в научных журналах. Одновременно работал в Геологическом музее Академии наук. В 1932–1935 гг. прошел курс геологоразведочного факультета Ленинградского горного

института, сдал экзамены экстерном и получил диплом горного инженера. В 1935 г. по совокупности научных работ ему была присвоена степень кандидата биологических наук, по разделу “Палеонтология” без официальной защиты. Доктор биологических наук (1941), с 1930 по 1959 год – научный сотрудник Палеонтологического института, с 1937 г. – заведующий лабораторией низших позвоночных. Один из основоположников современной тафономии – раздела палеонтологии о закономерностях образования местонахождений ископаемых остатков. Под его руководством экспедиция в пустыне Гоби (1946–1949) открыла ископаемые останки динозавров. Известный писатель и популяризатор науки. $[(\text{NH}_4)_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$. Копейск, Челябинский угольный бассейн, Челябинская обл., Южный Урал, Россия (Щербакова, Баженова, 1989)].

54. Ферроэфремовит (ferroefremovite) (этимологию см. **эфремовит**). $[(\text{NH}_4)_2\text{Fe}_2^+(\text{SO}_4)_3$. Фумарола “Восса Grande”, Поццуоли, Неаполь, Кампания, Италия (Kasatkin et al., 2021)].

55. Анкиновичит (ankinovichite) – в честь геолога и минералога, профессора Екатерины Александровны Анкинович (1911–1991). Выпускница Ленинградского горного института 1937 г. С 1938 г. – сотрудник геологической ревизионной партии Казахского геологического управления (Алма-Ата), участник разведки Николаевского полиметаллического месторождения в Восточном Казахстане. С 1943 г. участвует в работе Каратауской экспедиции по геологическому изучению ванадиеносной углеродистокремнистой формации и руководит изучением минерального состава всей черносланцевой толщи ванадиеносного бассейна. С 1950 г. переходит на педагогическую работу в Казахский горно-металлургический институт (КазГМИ) на должность доцента кафедры геологии месторождений полезных ископаемых, с 1964 года – заведующий кафедрой кристаллографии, минералогии и петрографии, профессор (1967). Специалист в области ванадиевой минерализации. Первооткрыватель 13 новых минералов. Заслуженный деятель науки Казахской ССР (1974). $[\text{NiAl}_4(\text{V}^{5+}\text{O}_3)_2(\text{OH})_{12}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Места первых находок: (1) Курумсацкое м-ние, хребет Каратау, Казахстан; (2) Ферганская долина, Алайский хребет, Ошская обл., Киргизия (Карпенко и др., 2004)].

56. Руденкоит (rudenkoite) – в честь минералога, профессора Сергея Александровича Руденко (1917–1992). Выпускник Ленинградского горного института 1941 года. По окончании войны, в 1946 г. вернулся в Горный институт и начал вести занятия на кафедре минералогии. Занимался геолого-минералогическими исследованиями мариуполитов Приазовья, щелочных комплексов Урала и Хибин, гранитных пегматитов Урала и Северо-Байкальского нагорья. Профессор; с 1986 по 1988 год – заведующий кафедрой минералогии Ленинградского горного института. Специалист в области минералогии пегматитов, последовательно отстаивавший представления о перекристаллизационно-метасоматической модели их генезиса. Почетный член РМО (1992). $[\text{Sr}_3\text{Al}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8\text{Cl}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$. Эмельджакское флогопитовое м-ние, Алданский щит, Республика Саха Якутия, Россия (Чуканов и др., 2004)].

57. Добровольскиит (dobrovolskyite) – в честь петролога и кристаллографа, профессора Владимира Витальевича Доливо-Добровольского (1927–2009). Выпускник Ленинградского горного института 1949 г. Был оставлен в аспирантуре при кафедре петрографии. В 1954 г. принят на должность ассистента этой кафедры, в 1963 г. защитил диссертацию и в 1964 г. ему была присуждена ученая степень доктора геолого-минералогических наук. С 1964 г. – профессор кафедры петрографии. В 1970–1972 гг. работал в качестве профессора-консультанта в университете Ориенте в Сантьяго-де-Куба. Декан геологоразведочного факультета (1975–1977). С 1979 по 1988 год – заведующий кафедрой петрографии, с 1988 по 2009 год – профессор кафедры кристаллографии, минералогии и петрографии. Один из ведущих отечественных ученых в области физико-химической петрологии, кристаллооптики и кристаллохимии. Разработчик теории и практики федоровского метода исследования кристаллов и физико-химических основ магматизма и метаморфизма. Соавтор известных монографий “Основы теории про-

цессов магматизма и метаморфизма” и “История Всесоюзного минералогического общества и его роль в развитии геологических наук”, автор учебных пособий “Физическая химия геологических процессов”, “Кристаллохимия”. Член президиума, вице-президент и почётный член РМО (1992). [$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Shablinskii et al., 2021)].

58. Терновит (ternovite) – в честь геолога, профессора Владимира Ивановича Тернового (1928–1980). Выпускник Новочеркасского политехнического института (1952). По окончании работал в поисковых геологических партиях в Карелии; главный геолог Ковдорской геологоразведочной партии. С 1961 г. – научный сотрудник, с 1964 – доцент, с 1975 – профессор и заведующий кафедрой разведочного дела, с 1978 – ректор Ленинградского горного института. Специалист в области геологии нерудного минерального сырья и методики поисков, разведки и оценки месторождений полезных ископаемых, первооткрыватель Ковдорского вермикулит-флогопитового месторождения. Автор монографии “Карбонатитовые массивы и их полезные ископаемые” (1977) и учебника “Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых” (1977). [$\text{MgNb}_4\text{O}_{11} \cdot 8-12\text{H}_2\text{O}$, гр. франкоита. Массив Вуориярви, Сев.Карелия, Россия (Субботин и др., 1997)].

59. Юшкинит (yushkinite) – в честь геолога и минералога, профессора Николая Павловича Юшкина (1936–2012). Окончил Кировский горно-химический техникум (1955), а в 1965 г. – заочно Ташкентский политехнический институт, совмещая учебу с работой в тресте “Средазгеохимразведка”. В 1968 г. защитил докторскую диссертацию в Ленинградском горном институте. Был директором Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Академик РАН (1991); вице-президент (1999–2012) и почетный член РМО (1992); вице-президент ММА (1999–2012). Основал кафедру геологии в Сыктывкарском университете. На протяжении многих лет являлся профессором-консультантом кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии и членом диссертационных советов в Горном институте. Разработал ряд новых научных направлений: топоминералогии рудных регионов, генетико-информационную минералогию, эволюционную минералогию, витаминералогию и др. Лауреат премии им. А.Е. Ферсмана, премии Совета Министров СССР, Демидовской премии. Создатель сыктывкарской минералогической школы. [$(\text{MgAl})_{22}\text{VS}_2(\text{OH})_4$. Ущелье Юшкина, хребет Пай-Хой, п-ов Югорский, Ненецкий автономный округ, Полярный Урал (Макеев и др., 1984)].

60. Юрмаринит (yurmarinite) – в честь петролога и минералога, профессора Юрия Борисовича Марина (р. 1939). Выпускник геологоразведочного факультета Ленинградского горного института 1961 года. По окончании начал работу геологом в специализированной геологоразведочной экспедиции Министерства геологии СССР, занимавшейся поисково-оценочными работами на пьезооптическое сырье на пегматитовых полях Северного и Центрального Казахстана. В 1964 году поступил в аспирантуру Горного по кафедре петрографии, после защиты диссертации оставлен на кафедре в должности ассистента (1968), с 1973 г. – доцент. С 1978 – доктор наук, с 1979 года – профессор кафедры петрографии. В 1988 г. возглавил объединенную кафедру минералогии, кристаллографии и петрографии Горного института, которой руководил до 2014 г. С 2014 г. – профессор этой кафедры. Член-корреспондент РАН (2008). Один из крупнейших специалистов в области минералогии, петрологии и рудоносности гранитоидных формаций. Автор учебника “Петрография” (2015), ставшего результатом многолетнего опыта преподавания петрографии для геологических специальностей Горного института. Президент (2015–2021), почетный президент (с 2021) Российского минералогического общества и главный редактор “Записок РМО”; почетный член РМО (1999). Лауреат премий им. А.П. Карпинского и А.Е. Ферсмана. [$\text{Na}_7(\text{Fe}_3\text{Mg})_{\Sigma 4}(\text{AsO}_4)_6$. Вулкан Толбачик, Камчатка, Россия (Pekov et al., 2014)].

61. Мурашкоит (murashkoite) – в честь минералога Михаила Николаевича Мурашко (р. 1952). Выпускник Ленинградского горного института 1980 г. Участвовал в геологических работах на Северо-Байкальском нагорье, в 1989 г. защитил в Горном институте

кандидатскую диссертацию. С 1984 г. – инженер кафедры минералогии, с 1987 – преподаватель этой кафедры, с 1989 – объединенной кафедры минералогии, кристаллографии, и петрографии (до 1992 г.) в должности ассистента. В настоящее время – сотрудник кафедры минералогии Санкт-Петербургского государственного университета. Авторитетный специалист в области диагностики минералов и вопросов минералообразования. Автор и соавтор открытия более сорока новых минералов. [FeP. Южная часть формации Хатрурим, пустыня Негев, Израиль (Britvin et al., 2019)].

62. Вапникит (vapnikite) – в честь российского и израильского петролога и минеролога Евгения Аркадьевича Вапника (р. 1958). Выпускник Ленинградского горного института 1980 г. Работал геофизиком в “Енисейгеофизика” (1980–1983). Кандидат геол.-мин. наук (1988). В 1989–1990 гг. – научный сотрудник Института геологии и геохронологии докембрия АН СССР. С 1991 г. – старший научный сотрудник факультета наук о Земле и окружающей среде университета Бен-Гуриона в Негев, Беэр-Шева, Израиль. Специалист в области геологии и петрологии пород формации Хатрурим, а также исследования и диагностики редких минералов. Автор и соавтор открытия более шестидесяти новых минералов. [Ca₃UO₆. Наби Муса, Иудейская пустыня, Палестинская автономия, Израиль (Galuskin et al., 2014)].

Подводя некоторый итог данного обзора, можно отметить следующее.

В честь 57 человек названы 62 минеральных вида. По два минеральных вида названы в честь пяти человек, это – В.Е. Самарский–Быховец (самарскит-У и самарскит-Уб), Г.Б. Бокий (георгбокит и парагеоргбокит), В.Г. Мелков (мелковит и вячеславит), С.И. Набоко (набокоит и софиит) и И.А. Ефремов (ефремовит, ферросефремовит).

Из 57 человек, в честь которых названы минералы – 51 являются выпускниками Горного института, при этом 33 из них стали, в разное время после окончания, его преподавателями или научными сотрудниками. Только шесть человек (Г.И. Гесс, Н.А. Елисеев, И.И. Шафрановский, Н.Г. Судовиков, В.И. Терновой и Н.П. Юшкин), работавшие в Горном, не являются его выпускниками.

Наибольшее число минералов ожидаемо названо в честь специалистов, чья деятельность была связана с изучением свойств, состава и строения минералов. 22 минерала названо в честь ученых и преподавателей тех кафедр и лабораторий, прямой наследницей которых является нынешняя объединенная кафедра минералогии, кристаллографии и петрографии. 11 человек связаны с историей возникновения и формирования кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых. Еще 5 – кафедры исторической и динамической геологии. Три человека (Н.И. Кокшаров, Е.С. Федоров и В.И. Терновой), кроме научной и преподавательской деятельности, занимали, в разное время еще и называвшуюся по-разному, должность ректора Горного.

В данном обзоре перечислены только те минералы, названия которых официально утверждены Международной комиссией по номенклатуре минералов в качестве минеральных видов. Поэтому, в него не включены обручевит (разновидность иттропироклора), ненадкевичит (разновидность коффинита), лейхтенбергит (маложелезистая разновидность клиноклора), мушкетовит (псевдоморфоза гематита по магнетиту), барботов глаз (характерная выпуклая форма агрегатов литиевых слюд) и некоторые другие, названия которых тоже связаны с именами известных выпускников и сотрудников Горного института.

Отдельно упомянем чевкинит (точнее, **чевкинит-(Ce)** – [Ca₂Ce₂]_{Σ4}Fe₂Ti₃(Si₂O₇)₂O₈, Ильменский заповедник, Ильменские горы, Челябинская обл., Южный Урал, Россия, (Rosé, 1842)], названный в честь Константина Владимировича Чевкина (1803–1875), выпускника Пажеского корпуса, генерал-майора, с 1834 по 1845 год являвшегося начальником штаба Корпуса горных инженеров. Но, формально, эта должность являлась неким аналогом современного министра природных ресурсов. И хотя Институт корпуса горных инженеров (как тогда назывался Горный) входил в структуру Корпуса, непосредственного отношения к его деятельности (руководство и проведение за-

нятий) К.В. Чевкин, по имеющимся документам, не имел. Поэтому и не включен нами в общий список выпускников и сотрудников Горного.

И также отдельно отметим **черепановит** ([RhAs, Хребет Пекульней, Восточная Чукотка, Россия, (Рудашевский, 1985)] названный в честь геолога и минералога Владимира Александровича Черепанова (1927–1983). Один из авторитетных специалистов в вопросах геологии и минеральных ресурсов Таймыра. Впервые дал прогнозную оценку галогенных формаций северо-западной окраины Сибирской платформы, что привело к открытию месторождений оптического флюорита. Старший научный сотрудник ВСЕГЕИ. Кандидат геолого-минералогических наук. Организатор и первый председатель Комиссии по локальным методам исследования минералов. Организатор издания книги “Рентгеновский микроанализ с электронным зондом в минералогии” (1980). Член Президиума ВМО (с 1980). Поступив в 1944 г. в Свердловский горный институт, в 1947 г. переводится на обучение Ленинградский горный институт на специальность “геологическая съемка и поиски”. На старших курсах начинает работу в Научно-исследовательском институте геологии Арктики (НИИГА), много времени посвящая экспедиционным работам, последовательно занимая должности начальника геологической партии, главного геолога и начальника экспедиции. Но, в результате был отчислен из Горного из-за пропусков занятий в 1950 г. По рекомендации НИИГА, восстановлен в 1951, но снова уехав на полевые работы, отчислен в 1952. И такая ситуация с восстановлением и отчислениями повторялась неоднократно (в 1958, 1960, 1962 гг.), вплоть до 1968 г. В качестве организаций, хлопотавших о восстановлении и продолжении обучения в Горном, последовательно выступали ВНИИГА, ВНИИГалургии и ВСЕГЕИ, где В.А. Черепанов также работал, начиная с середины 50-х гг. Таким образом, его обучение в Горном растянулось в общей сложности на 21 год. Но, в 1968 г., вместо выпуска, он был снова отчислен. В этом же году им была подготовлена диссертация по материалам многолетних работ на бороносных объектах севера Сибири. Из-за отсутствия у В.А. Черепанова диплома выпускника Горного, Ученому совету ВСЕГЕИ пришлось специально обращаться в ВАК, с просьбой сделать для него исключение. И решением Президиума ВАК ему было дано разрешение на защиту кандидатской диссертации без диплома о высшем образовании. Поэтому мы не включили В.А. Черепанова в список официальных выпускников Горного, но и посчитать, что его биография не связана с Горным институтом, тоже было бы некорректным.

Таблица 1. Минералы, рассмотренные в статье (цифры в скобках после названия указывают на порядковый номер минерала в тексте).

Авдеевит (6)	Заварицкит (21)	Русаковит (27)
Алсахаровит-Zn (50)	Карпинскит (11)	Самарскит-(Y) (3)
Анатолиит (25)	Кассит (22)	Самарскит-(Yb) (4)
Анкиновичит (55)	Кокшаровит (7)	Саранчинаит (45)
Ауэрбахит (10)	Коржинскит (32)	Сергейсмирновит (26)
Бетехтинит (29)	Котульскит (18)	Соболевит (39)
Билибинскит (33)	Крейтерит (34)	Софиит (48)
Вапникит (62)	Курнаковит (14)	Степановит (20)
Высоцкит (16)	Лоранскит-(Y) (12)	Стрелкинит (43)
Вычеславит (52)	Мелковит (51)	Судовиковит (38)
Георгбокиит (40)	Мурашкоит (61)	Татариновит (31)
Гессит (2)	Набокоит (47)	Терновит (57)
Годлевскит (36)	Наливкинит (23)	Федорит (15)
Григорьевит (46)	Ненадкевичит (19)	Феодосиит (13)
Дмисоколовит (1)	Нефедовит (49)	Ферросфремовит (54)
Добровольскиит (57)	Никсергиевит (35)	Черныхит (28)
Дуткевичит-(Ce) (37)	Парагеоргбокиит (41)	Шафрановскит (42)
Елисеевит (30)	Пийпит (44)	Широкшинит (5)
Еремеевит (9)	Планерит (8)	Юрмаринит (60)
Ефремовит (53)	Преображенскит (17)	Юшкинит (59)
Жемчужниковит (24)	Руденкоит (56)	

Авторы уверены, что в славной истории Горного института – как в прошлой, так и в современной, и в будущей – найдется еще целый ряд имен ученых и преподавателей, достойных быть запечатленными в именах минералов.

Авторы благодарны чл.-кор. РАН, проф. Ю.Б. Марину за ценные замечания и конструктивные советы при подготовке рукописи к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агаханов А.А., Степаненко Д.А., Зубкова Н.В., Паутов Л.А., Пеков И.В., Касаткин А.В., Карпенко В.Ю., Агаханова В.А., Шкода Р., Бритвин С.Н., Пушаровский Д.Ю. Авдевит – Na-доминантный щелочной берилл: установление статуса минерального вида и новые данные // Записки РМО. 2020. Т. 149. № 6. С. 1–19.

Алексеева М.А., Черников А.А., Шашкин Д.П., Конькова Е.А., Гаврилова И.Н. Стрелкинит – новый уранилванадат // Записки ВМО. 1974. Т. 103. № 5. С. 576–580.

Анкинович Е.А. Новый ванадиевый минерал – русаковит // Записки ВМО. 1960. Т. 89. № 4. С. 440–447.

Анкинович С.Г., Анкинович Е.А., Рождественская И.В., Франк-Каменецкий В.А. Черныхит – новая бариево-ванадиевая слюда из Северо-Западного Каратау // Записки ВМО. 1972. Т. 101. № 4. С. 451–458.

Белова Л.Н., Горшков А.И., Иванова О.А. Сивцов А.В., Лизоркина Л.И., Воронихин В.А. Вячеславит $U^{4+}(PO_4)(OH) \cdot nH_2O$ – новый фосфат урана // Записки ВМО. 1984. Т. 113. № 4. С. 360–365.

Вергасова Л.П., Филатов С.К., Серафимова Е.К., Старова Г.Л. Пийпит $K_4Cu_4O_2(SO_4)_4 \cdot MeCl$ – новый минерал вулканических возгонов // Доклады АН СССР. 1984. Т. 275. С. 714–716.

Вергасова Л.П., Филатов С.К., Семенова Т.Ф., Философова Т.М. Софит $Zn_7(SeO_3)Cl_2$ – новый минерал из вулканических возгонов // Записки ВМО. 1989. Т. 118. № 1. С. 65–69.

Вергасова Л.П., Семенова Т.Ф., Филатов С.К., Кривовичев С.В., Шувалов Р.Р., Ананьев В.В. Георгбокит $Cu_5O_2(SeO_3)_2Cl_2$ – новый минерал вулканических эксгалций // Доклады РАН. 1999. Т. 364. С. 527–531.

Вергасова Л.П., Кривовичев С.В., Филатов С.К., Бритвин С.Н., Бернс П.К., Ананьев В.В. Паргеоргбокит, бета- $Cu_5O_2(SeO_3)_2Cl_2$ – новый минерал из вулканических эксгалций (Камчатский п-ов, Россия) // Записки РМО. 2006. Т. 135. № 4. Р. 24–28.

Генкин А.Д., Журавлев Н.Н., Смирнова Е.М. Мончит и котульскит – новые минералы и состав майченерита // Записки ВМО. 1963. Т. 92. № 1. С. 33–50.

Генкин А.Д., Звягинцев О.Е. Высоцкит – новый сульфид палладия и никеля // Записки ВМО. 1962. Т. 91. № 6. С. 718–725.

Годлевский М.Н. Курнаковит – новый минерал // Доклады АН СССР. 1940. Т. 28. № 7. С. 639–641.

Доломанова Е.И., Сендерова В.М., Янченко М.Т. Заварицкит (BiOF) – новый минерал из группы оксифторидов // Доклады АН СССР. 1962. Т. 146. № 3. Р. 680–682.

Егоров Б.Л., Дара А.Д., Сендерова В.М. Мелковит – новый фосфато-молибдат из зоны окисления // Записки ВМО. 1969. Т. 98. № 2. С. 207–212.

Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Соколова Е.В., Хавторн Ф., Агаханов А.А., Дикая Т.В., Бекенова Г.К. Анкиновичит – никелевый аналог альванита – новый минерал из Курумсака (Казахстан) и Кара-Чагыра (Киргизия) // Записки ВМО. 2004. Т. 133. № 2. С. 59–70.

Книпович Ю.Н., Комков А.И., Нефедов Е.И. О стефановите и новом минерале жемчужниковите // Труды ВСЕГЕИ. 1963. Т. 96. № 3. С. 131–135.

Кузьменко М.В., Казакова М.Е. Ненадкевичит – новый минерал // Доклады АН СССР. 1955. Т. 100. С. 1159–1160.

Кулазов Е.А., Евстигнеева Т.Л., Юшко-Захарова О.Е. Новый сульфид никеля годлевскит // Геология рудных месторождений. 1969. Т. 11. № 3. С. 115–121.

Кухаренко А.А., Орлова М.П., Булах А.Г., Багдасаров Э.А., Римская-Корсакова О.М., Нефедов Е.И., Ильинский Г.А., Сергеев А.С., Абакумова Н.Б. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского п-ва и Северной Карелии. Москва: Недра. 1965. 772 с.

Макеев А.В., Евстигнеева Т.Л., Тронева Н.Н., Вальсов Л.Н., Горшков А.И., Трубкин Н.В. Юшкит $V_{1-x}Sn[(Mg,Al)(OH)_2]$ – новый минерал с гибридной структурой // Минералогический журн. 1984. Т. 6. № 5. С. 91–98.

Малинко С.В. Новый кальциевый борат – коржинскит // Записки ВМО. 1963. Т. 92. № 5. С. 555–559.

Нефедов Е.И. Отчет об открытых им новых минералах // Записки ВМО. 1953. Т. 82. № 4. С. 317.

Пеков И.В., Чуканов Н.В., Задов А.Е., Розенберг К.А., Расцветова Р.К. Алсахаровит-Zn – $NaSrKZn(Ti,Nb)_4[Si_4O_{12}]_2(O,OH)_4 \cdot 7H_2O$ – новый минерал группы лабунцовита из Ловозерского массива, Кольский полуостров // Записки ВМО. 2003. Т. 132. № 1. С. 52–58.

Полевоский Ю.С., Тарасова И., Нестеров А.Р., Пахомовский Я.А., Бахчисарайцев А.Ю. Судовиковит $PtSe_2$ – новый селенид платины из метасоматитов Южной Карелии // Доклады РАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 82–85.

Попова В.И., Попов В.А., Рудашевский Н.С., Поляков В.О., Бушмакин А.Ф. Набокоит $Cu_7FeO_4(SO_4)_5 \cdot KCl$ и атласовит $Cu_6Fe^{3+}Bi^{3+}O_4(SO_4)_5 \cdot KCl$ – новые минералы вулканических эксгальций // Записки ВМО. 1987. Т. 116. № 3. С. 358–367.

Рудашевский Н.С., Мочалов А.Г., Трубкин Н.В., Шумская Н.И., Шкурский В.И., Евстигнеева Т.Л. Черепановит $RhAs$ – новый минерал // Записки ВМО. 1985. Т. 114. № 4. С. 464–468.

Рукавишников И.А. Некоторые магнезио-никелевые гидросиликаты Нижне-Тагильского серпентинового массива // Кора выветривания. 1956. № 2. С. 124–178.

Спиридонов Э.М., Безмертная М.С., Чвилева Т.Н., Безмертный В.В. Билибинскит $Au_2Cu_2PbTe_2$ – новый минерал золото-теллуридных месторождений // Записки ВМО. 1978. Т. 107. № 3. С. 310–315.

Субботин В.В., Волошин А.А., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П., Субботина Г.Ф. Терновит $(Mg,Ca)Nb_4O_{11} \cdot nH_2O$ – новый минерал из карбонатитов массива Вуориярви (Кольский полуостров) // Записки ВМО. 1997. Т. 126. № 3. С. 87–97.

Хомяков А.П., Врублевская З.В., Звягин Б.Б., Матвеева Н.А., Пилюян Г.О. Шафрановскит $(Na,K)_6(Mn,Fe)_3Si_9O_{24} \cdot 6H_2O$ – новый минерал // Записки ВМО. 1982. Т. 111. № 4. С. 475–480.

Хомяков А.П., Курова Т.А., Чистякова Н.И. Соболевит $Na_{14}Ca_2MnTi_3P_4Si_4O_{34}$ – новый минерал // Записки ВМО. 1983. Т. 112. № 4. С. 456–461.

Хомяков А.П., Нечелостов Г.Н., Дорохова Г.И. Нефедовит $Na_5Ca_4(PO_4)F$ – новый минерал // Записки ВМО. 1983. Т. 112. № 4. С. 479–483.

Чуканов Н.В., Дубинчук В.Т., Мурашко М.Н., Задов А.Е., Карпенко В.Ю. Руденкоит $Sr_3Al_{3.5}Si_{3.5}O_{10}(OH_{7.5}O_{0.5})Cl_2 \cdot H_2O$ – новый минерал из флогопитовых месторождений Южной Якутии // Записки ВМО. 2004. Т. 133. № 3. С. 37–41.

Чуканов Н.В., Касаткин А.В., Зубкова П.В., Бритвин С.Н., Паутов Л.А., Пеков И.В., Варламов Д.А., Бычкова Я.В., Лоскутов А.Б., Новгородова Е.А. Татариновит $Ca_3Al(SO_4)[B(OH)_4](OH)_6 \cdot 12H_2O$ – новый минерал группы этрингита из Баженовского месторождения (Средний Урал, Россия) и его кристаллическая структура // Записки РМО. 2016. Т. 145. № 1. С. 48–67.

Шербакоева Е.П., Баженова Л.Ф. Ефремовит $(NH_4)_2Mg_2(SO_4)_3$ – аммониевый аналог лангбейнита – новый минерал // Записки ВМО. 1989. Т. 118. № 3. С. 84–87.

Яковенчук В.Н., Пахомовский Ю.А., Коноплева Н.Г., Паникоровский Т.Л., Базай А.В., Михайлова Ю.А., Бочаров В.Н., Кривовичев С.В. Сергейсмирновит, $MgZn_2(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$, новый минерал из месторождения Кестер (Саха-Якутия, Россия) // Доклады РАН. 2022. Т. 505. С. 165–169.

Яржемский Я.Я. Преображенскит – новый борат соленосных толщ Индерского поднятия // Доклады АН СССР. 1956. Т. 111. № 5. С. 1087–1090.

Minerals Named after Alumni and Staff Members of Saint Petersburg Mining University (to the 250th Anniversary of St. Petersburg Mining University)

V. G. Krivovichev^{a,*} and V. V. Smolenskiy^{b,**}

^aSaint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

^bSaint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: v.krivovichev@spbu.ru

**e-mail: smolenskiy_vv@pers.spmi.ru

The article is dedicated to the 250th anniversary of the St. Petersburg Mining University (Mining Institute). History of the Mining University is closely connected with the names of scientists who have made a huge contribution to the development of mineralogy and adjacent sciences. The names of 57 alumni and staff members of the Institute have forever entered the history of mineralogy. 62 mineral species are named in their honor. The article summarizes the scientific interests and achievements of teachers, scientists and mining engineers, after whom the minerals were named.

Keywords: Saint Petersburg Mining University, mineral species, mineral names, history of sciences, general mineralogy

REFERENCES

- Agakhanov A.A., Pautov L.A., Pekov I.V., Karpenko V.Y., Siidra O.I., Sokolova E., Hawthorne F.C., Faiziev A.R., Kasatkin A.V., Kulikova I.M., Muftakhov V.A. Kreiterite. CNMNC Newsletter No. 51. *Miner. Mag.* **2019**. Vol. 83. P. 760.
- Agakhanov A.A., Pautov L.A., Zubkova N.V., Zolotarev A.A., Kasatkin A.V., Karpenko V.Y., Pekov I.V., Agakhanova V.A., Muftakhov V.A., Škoda R., Britvin S.N. Dutkevichite-(Ce); CNMNC Newsletter No. 54. *Miner. Mag.* **2020**. Vol. 84. P. 360.
- Agakhanov A.A., Stepanenko D.A., Zubkova N.V., Pautov L.A., Pekov I.V., Kasatkin A.V., Karpenko V.Y., Agakhanova V.A., Škoda R., Britvin S.N., Pushcharovsky D.Y. Avdeevite, a Na-dominant alkali beryl: Definition as valid mineral species and new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149. N 6. P. 1–19 (in Russian).
- Alekseeva M.A., Chernikov A.A., Shashkin D.P., Kon'kova E.A., Gavrilova I.N. Strelkinite, a new uranyl vanadate. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1974**. Vol. 103. N 5. P. 576–580 (in Russian).
- Ankinovich E.A. A new vanadium mineral, rusakovite. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1960**. Vol. 89. N 4. P. 440–447 (in Russian).
- Ankinovich S.G., Ankinovich E.A., Rozhdestvenskaya I.B., Frank-Kamenetsky V.A. Chernykhite – a new barium-vanadium silicate from Severo-Zapadnogo Karatau. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1972**. Vol. 101. N 4. P. 451–458 (in Russian).
- Belova L.N., Gorshkov A.I., Ivanova O.A., Sivtsov A.V., Lizorkina L.I., Voronikhin V.A. Vyacheslavite $U^{4+}(PO_4)(OH) \cdot nH_2O$ – a new uranium phosphate. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1984**. Vol. 113. N 3. 360–365 (in Russian).
- Britvin S.N., Vapnik Y., Polekhovskiy Y.S., Krivovichev S.V., Krzhizhanovskaya M.G., Gorelova L.A., Vereshchagin O.S., Shilovskikh V.V., Zaitsev A.N. Murashkoite, FeP, a new terrestrial phosphide from pyrometamorphic rocks of the Hatrurim Formation, South Levant. *Miner. Petrol.* **2019**. Vol. 113. P. 237–248.
- Chukanov N.B., Dubinchuk V.T., Murashko M.N., Zadov A.E., Karpenko V.Y. Rudenkoite $Sr_3Al_{3.5}Si_{3.5}O_{10}(OH_{7.5}, O_{0.5})Cl_2 \cdot H_2O$, a new mineral from phlogopite deposits of Southern Yakutia. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2004**. Vol. 133. N 3. P. 37–41 (in Russian).
- Chukanov N.V., Kasatkin A.V., Zubkova N.V., Britvin S.N., Pautov L.A., Pekov I.V., Varlamov D.A., Bychkova Y.V., Loskutov A.B., Novgorodova E.A. Tatarinovite $Ca_3Al(SO_4)[B(OH)_4](OH)_6 \cdot 12H_2O$ – a new ettringite-group mineral from the Bazhenovskoe deposit (the Middle Urals, Russia), and its crystal structure. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2016**. Vol. 145. N 1. P. 48–67 (in Russian).
- Damour A.A. Note sur un borate d'alumine cristallisé, de la Sibérie. Nouvell espèce minérale. *Bulletin de la Société Minéralogique de France*. Paris. **1883**. N 6. P. 20–23.
- Dolomanova E.I., Senderova V.M., Yanchenko M.T. Zavaritskite (BiOF), a new mineral of the oxyfluoride group. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1962**. Vol. 146. P. 680–682 (in Russian).
- Egorov B.L., Dara A.D., Senderova V.M. Melkovite, a new phosphate-molybdate from the zone of oxidation. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1969**. Vol. 98. N 2. P. 207–212 (in Russian).
- Fröbel J. Zunft: Monotrimetrische Pyritöiden. I. Familie: Pyrrhotinen. Hessit. *Grundzüge eines Systemes der Krystallogie oder der Naturgeschichte der Unorganischen Individuen*. Zürich und Winterthur: Druck und Verlag des Literarischen Comptoirs. **1843**. S. 49–50.
- Galuskin E.V., Galuskina I.O., Kusz J., Armbruster T., Marzec K., Dzierżanowski P., Murashko M. Vapnikite Ca_3UO_6 – a new double-perovskite mineral from pyrometamorphic larnite rocks of the Jabel Harum, Palestinian Autonomy, Israel. *Miner. Mag.* **2014**. Vol. **78**. P. 571–581.
- Genkin A.D., Zvygintsev O.E. Vysotskite, a new sulfide of palladium and nickel. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1962**. Vol. 91. N 6. P. 718–725 (in Russian).
- Genkin A.D., Zhuravlev N.N., Smirnova E.M. Moncheite and kotulskite – new minerals – and the composition of michenerite. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1963**. Vol. 92. N 1. P. 33–50 (in Russian).
- Godlevsky M.N. Kurnakovite, a new borate. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1940**. Vol. 28. P. 639–641 (in Russian).
- Hermann R. Untersuchungen einiger neuer russischer Mineralien. 1. Ueber Planerit, ein neues Mineral. *Bulletin de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou*. **1862**. Vol. 35. N 3. P. 240–243.
- Karpenko V.Y., Pautov L.A., Sokolova E.V., Hawthorne F.C., Agakhanov A.A., Dikaya T.V., Bekenova G.K. Ankinovichite – the nickel analogue of alvanite – a new mineral from Kurumsak (Kazakhstan) and Kara-Chagyr (Kyrgystan). *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2004**. Vol. 133. N 2. P. 59–70 (in Russian).
- Kasatkin A.V., Plášil J., Makovicky E., Chukanov N.V., Škoda R., Agakhanov A.A., Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S. Auerbakhite, $MnTl_2As_2S_5$, a new thallium sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *J. Geosciences*. **2021**. Vol. 66. P. 89–96.

Kasatkin A.V., Plášil J., Škoda R., Camprostrini I., Chukanov N.V., Agakhanov A.A., Karpenko V.Y., Belakovskiy D.I. Ferroefremovite, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}_2^{2+}(\text{SO}_4)_3$, a new mineral from Solfatara di Pozzuoli, Campania, Italy. *Canad. Miner.* **2021**. Vol. 59. P. 59–68.

Khomyakov A.P., Kurova T.A., Chistyakova N.I. Sobolevite $\text{Na}_{14}\text{Ca}_2\text{MnTi}_3\text{P}_4\text{Si}_4\text{O}_{34}$ – a new mineral. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1983**. Vol. 112. N 4. P. 456–461 (in Russian).

Khomyakov A.P., Nchelyustov G.N., Dorokhova G.I. Nefedovite, $\text{Na}_5\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_4\text{F}$, a new mineral. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1983**. Vol. 112. N 4. P. 479–483 (in Russian).

Khomyakov A.P., Vrublevskaya Z.V., Zvyagin B.B., Mateeva N.A., Piloyan G.O. Shafranovskite $(\text{Na},\text{K})_6(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, a new mineral. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1982**. Vol. 111. N 4. P. 475–480 (in Russian).

Knipovich Y.N., Komkov A.I., Nefedov E.I. On stepanovite and the new mineral Zhemchuzhnikovite. *Trudy Vsesoyuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Geologicheskogo Instituta*. **1963**. Vol. 96. P. 131–135 (in Russian).

Kukhareno A.A., Orlova M.P., Bulakh A.G., Bagdasarov E.A., Rimskaya-Korsakova O.M., Nefedov E.I., Il'inskiĭ G.A., Sergeev A.S., Abakumova N.B. Caledonian complex of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites of the Kola Peninsula and Northern Karelia. Moscow: Nedra, **1965**. P. 479–481 (in Russian).

Kulagov E.A., Evstigneeva T.L., Yushko-Zakharova O.E. The new nickel sulfide godlevskite. *Geol. Ore Deposits*. **1969**. N 11. P. 115–121 (in Russian).

Kuz'menko M.V., Kazakova M.E. Nenadkevichite, a new mineral. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1955**. Vol. 100. P. 1159–1160 (in Russian).

Makeev A.B., Evstigneeva T.L., Troneva N.V., Vyalsov L.N., Gorshkov A.I., Trubkin N.V. Yushkinite $\text{V}_{1-x}\text{Sn}[(\text{Mg},\text{Al})(\text{OH})_2]$ – a new mineral. *Miner. J.* **1984**. N 6. P. 91–98 (in Russian).

Malinko S.V. A new calcium borate, Korzhinskite. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1963**. Vol. 92. P. 555–559 (in Russian).

Melnikov M.P. Loranskit, ein neues Mineral. *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*. Groth. Leipzig. **1899**. Bd. 31. S. 505–505 (как loranskit); *Amer. Miner.* 1987. Vol. 72. P. 1031–1042 (как **loranskit-(Y)**)

Nefedov E.I. Report on new minerals discovered by him. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1953**. Vol. 82. N 4. P. 317 (in Russian).

Pekov I.V., Chukanov N.V., Ferraris G., Ivaldi G., Pushcharovsky D.Yu., Zadov A.E. Shirokshinit, $\text{K}(\text{NaMg}_2)\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$, a new mica with octahedral Na from Khibiny massif, Kola Peninsula: descriptive data and structural disorder. *Eur. J. Miner.* **2003**. Vol. 15. P. 447–454.

Pekov I.V., Chukanov N.V., Zadov A.E., Rosenberg K.A., Rastsvetaeva R.K. Alsakharovite-Zn, $\text{NaSrKZn}(\text{Ti},\text{Nb})_4[\text{Si}_4\text{O}_{12}]_2(\text{O},\text{OH})_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, a new mineral of the labuntsovite group from Lovozero massif, Kola Peninsula. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2003**. Vol. 132. N 1. P. 52–58 (in Russian).

Pekov I.V., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Lykova I.S., Vigasina M.F., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Y. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. I. Yurmarinite. *Miner. Mag.* **2014**. Vol. 78. P. 905–917.

Pekov I.V., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Kartashov P.M., Polekhovskiy Y.S., Murashko M.N. Pushcharovsky D.Y. Koksharovite, $\text{CaMg}_2\text{Fe}_3^{3+}(\text{VO}_4)_6$, and grigorievite, $\text{Cu}_3\text{Fe}_2^{3+}\text{Al}_2(\text{VO}_4)_6$, two new howardevansite-group minerals from volcanic exhalations. *Eur. J. Miner.* **2014**. Vol. 25. P. 667–677.

Pekov I.V., Zubkova N.V., Belakovskiy D.I., Yapaskurt V.O., Vigasina M.F., Sidorov E.G., Pushcharovsky D.Y. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. IV. Shchurovskiyite, $\text{K}_2\text{CaCu}_6\text{O}_2(\text{AsO}_4)_4$ and dmisokolovite, $\text{K}_3\text{Cu}_5\text{AlO}_2(\text{AsO}_4)_4$. *Miner. Mag.* **2015**. Vol. 79. P. 1737–1753.

Pekov I.V., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Lykova I.S., Vigasina M.F., Ksenofontov D.A., Britvin S.N., Sidorov E.G., Khanin D.A., Pushcharovsky D.Yu. Feodosiyite, $\text{Cu}_{11}\text{Mg}_2\text{Cl}_{18}(\text{OH})_8\cdot 16\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*. **2018**. Bd. 195. S. 27–39.

Pekov I.V., Lykova I.S., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Turchkova A.G., Britvin S.N., Sidorov E.G., Scheidl K.S. New arsenate minerals from the Arsenatnaya fumarole, Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. XI. Anatolyite, $\text{Na}_6(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe}^{3+})_3\text{Al}(\text{AsO}_4)_6$. *Miner. Mag.* **2019**. Vol. 83. P. 633–638.

Polekhovskiy Y.S., Tarasova I.P., Nesterov A.P., Pakhomovskiy Y.A., Bakhchisaraitsev A.Y. Sudovikovite PtSe_2 – a new platinum selenide from Karelia metasomatites. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1997**. Vol. 354. P. 82–85 (in Russian).

Popova V.I., Popov V.A., Rudashevskiy N.S., Glavatskikh S.F., Polyakov V.O., Bushmakina A.F. Nabokoite $\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5\cdot \text{KCl}$ and atlasovite $\text{Cu}_6\text{Fe}^{3+}\text{Bi}^{3+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5\cdot \text{KCl}$. New minerals of volcanic exhalations. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1987**. Vol. 116. P. 358–367 (in Russian).

Rosé G. 38. Tschewkinit. In: *Mineralogisch-Geognostische Reise nach dem Ural, dem Altai und dem Kaspischen Meere*. Berlin: Sanderschen. **1842**. Bd. 2. S. 513–514.

Rose H. Ueber die Zusammensetzung des Uranotantals und des Columbits vom Ilmengebirge in Sibirien. *Anualen der Physik und Chemie*. Leipzig: J.C. Poggendorf. **1847**. Bd. 71. S. 157–169 (как samarskit); *Amer. Miner.* **1987**. Vol. 72. P. 1031 (как samarskite-(Y)).

Rukavishnikova I.A. Some magnesium-nickel hydrous silicates of the Nizhne-Tagilsk serpentine massif. *Kora Vyvetrivaniia*. **1956**. N 2. P. 124–178 (in Russian).

Rudashevsky, N.S., Motshalov, A.G., Trubkin, N.V., Shumskaya, N.M., Shkursky, V.I., Evstigneeva, T.L. Cherepanovite RhAs – A new mineral. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1985**. Vol. 114. P. 464–469 (in Russian).

Saburov S.P., Britvin S.N., Bekenova G.K., Sergieva M.N., Kotelnikov P.E., Chukanov N.V., Yagovkina M.A. Niksergievite, $[Ba_{1.33}Ca_{0.67}Al(CO_3)(OH)_4][Al_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2] \cdot nH_2O$, a new phyllosilicate related to the surite-ferrisurite series. *Amer. Miner.* **2005**. Vol. 90. P. 1163–1166.

Schüller A., Wohlmann E. Betehtinit, ein neues Blei-Kupfer-Sulfid aus den Mansfelder Rücken. *Geologie*. **1955**. N 4. S. 535–555.

Shablinskii A.P., Filatov S.K., Krivovichev S.V., Vergasova L.P., Moskaleva S.V., Avdontseva E.Y., Kryazev A.V., Bubnova R.S. Dobrovolskyite, $Na_4Ca(SO_4)_3$, a new fumarolic sulfate from the Great Tolbachik fissure eruption, Kamchatka Peninsula, Russia. *Miner. Mag.* **2021**. Vol. 85. P. 233–241.

Sheherbakova Y.P., Bazhenova L.F. Efremovite $(NH_4)_2Mg_2(SO_4)_3$ – ammonium analogue of langbeinite – a new mineral. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1989**. Vol. 118. N 3. P. 84–87 (in Russian).

Siidra O.I., Lukina E.A., Nazarchuk E.V., Depmeier W., Bubnova R.S., Agakhanov A.A., Avdontseva E.Y., Filatov S.K., Kovrugin V.M. Saranchinaite, $Na_2Cu(SO_4)_2$, a new exhalative mineral from Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia, and a product of the reversible dehydration of kröhnkite, $Na_2Cu(SO_4)_2(H_2O)_2$. *Miner. Mag.* **2018**. Vol. 82. P. 257–274.

Simmons W.B., Hanson S.L., Falster A.U. Samarskite-(Yb): a new species of the samarskite group from the Little Patsy pegmatite, Jefferson County, Colorado. *Canad. Miner.* **2006**. Vol. 44. P. 1119–1125.

Spiridonov E.M., Bezsmertnaya M.S., Chileva T.N., Bezsmertny V.V. Bilbinskite, $Au_3Cu_2PbTe_2$, a new mineral of gold-telluride deposits. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1978**. Vol. 107. N 3. P. 310–315 (in Russian).

Subbotin V.V., Voloshin A.V., Pakhomozskii Y.A., Men'shikov Y.P., Subbotina G.F. Ternovite, $(Mg,Ca)Nb_4O_{11} \cdot nH_2O$, a new mineral and other hydrous tetranioabates from carbonatites of the Vuoriyarvi massif, Kola Peninsula, Russia. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*. **1997**. S. 49–60 (in Russian).

Uvarova Y.A., Sokolova E., Hawthorne F.C., Agakhanov A.A., Pautov L.A. The crystal structure of nalivkinite, a new lithium member of the astrophyllite group. *Canad. Miner.* **2008**. Vol. 46. P. 651–659.

Vergasova L.P., Filatov S.K., Serafimova E.K., Starova G.L. Piypite $K_2Cu_2O(SO_4)_2$ – a new mineral of volcanic sublimates. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1984**. Vol. 275. P. 714–717 (in Russian).

Vergasova L.P., Filatov S.K., Semenova T.F., Filosofova T.M. Sofiite $Zn_2(SeO_3)Cl_2$ – a new mineral from volcanic sublimates. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1989**. Vol. 118. 1. P. 65–69 (in Russian).

Vergasova L.P., Krivovichev S.V., Filatov S.K., Britvin S.N., Burns P.K., Ananyev V.V. Parageorgbokiite, $\beta-Cu_5O_2(SeO_3)_2Cl_2$ – a new mineral from volcanic Exhalation (Kamchatka Peninsula, Russia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2006**. Vol. 135. N 4. P. 24–28 (in Russian).

Vergasova L.P., Semenova T.F., Filatov S.K., Krivovichev S.V., Shuvalov R.R., Ananev V.V. Georgbokiite $Cu_5O_2(SeO_3)_2Cl_2$ – a new mineral from volcanic exhalations. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1999**. Vol. 364. P. 527–531 (in Russian).

Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Y., Krivovichev S.V., Pakhomovsky Y.A., Selivanova E.A., Korchak J.A., Men'shikov Y.P., Drogobuzhskaya S.V., Zalkind O.A. Eliseevite, $Na_{1.5}Li[Ti_2Si_4O_{12.5}(OH)_{1.5}] \cdot 2H_2O$, a new microporous titanosilicate from the Lovozero alkaline massif (Kola Peninsula, Russia). *Amer. Miner.* **2011**. Vol. 96. P. 1624–1629.

Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Y.A., Konopleva N.G., Panikorovskii T.L., Bazai A.V., Mikhailova J.A., Bocharov V.N., Krivovichev S.V. Sergeysmirnovite, $MgZn_2(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$, a new mineral from the Kester deposit (Sakha-Yakutia, Russia). *Doklady Earth Sci.* **2022**. Vol. 505. P. 165–169 (in Russian).

Yarzhemskii Y.Y. Preobrazhenskite – a new borate of the saliferous strata of the Inder uplift. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1956**. Vol. 111. P. 1087–1090 (in Russian).