

МИНЕРАЛОГИЯ

Научная статья

УДК 553.89

doi: 10.17223/25421379/24/3

НЕФРИТ БАЖЕНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА, СРЕДНИЙ УРАЛ

Евгений Владимирович Кислов¹, Юрий Викторович Ерохин²,
Михаил Петрович Попов³, Анатолий Германович Николаев⁴



¹ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

^{1, 2, 3} Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

¹ evg-kislov@ya.ru

² erokhin-yu@yandex.ru

³ popovm1@yandex.ru

⁴ anatolij-nikolaev@yandex.ru

Аннотация. На Баженовском месторождении хризотил-асбеста (Средний Урал) выявлены тела апоультрамафитового нефрита на контакте апогаббровых родинитов и серпентинитов. Нефрит представлен тремолитом, второстепенные минералы – хромитом, хромгроссуляром, отмечены серпентин, тальк, никелин, маухерит и уваровит. Окраска однородная до неоднородной, зеленая до яблочно-зеленой, травяно-зеленой, шпинатно-зеленой, серовато-зеленой, светло-зеленой, белесой. Зеленая окраска связана с ионами Fe^{2+} . Нефрит Баженовского месторождения отвечает требованиям, предъявляемым к поделочному камню.

Ключевые слова: нефрит, минералогия, поделочный камень, Баженовское месторождение

Благодарности: авторы признательны И.И. Ефимову за предоставленную информацию и рецензенту редакции за ценные замечания и советы, позволившие значительно улучшить первоначальный вариант рукописи статьи.

Источник финансирования: экспедиционные исследования и выполнение анализов проведены в рамках государственных заданий ГИН СО РАН, № гос. рег. АААА-А21-121011390003-9 (Кислов Е.В.) и ИГГ УрО РАН, № гос. рег. АААА-А18-118052590028-9 (Кислов Е.В.) и АААА-А18-118052590032-6 (Попов М.П., Ерохин Ю.В.) с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-680. Природа окраски и кристаллохимические особенности изучены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2020-931 в рамках программы развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты» (Николаев А.Г.). Изучение качественных характеристик, интерпретация полученных результатов и подготовка статьи выполнены за счет гранта РНФ № 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003> (Кислов Е.В.).

Для цитирования: Кислов Е.В., Ерохин Ю.В., Попов М.П., Николаев А.Г. Нефрит Баженовского месторождения хризотил-асбеста, Средний Урал // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 40–59. doi: 10.17223/25421379/24/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/24/3

NEPHRITE OF THE BAZHENOVSKOYE CHRYSOTILE-ASBESTOS DEPOSIT, MIDDLE URALS

Evgeniy V. Kislov¹, Yuriy V. Erokhin², Mikhail P. Popov³, Anatoly G. Nikolaev⁴

¹ Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

^{1, 2, 3} Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

³ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

⁴ Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russia

¹ evg-kislov@ya.ru

² erokhin-yu@yandex.ru

³ popovm1@yandex.ru

⁴ anatolij-nikolaev@yandex.ru

Abstract. The most important nephrite deposits in Russia are located within the West and East Sayan, the Southwest Baikal Region, and the Middle Vitim Highland. In Russia, as of 1 January 2020, the balance sheet contains 24 deposits, including Akademicheskoye in Chelyabinsk Oblast, Kurtushibinskoye (central sector), Kantegirskoye and Stan-Taskylskoye in Krasnoyarsk Krai, Kurtushibinskoye (eastern sector) in the Republic of Tyva, Onotskoye in Irkutsk Oblast, Udokan (lode 1) in Zabaikalskiy krai, as well as 17 deposits in Buryatia.

In the Bazhenovskoye chrysotile-asbestos deposit (Middle Urals), nephrite bodies of the serpentinite type were found on the contact of after gabbro rodingites and serpentinites. The Bazhenovskoye deposit was discovered in 1885 and has been mined since 1889. However, the first data about nephrite at Bazhenovskoye deposit refer to 2009.

In the Bazhenovskoye deposit, nephrite was discovered in an operating quarry of the “Uralasbest” plant in the central and south sections. The nephrite block contacts gabbro through a transitional zone - a bright green opaque tremolite rock with inclusions of ore minerals sometime. The color is uniform to non-uniform, green to light green, bluish green, greyish green, and whitish. Spots, streaks, lenticles of bright bluish-green or, on the contrary, light green color are sometimes noted. The texture is solid, mottled, and striped. The blockiness depends on the quarry drilling and blasting rocks and ranges from 5 cm to 2 m. The nephrite shines through to a depth of 0.5 to 2 cm. The luster is greasy to matte, and the hardness on the Mohs scale is 6–6.5.

The nephrite is mostly comprised of tremolite. Chromite decreases the quality of the ornamental stone, but it is replaced by chrome grossular, which gives the nephrite a brighter bluish-green color locally. Crushed grains of chromite contain increased concentrations of Zn and Mn. The quality of the nephrite is decreased by serpentine and talc, as well as by fractures due to drilling and blasting works. The specific feature of the nephrite in the Bazhenovskoye deposit is the formation of nickeline, maucherite, and uvarovite. The chemical composition of the nephrite from the Bazhenovskoye deposit is similar to that of serpentinite type nephrite from known deposits.

According to the obtained results of Raman spectroscopy, we can confirm the green color of the nephrite from the Bazhenovskoye deposit, which is exclusively associated with Fe^{2+} ions. Chrome grossular, replacing chromite, causes the appearance of bright bluish-green spots.

The origin of this nephrite includes a combination of metasomatic and metamorphic processes. At a progressive stage, serpentinite was replaced by diopside $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{CaO} + 4\text{SiO}_2 + 2.5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$. At the regressive stage, diopside was replaced by nephrite $2\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{MgO} + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$.

The nephrite of the Bazhenovskoye deposit meets the requirements for an ornamental stone.

Keywords: nephrite, mineralogy, gemstone, Bazhenov deposit

Acknowledgments: the authors are grateful to I.I. Efimov for the information provided and to the editorial reviewer for valuable comments and advice, which made it possible to significantly improve the original version of the manuscript.

Source of financing: expeditionary research and analysis were carried as a part of the GIN SB RAS State assignments (state registration No. AAAA-A21-121011390003-9, Kislov E.V.) and IGG UB RAS State assignments (state registration No. AAAA-A18-118052590028-9, Kislov E.V., AAAA-A18-118052590032-6, Popov M.P., Erokhin Yu.V.) using «Geoanalitik» shared research facilities of the IGG UB RAS. The re-equipment and comprehensive development of the «Geoanalitik» shared research facilities of the IGG UB RAS is financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-680). The nature of the color and crystal chemical features were studied with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-15-2020-931 as part of the development program of the National Center for Medical Research “Rational development of liquid hydrocarbon reserves of the planet” (Nikolaev A.G.). The study of qualitative characteristics, the interpretation of the results obtained, and the preparation of the article were funded by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003> (Kislov E.V.).

For citation: Kislov E.V., Erokhin Yu.V., Popov M.P., Nikolaev A.G. (2022) Nephrite of the Bazhenovskoye chrysotile-asbestos deposit, Middle Urals. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 40–59. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/24/3

Введение

Нефрит – высоколиквидный ювелирно-поделочный камень, издавна используемый человеком, особо популярный в Китае и некоторых других странах. Наиболее ценится нефрит просвечивающий белый, черный и шпинатно-зеленый с минимальным количеством рудных минералов.

Месторождения нефрита относятся к двум эндогенным геолого-промышленным типам: апосерпентинитовые метасоматиты офиолитов (апоультрамафитовый) и аподоломитовые тремолит-кальцитовые магнезиальные скарны (апокарбонатный). Месторождения первого типа – источник преимущественно зеленого до бурого и черного нефрита, месторождения второго типа дают в основном светлоокрашенный нефрит от белого до зеленого, окисление двухвалентного железа приводит к бурой (медовой) окраске, довольно редок, но особо ценен черный нефрит [Flint, Dubowski, 1991; Zhong et al.,

2019]. Экзогенный геолого-промышленный тип представлен россыпями, как правило, аллювиальными.

Важнейшие месторождения нефрита России находятся в пределах Западного и Восточного Саяна, Юго-Западного Прибайкалья и Средневитимского нагорья. В России на 1 января 2021 г. балансом учтены 25 месторождений, в том числе Академическое в Челябинской области, Куртушибинское (участок Центральный), Кантегирское и Стан-Таскыльское в Красноярском крае, Куртушибинское (участок Восточный) в Республике Тыва, Онотское в Иркутской области, Удоканское (залежь 1) в Забайкальском крае, а также 18 месторождений в Бурятии. На 1 января 2020 г. балансовые запасы нефрита в Российской Федерации составляют по $C_1 + C_2$: 20 490,22 т нефрита-сырца, 5 799,18 т сортового нефрита и 71,02 т – ювелирного. При этом в Бурятии находится 88,64 % балансовых запасов нефрита-сырца и 88,76 % – сортового.

В 2020 г. на семи месторождениях Бурятии, по официальным данным, было добыто 1 342,9 т нефрита-сырца и 422,03 т сортового нефрита, в других регионах России добыча не велась. Разрабатывались Оспинское и Хамар-Худинское месторождения апосерпентинитового нефрита и Кавоктинское, Голубинское, Хайтинское, Сергеева залежь и Нижнее Олломи – аподоломитового нефрита. На других месторождениях и в других регионах России добыча нефрита носит нерегулярный характер, что повышает интерес к новым находкам ценного полезного ископаемого [Кислов, 2017; Kislov, 2019]. Рассматриваются проблемы комплексного использования некондиционного нефрита [Худякова и др., 2020; Khudyakova et al., 2020].

Проявления нефрита обнаружены также в Якутии [Гадиятов, Маршинцев, 2000; Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015], на Северном Кавказе [Беляев и др., 2016; Газеев и др., 2018], Алтае [Зырянова и др., 2006; Гусев, 2007; Рычков, Сенькин, Рычкова, 2012], Камчатке [Крылова и др., 1985] и в Приамурье.

На Урале известен ряд проявлений нефрита [Архиреев и др., 2011; Макагонов, Архиреев, 2014]. Единичные находки сделаны в районе Мулдакаевской дачи [Кротов, 1915] и на горе Бикиляр [Мамуровский, 1918]. На Полярном Урале в ультрамафитовом массиве Рай-Из обнаружено проявление Нырдовоменшор [Казак, Добрецов, Молдаванцев, 1976; Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015; Кислов, Попов, Нурмухаметов, 2021]. На Среднем Урале нефрит известен на горе Лиственной у Пышминского завода в аллювии Нейво-Рудника [Юшкин, Иванов, Попов, 1986]. Халиловское месторождение нефрита открыто в 1968 г. в Халиловском ультраос-

новном массиве на территории Гайского района Оренбургской области [Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015]. На южном продолжении Урала находится Джетыгаринское проявление нефрита в Казахстане [Аеров и др., 1975]. В 2003 г. в окрестностях г. Миасс (Челябинская область) открыто Академическое месторождение со Студенческим и Факультетским участками [Архиреев и др., 2011]. Выделен Учалинско-Миасский потенциально нефритоносный район, прослеживающийся с севера на юг от г. Карабаш через Миасс до г. Учалы [Макагонов, Архиреев, 2014]. Тем не менее добыча нефрита на Урале в настоящее время не ведется.

Поэтому находка нефрита на эксплуатируемом Баженовском месторождении хризотил-асбеста в Свердловской области представляет большой интерес. Первые данные относятся к 2009 г. (устное сообщение Б.А. Точилина). Краткая информация опубликована А.Б. Лоскутовым и Е.А. Новгородовой [2013]. До того, как нефрит был изучен и диагностирован, он вывозился в отвалы. Теперь он складывается на рудном дворе и реализуется.

Баженовское месторождение

Баженовское месторождение хризотил-асбеста находится в 60 км к северо-востоку от г. Екатеринбург на восточном склоне Среднего Урала. Геология и минералогия месторождения, открытого в 1885 г. и отрабатываемого с 1889 г., хорошо изучена [Баженовское..., 1985; Спиридонов и др., 1996; Ефимов, Барабанов, 1997; Ерохин, 2017].

Оно располагается в одноименном массиве ультраосновных пород, относимых к среднему-верхнему ордовика, вытянутом в меридиональном направлении на 28 км при ширине от 1 до 4 км; площадь массива на поверхности составляет около 75 км². В составе Баженовского гипербазитового массива преобладают гарцбургиты при резко подчиненной роли дунитов, клинопироксенитов, оливинных вебстеритов, лерцолитов и верлитов. При этом пироксениты и верлиты слагают значительные объемы в северной части массива (рис. 1). С запада к нему примыкают габбронориты Асбестовского массива, слагающие его висячий бок, а с востока и юга он ограничивается Рефтинским и Каменским гранитными массивами более молодого возраста.

Жильные тела основного и кислого состава с многочисленными апофизами пронизывают тело ультраосновных пород, фиксируя разноориентированные разломы протяженностью до 12–15 км. Этими разломами ультраосновные породы разделены на ряд блоков. В центральных частях блоки сложены относительно свежими гарцбургитами (содержание серпен-

тина от 30 до 70 об. %). По периферии, ближе к зонам разломов, они замещены серпентинитами и тальк-хлоритовыми породами, а в осевых частях разломов – тальк-карбонатными породами. Дайки представлены габброидами, диоритами и плагиогранитами, в боль-

шинстве своем родингитизированными. Мощность даек от 0,1 до 1–2 м. Возраст даек плагиогранита, секущих тело ультраосновных пород, 428 ± 33 млн лет – раннесилурийский [Ерохин, Хиллер, Иванов, 2018].

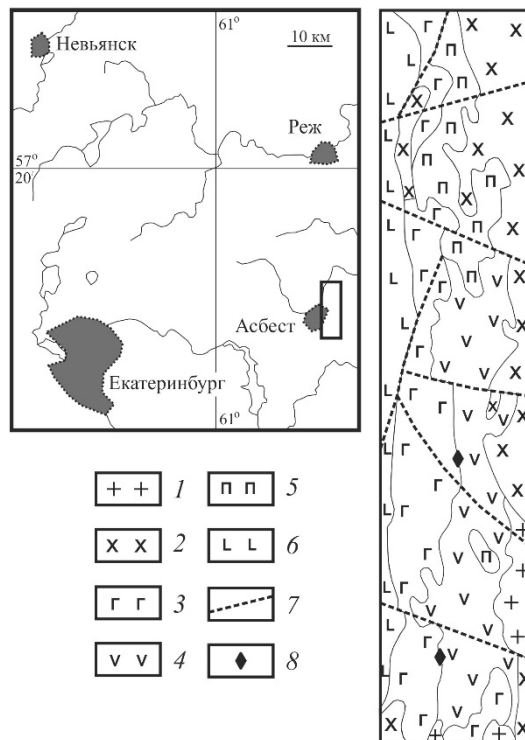


Рис. 1. Расположение и геологическая карта Баженовского офиолитового комплекса по [Баженовское..., 1985] с упрощениями и дополнениями

Условные обозначения: 1 – гранодиориты, адамеллиты Каменского комплекса (C_{1-2}), 2 – тоналиты, габбро-диориты и плагиограниты Рефтинского комплекса (S_2-D_1), 3 – габбронориты Асбестовского комплекса (S_1), 4 – гарцбургиты Баженовского офиолитового комплекса (O_{2-3}), 5 – клинопироксениты, вебстериты и верлиты послеофиолитового комплекса (S), 6 – базальты и кремнисто-базальтовые образования (O_3-S_1), 7 – разрывные нарушения, 8 – места находок нефрита

Fig. 1. Location and geological map of the Bazhenov ophiolite complex after [Bazhenovskoe..., 1985] with simplifications and additions

Legend: 1 – granodiorites, adamellites of the Kamensky complex (C_{1-2}), 2 – tonalites, gabbro-diorites and plagiogranites of the Reftinsky complex (S_2-D_1), 3 – gabbronorites of the Asbestos complex (S_1), 4 – harzburgites of the Bazhenov ophiolite complex (O_{2-3}), 5 – clinopyroxenites, websterites and wehlites of the post-ophiolite complex (S), 6 – basalts and siliceous-basaltic formations (O_3-S_1), 7 – faults, 8 – places where nephrite was found

На площади Баженовского ультраосновного массива разведаны 24 асбестовые залежи. Они располагаются в средней части ультраосновного массива и вытянуты в меридиональном направлении. Длина залежей колеблется от 200 м до 4,5 км, мощность – от 20 до 300 м. Сближенные залежи объединяются в промышленные участки. Выделены пять участков (с севера на юг): Окуневско-Рефтинский, Северный, Центральный, Южный и «Трудовой отдых». Общая протяженность зоны промышленной асбестоносности составляет около 10 км. Промышленная асбестоносность прослежена на глубину до 1 000 м.

Методы исследования

Визуальное петрографическое и минералогическое изучение нефрита проводилось при естественном освещении, применялась фотофиксация. Декоративные свойства (окраска, оттенок, рисунок, наличие каемок, степень шероховатости) определялись при помощи бинокулярного микроскопа МБС-10 и спекнонарика СYZ-B05. Изготавливались и полировались пластины размером от 5×10 см до 10×15 см толщиной от 1 до 3 см для определения просвечиваемости, принятия полировки и шагрени. Шлифы бы-

ли изучены под поляризационным микроскопом ПОЛАМ Л-213.

Химический состав пород определен рентгено-спектральным флуоресцентным методом на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (SHIMADZU, Япония) в лаборатории физических и химических методов исследования ИГГ УрО РАН (Екатеринбург) по методике [Горбунова и др., 2015], аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Г.С. Неупокоева.

Состав минералов определен на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100 (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург), оборудованного пятью волновыми спектрометрами, аналитик А.В. Михеева. Стандарты для арсенидов: Ag – Ag; S, Cu, Fe – CuFeS₂; As – InAs; Hg – HgTe; Pb – PbS; Ni – Ni; Au – Au; Bi – Bi; Zn – ZnS; Sb – GaSb; Cd – CdS; Co – FeNiCo. Стандарты для силикатов и оксидов: Mg, Ca, Si – диопсид; Na, Al – жадеит; Fe – Fe₂O₃; Cr – Cr₂O₃; K – ортоклаз; Mn – родонит; Ni – Ni; V – V; Co – FeNiCo; Zn – ZnS; Ti – TiO₂. Пределы обнаружения элементов в разных минералах нефрита приведены в табл. 1.

Окраска нефрита исследовалась оптической абсорбционной спектроскопией (КФУ, Казань). Оптические спектры поглощения записывались на специализированном спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 в диапазоне длин волн 185–3 300 нм и на стандартизированном спектрофотометре МСФУ-К в интервале длин волн 400–800 нм с шагом 1 нм. Для объективного измерения и описания окраски нефрита была использована методика расчета координат цветности по международной колориметрической системе XYZ. Все колориметрические результаты по интерпретации оптических спектров поглощения минералов были вынесены на стандартный цветовой треугольник международной комиссии по освещению МКО-1931. Колориметрические параметры исследуемых минералов (x, y, z – коэффициенты цветности; λ – доминирующая длина волны, P – плотность основного цветового тона) рассчитывались с использованием специализированной программы Spectra. Оптические спектры поглощения записывались с плоскопараллельных препаратов; цвет нефрита – зеленый, различной интенсивности.

Для дополнительного анализа кристаллохимических особенностей нефрита проводились исследования методами спектроскопии комбинационного рассеяния. Съемка образцов производилась на конфокальном рамановском микроспектрометре inVia Qontor (КФУ, Казань). Контроль режимов и обработка данных производились в программе Wire 5. В работе был использован лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 500 мВт. Все эксперименталь-

ные исследования проводились при комнатной температуре.

Проявления нефрита

Нефрит на Баженовском месторождении обнаружен в действующем карьере комбината ОАО «Урал-асбест» на Центральном и Южном участках. Нефрит слагает тела на контакте родингитизированного мелкозернистого габбро и серпентинита.

На Центральном участке нефрит встречен в западном борту. Изучен крупный блок размером 1 × 1,5 м, сложенный яблочно-зеленым нефритом (рис. 2). Текстура массивная. Иногда в нефрите наблюдаются небольшие пустоты с кристаллами тремолита, реже развит пренит. На контакте нефритовых тел с серпентинитами развивается тальк. Со стороны габбро обычно субпараллельно нефритовым телам прослеживаются кварцевые жилы. На контакте блока нефрита с габбро находится ярко-зеленая непросвечивающая тремолитовая порода с включениями рудных минералов мощностью 15 см. Контакт между всеми породами четкий, тектонизированный. Простираие блока 200° на юго-запад, падение 260–270° на запад, угол падения 70°. Зона нефрита прослежена на 35 м вверх по борту карьера.

На Южном участке выходы нефрита также находятся в западном борту. Нефрит зеленовато-серый. Тело нефрита мощностью 20–30 см отмечается на контакте габбро и серпентинита (см. рис. 3).

Состав и свойства нефрита

Окраска нефрита однородная до неоднородной синевато-зеленая (см. рис. 4) до яблочно-зеленой, шпинатно-зеленой, серовато-зеленой, светло-зеленой, белесой. Иногда отмечаются пятна до 5 мм, прожилки мощностью до 2 мм, линзочки длиной 4–8 мм яркого шпинатно-зеленого или, наоборот, светло-зеленого цвета. Текстура – массивная, пятнистая и полосчатая. Блочность зависит от карьерных буровзрывных пород и составляет от 5 см до 2 м.

Как нефрит (см. рис. 5), так и промежуточная тремолитовая порода (см. рис. 6) сложены в основном тремолитом (65–75 %, реже более 80 %, табл. 2). Кристаллохимическая формула тремолита нефрита $(\text{Ca}_{2,00-2,03}\text{Na}_{0,01-0,02})_{2,01-2,04}(\text{Mg}_{4,47-4,58}\text{Fe}_{0,35-0,40}\text{Cr}_{0,02-0,05}\text{Mn}_{0,01})_{4,89-4,99}[(\text{Si}_{7,92-8,00}\text{Al}_{0,03-0,09})_{8,00-8,05}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$. Тремолит промежуточной породы содержит больше железа (вплоть до актинолита), хрома и других примесей $(\text{Ca}_{1,95-2,03}\text{Na}_{0,01-0,03})_{1,97-2,04}(\text{Mg}_{4,17-4,35}\text{Fe}_{0,54-0,68}\text{Cr}_{0,03-0,08}\text{Ni}_{\leq 0,01}\text{Mn}_{0,01-0,02}\text{Ti}_{\leq 0,01})_{4,87}[(\text{Si}_{7,92-8,01}\text{Al}_{0,5-0,10})_{8,00-8,07}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$. Минерал образует фибробластовую спутано-волокнистую, местами порфиробластовую сно-

повидную структуру, волокна 0,06–0,138 мм в длину. Кроме того, отмечается антигорит, иногда образующий мелкочешуйчатые агрегаты, его содержание может достигать 25–35 %. Отмечен тальк. Встречаются реликто-

вые зерна клинопироксена с неровными корродированными границами зерен, средний размер 0,085×0,035 мм. Отмечены полные или частичные псевдоморфозы амфибола и серпентина по клинопироксену.

Пределы обнаружения элементов в минералах нефрита, мас. %

Detection limits of elements in minerals of nephrite, wt. %

Таблица 1

Table 1

Элементы	Хромит	Амфибол, гранат	Элемент	Арсениды
Si	0,05	0,03	Ag	0,25
Ti	0,05	0,05	S	0,05
Al	0,03	0,02	As	0,12
Cr	0,12	0,08	Hg	0,26
V	0,04	–	Pb	0,42
Mn	0,10	0,08	Cu	0,14
Mg	0,02	0,02	Au	0,29
Ca	0,02	0,03	Bi	0,27
Na	0,05	0,03	Sb	0,09
K	0,02	0,02	Cd	0,14
Fe	0,12	0,09	Fe	0,06
Ni	0,08	0,07	Ni	0,10
Co	0,15	–	Co	0,08
Zn	0,21	–	Zn	0,16

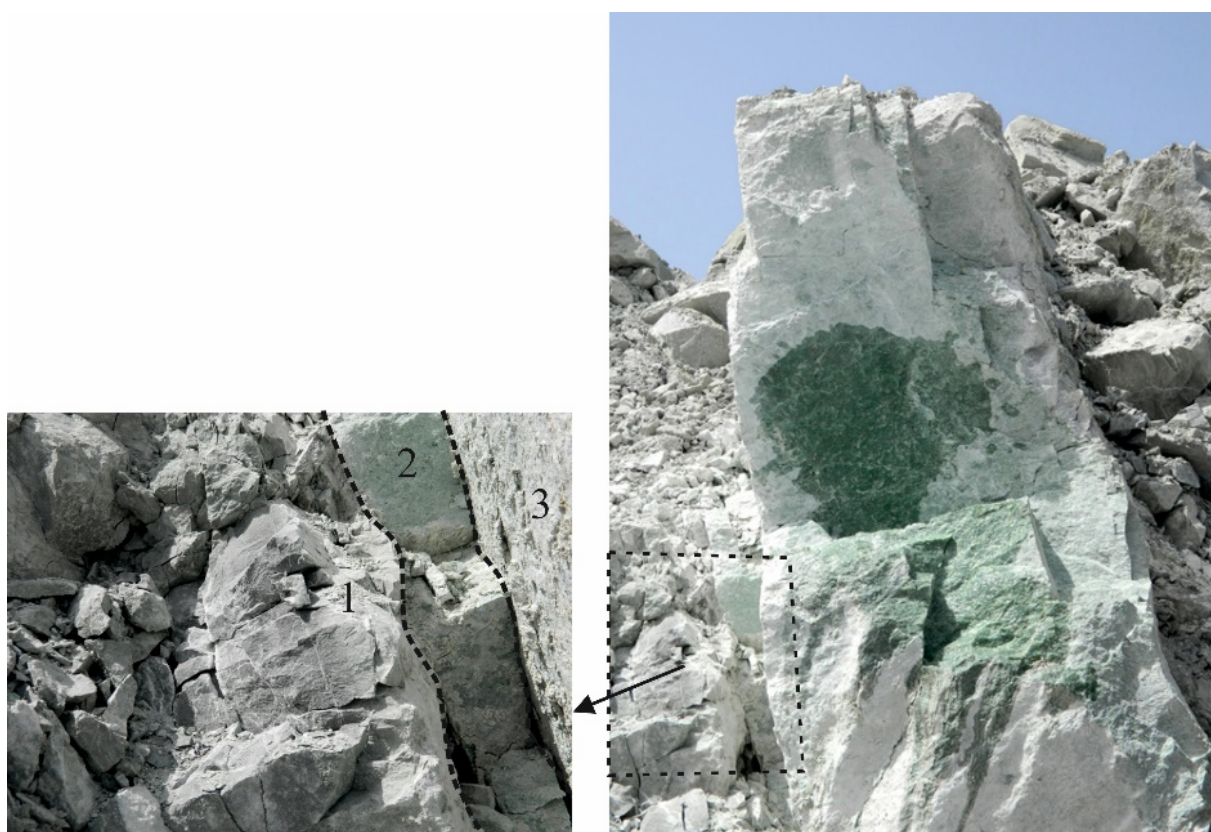


Рис. 2. Блок нефрита на Центральном участке

Слева – нижняя левая часть блока: контакт габбро (1), промежуточной породы мощностью 15 см (2) и нефрита – блок размером 1 × 1,5 м (3). Центральная часть блока смочена водой. Автор фото М.П. Попов

Fig. 2. Block of nephrite in the Central section

Left – lower left part of the block: contact of gabbro (1), intermediate rock with thickness 15 cm (2) and nephrite block by size 1 × 1,5 m (3). The central part of the block is wetted with water. Photo by M.P. Popov



Рис. 3. Блок нефрита на Южном участке

В верхней части – габбро (1), в нижней – серпентинит (3), между ними нефрит мощностью 20–30 см (2). Центральная часть блока смочена водой. Фото М.П. Попова

Fig. 3. Block of nephrite in the South section

In the upper part – gabbro (1), in the lower – serpentinite (3), between them is a nephrite with thickness 20–30 cm (2). The central part of the block is wetted with water. Photo by M.P. Popov

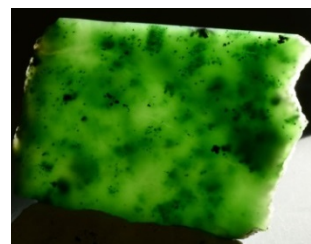


Рис. 4. Полированный образец нефрита

Пластина 8 × 5 см. Южный карьер. Образец А.Б. Лоскутова и Е.А. Новгородовой, фото М.Б. Лейбова [Ерохин, 2017]

Fig. 4. Polished nephrite sample

Plate 8 × 5 cm. South quarry. Sample of A.B. Loskutov and E.A. Novgorodova, photo by M.B. Leibov [Erokhin, 2017]



Рис. 5. Образец нефрита ОВ-2

Яблочно-зеленый с линзочками светло-зеленого цвета длиной 4–8 мм, вкрапленниками хромита размером 0,2–0,6 мм и включениями никелина размером менее 0,1 мм. Размер образца 16 × 16 см

Fig. 5. Sample of nephrite OV-2

Apple green with light green lenses 4–8 mm long, chromite grains 0.2–0.6 mm in size and nickelin inclusions less than 0.1 mm in size. Sample size is 16 × 16 cm



Рис. 6. Образец тремолитовой промежуточной породы ОВ-3

Порода яблочно-зеленого цвета с ярко-зелеными линзами 2–7 мм в длину и 2–5 мм в ширину, вкрапленниками хромита размером 0,2–0,6 мм и ярко-зелеными включениями хромистого гроссуляра до 1 мм

Fig. 6. Sample of tremolite intermediate rock OV-3

The rock is apple-green in color with bright green lenses 2–7 mm long and 2–5 mm wide, chromite grains 0.2–0.6 mm in size and bright green inclusions of chromium grossular up to 1 mm

Таблица 2

Химический состав тремолита, мас. %

Table 2

Chemical composition of tremolite, wt. %

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	56,82	–	0,53	0,40	–	3,01	0,10	21,97	13,62	0,05	–	96,50
2	57,81	–	0,29	0,28	0,10	2,95	–	22,33	13,65	–	0,02	97,43
3	57,82	–	0,26	0,44	0,10	3,01	0,08	22,17	13,55	0,06	–	97,49
4	57,63	–	0,18	0,32	0,07	3,37	0,11	22,07	13,61	–	–	97,36
5	57,74	–	0,37	0,36	0,08	3,30	–	21,88	13,58	0,05	–	97,36
6	57,88	–	0,37	0,37	0,07	3,42	0,20	21,79	13,58	0,03	–	97,71
7	57,34	–	0,24	0,18	0,10	3,35	0,10	22,06	13,54	0,03	–	96,94
8	57,59	–	0,25	0,23	0,09	3,49	0,09	21,73	13,66	–	–	97,13
9	57,88	–	0,29	0,26	0,10	3,18	–	21,72	13,64	–	–	97,07
10	57,47	–	0,40	0,34	–	5,06	–	20,35	13,41	0,05	–	97,08
11	57,35	–	0,41	0,71	0,07	4,80	0,12	20,51	13,50	0,07	–	97,54
12	56,63	0,05	0,58	0,49	0,07	5,55	–	20,25	13,43	0,11	–	97,16
13	57,68	–	0,38	0,40	–	5,82	0,10	20,14	13,09	0,06	–	97,67

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
14	56,72	–	0,48	0,47	0,11	5,20	0,15	20,64	13,31	0,08	–	97,16
15	56,88	0,06	0,30	0,33	0,12	5,27	0,10	20,63	13,53	0,04	–	97,26
16	56,89	–	0,48	0,35	0,07	4,75	0,15	20,90	13,51	0,07	–	97,17
17	57,39	–	0,43	0,26	–	4,65	0,10	21,01	13,52	0,05	0,02	97,43
18	57,10	–	0,34	0,37	0,11	4,97	0,15	20,58	13,42	0,05	–	97,09

Формульные единицы в расчете на 23 атома кислорода

1	7,92	–	0,09	0,04	–	0,35	0,01	4,56	2,03	0,01	–	15,01
2	7,96	–	0,05	0,03	0,01	0,34	–	4,58	2,01	–	–	14,98
3	7,97	–	0,04	0,05	0,01	0,35	0,01	4,55	2,00	0,02	–	15,00
4	7,97	–	0,03	0,03	0,01	0,39	0,01	4,55	2,02	–	–	15,01
5	7,97	–	0,06	0,04	0,01	0,38	–	4,50	2,01	0,01	–	14,98
6	7,97	–	0,06	0,04	0,01	0,39	0,02	4,47	2,00	0,01	–	14,97
7	7,96	–	0,04	0,02	0,01	0,39	0,01	4,56	2,01	0,01	–	15,01
8	7,98	–	0,04	0,03	0,01	0,40	0,01	4,49	2,03	–	–	14,99
9	8,00	–	0,05	0,03	0,01	0,37	–	4,47	2,02	–	–	14,95
10	8,00	–	0,07	0,04	–	0,59	–	4,22	2,00	0,01	–	14,93
11	7,97	–	0,07	0,08	0,01	0,56	0,01	4,25	2,01	0,02	–	14,98
12	7,92	0,01	0,10	0,05	0,01	0,65	–	4,22	2,01	0,03	–	15,00
13	8,01	–	0,06	0,04	–	0,68	0,01	4,17	1,95	0,02	–	14,94
14	7,93	–	0,08	0,05	0,01	0,61	0,02	4,30	1,99	0,02	–	15,01
15	7,95	0,01	0,05	0,04	0,01	0,62	0,01	4,29	2,03	0,01	–	15,02
16	7,93	–	0,08	0,04	0,01	0,55	0,02	4,34	2,02	0,02	–	15,01
17	7,97	–	0,07	0,03	–	0,54	0,01	4,35	2,01	0,01	–	14,99
18	7,97	–	0,06	0,04	0,01	0,58	0,02	4,28	2,01	0,01	–	14,98

Примечание. 1–9 – нефрит ОБ-2, 10–18 – тремолитовая порода ОБ-3. Прочерк – ниже предела обнаружения. Здесь и в табл. 3–6 анализы минералов выполнены на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100.

Note. 1–9 – OB-2 nephrite, 10–18 – OB-3 tremolite rock. A dash means below the detection limit. Here and in tables 3–6, analyzes of minerals were performed on a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer.

Характерный минерал нефрита и промежуточной тремолитовой породы Баженовского месторождения – хромит, составляющий 3–5 % породы. Минерал образует равномерно распределенные раздробленные и резорбированные мелкие (0,2–2,0 мм) зерна буровато-черного цвета с четкими границами, по трещинам которых развиваетсяgrossуляр. Раздробленные зерна меньшего размера образуют линейные структуры. Микроскопические выделения более светлого бурого цвета, что объясняется их размером, распределены равномерно. Белесые участки не содержат вкрапленников хромита. Для хромита характерны повышенные содержания марганца (в нефрите 1,89–2,15 мас. % MnO, в промежуточной тремолитовой породе 1,23–1,91 мас. %) и цинка (1,57–2,25 мас. % ZnO в нефрите, 2,85–3,54 мас. % в промежуточной тремолитовой породе, табл. 3). При неоднородном распределении марганца и цинка повышенные их содержания отмечаются в краевых частях зерен. Содержания титана и никеля незначительные. Кристаллохимическая формула хромита нефрита $(\text{Fe}_{0,82-0,85}\text{Mn}_{0,06-0,07}\text{Zn}_{0,04-0,06}\text{Mg}_{0,01-0,03}\text{Ca}_{\leq 0,02})_{0,97-0,99}(\text{Cr}_{1,45-1,65}$

$\text{Fe}^{3+}_{0,34-0,51}\text{Al}_{\leq 0,05}\text{V}_{0,01}\text{Si}_{\leq 0,01}\text{Ti}_{\leq 0,01})_{2,01-2,03}\text{O}_4$, а хромита тремолитовой породы – $(\text{Fe}_{0,77-0,82}\text{Zn}_{0,07-0,10}\text{Mn}_{0,04-0,06}\text{Mg}_{0,01}\text{Ca}_{0,01-0,02})_{0,95-0,97}(\text{Cr}_{1,48-1,69}\text{Fe}^{3+}_{0,33-0,54}\text{Al}_{\leq 0,01}\text{V}_{0,01}\text{Ti}_{\leq 0,01})_{2,04-2,05}\text{O}_4$.

С одной стороны, состав хромита нефрита и промежуточной тремолитовой породы существенно отличается от состава хромита хромититов (0,27–0,34 мас. % MnO и 0,19–0,24 мас. % ZnO) и метасоматически измененных хромититов (0,80–0,93 мас. % MnO и 0,30–0,40 мас. % ZnO) Баженовского месторождения [Ерохин, 2006]. Последние отличаются зеленой слюистой оторочкой и развитием хромсодержащего турмалина, хризоберилла, мариинскита, а также эсколаита [Ерохин и др., 2014]. С другой стороны, хромит нефритов Баженовского месторождения близок по содержанию этих элементов к хромиту нефритов других месторождений, например, к низкохромистому феррихромиту Джидинского нефритового района с 1,46–3,23 мас. % MnO и 0,09–7,93 мас. % ZnO и Оспинского месторождения с 0,34–2,02 мас. % MnO и до 5,10 мас. % ZnO [Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015]. Концентрации ванадия, равномерные по всем зернам, в целом значительно выше, чем в хромитах Джидинско-

го нефритоносного района и Оспинского месторождения [Сутурин Замалетдинов, Секерина, 2015].

Хромит Баженовского месторождения катаклазирован. Его зерна замещаются и обрастают мелкозернистым хромистымgrossуляром, составляющим до 5 % объема породы (рис. 7). Минерал имеет ярко-зеленый цвет и образует в нефрите ореолы более насыщенного синевато-зеленого цвета. Содержание Cr_2O_3 5,92–11,53 % (табл. 4), причем наиболее хро-

мистые фазы grossуляра отмечаются на контакте с хромитом. Кристаллохимическая формула граната следующая – $(\text{Ca}_{2,87-3,03}\text{Mn}_{0,02-0,10}\text{Fe}_{\leq 0,03}\text{Mg}_{\leq 0,04})_{3,00-3,06}(\text{Al}_{1,17-1,46}\text{Cr}_{0,44-0,72}\text{Fe}^{3+}_{0,10-0,14})_{2,00-2,05}[(\text{Si}_{2,92-2,97}\text{Ti}_{0,01-0,05}\text{Al}_{\leq 0,05})_{2,99-3,02}\text{O}_{12}]$. Если пересчитать формулу на минералы, то grossуляр содержит значимое количество уваровита (до 36 %), а также немного андрадита (до 7 %), спессартина (до 3 %), пиропы (до 1 %) и альмандина (до 1 %).

Таблица 3

Химический состав хромита, мас. %

Table 3

Chemical composition of chromite, wt. %

№ анализа	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	V_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	ZnO	Сумма
1	0,22	0,10	0,48	54,77	0,28	11,88	26,03	2,00	0,49	0,07	1,96	98,28
2	0,34	0,05	0,31	54,96	0,21	13,13	27,00	2,11	0,67	–	1,58	100,36
3	–	0,20	0,43	50,62	0,24	18,29	27,17	2,15	0,37	–	1,66	101,13
4	–	0,12	0,24	53,92	0,24	14,24	27,10	1,98	0,31	0,02	1,57	99,74
5	–	0,12	0,10	53,98	0,27	14,38	26,98	2,10	0,25	0,04	1,63	99,85
6	–	0,07	1,14	49,26	0,25	18,33	26,74	1,89	0,51	0,21	1,72	100,12
7	–	0,12	0,11	55,71	0,29	12,63	27,02	2,13	0,26	0,03	1,60	98,90
8	–	0,08	0,28	54,52	0,23	14,04	26,65	2,07	0,45	0,03	1,72	100,09
9	0,15	0,15	0,48	55,52	0,27	11,98	25,98	2,08	0,59	–	2,06	99,26
10	–	0,11	0,15	50,63	0,24	19,41	26,00	1,88	0,09	0,06	2,88	101,14
11	–	0,12	0,10	55,60	0,26	13,31	25,11	1,49	0,08	0,16	3,38	99,61
12	–	0,17	0,89	54,64	0,23	13,27	25,07	1,65	0,10	0,11	3,38	99,51
13	–	0,09	0,08	55,03	0,23	14,54	25,92	1,82	0,09	0,01	2,85	100,66
14	–	0,22	0,24	56,25	0,27	12,35	25,40	1,69	0,09	0,08	3,20	99,79
15	–	0,17	0,15	55,73	0,27	12,78	24,87	1,70	0,09	0,07	3,36	99,19
16	–	0,11	0,29	56,56	0,26	11,49	25,53	1,23	0,18	0,22	3,04	98,91
17	–	0,21	0,11	51,73	0,27	16,94	26,03	1,72	0,13	0,07	2,67	99,88
18	–	0,14	0,28	53,75	0,29	14,81	24,33	1,91	0,12	0,12	3,54	99,29

Формульные единицы в расчете на четыре атома кислорода

1	0,01	–	0,02	1,64	0,01	0,34	0,82	0,06	0,03	0,01	0,05	2,99
2	0,01	–	0,01	1,61	0,01	0,37	0,84	0,07	0,04	–	0,04	3,00
3	–	0,01	0,02	1,48	0,01	0,50	0,84	0,07	0,02	–	0,05	3,00
4	–	–	0,01	1,60	0,01	0,40	0,85	0,06	0,02	–	0,04	2,99
5	–	–	–	1,60	0,01	0,41	0,85	0,07	0,01	–	0,05	3,00
6	–	–	0,05	1,45	0,01	0,51	0,83	0,06	0,03	0,02	0,05	3,01
7	–	–	0,01	1,65	0,01	0,36	0,84	0,07	0,02	–	0,04	3,00
8	–	–	0,01	1,61	0,01	0,39	0,83	0,07	0,03	–	0,05	3,00
9	0,01	–	0,02	1,64	0,01	0,34	0,82	0,07	0,03	–	0,06	3,00
10	–	–	0,01	1,48	0,01	0,54	0,80	0,06	0,01	0,01	0,08	3,00
11	–	–	–	1,65	0,01	0,38	0,79	0,05	0,01	0,02	0,09	3,00
12	–	0,01	0,04	1,62	0,01	0,37	0,79	0,05	0,01	0,01	0,09	3,00
13	–	–	–	1,62	0,01	0,41	0,81	0,06	0,01	–	0,08	3,00
14	–	0,01	0,01	1,66	0,01	0,35	0,80	0,05	0,01	0,01	0,09	3,00
15	–	0,01	0,01	1,66	0,01	0,36	0,79	0,05	0,01	0,01	0,09	3,00
16	–	–	0,01	1,69	0,01	0,33	0,81	0,04	0,01	0,02	0,08	3,00
17	–	0,01	0,01	1,53	0,01	0,48	0,82	0,05	0,01	0,01	0,07	3,00
18	–	–	0,01	1,60	0,01	0,42	0,77	0,06	0,01	0,01	0,10	2,99

Примечание. 1–9 – образец ОВ-2, 10–18 – образец ОВ-3. Трехвалентное железо рассчитано по стехиометрии минерала.

Note. 1–9 – sample ОВ-2, 10–18 – sample ОВ-3. Ferric iron is calculated from the stoichiometry of the mineral.

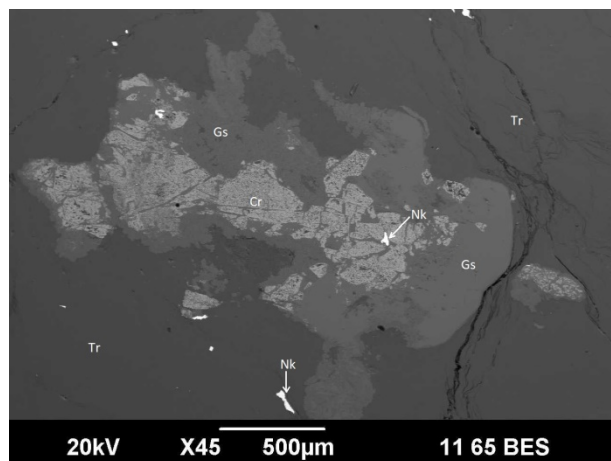


Рис. 7. Резорбированное зерно хромита (Cr) замещается и обрастает каймой хромистого гроссуляра (Gs) Никелин (Nk) как в хромите, так и среди тремолита (Tr)

Fig. 7. Resorbed chromite (Cr) grain is replaced and overgrown with a rim of chromium grossular (Gs). Nickeline (Nk) in both chromite and tremolite (Tr)

Таблица 4

Химический состав граната, мас. %

Table 4

Chemical composition of garnet, wt. %

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1	37,51	0,84	15,35	8,53	1,98	1,10	0,03	34,64	99,98
2	30,84	0,18	14,14	16,61	9,08	0,67	0,13	28,49	100,14
3	38,20	0,63	15,97	7,08	2,63	0,88	0,38	34,53	100,30
4	37,41	0,70	15,60	7,85	2,60	1,50	0,03	34,39	100,08
5	37,40	0,77	15,50	8,66	1,94	1,05	0,05	34,90	100,27
6	37,37	0,71	15,59	8,54	2,08	1,01	0,03	34,83	100,13
7	37,48	0,20	13,23	11,53	1,72	0,25	0,10	36,03	100,54
Формульные единицы в расчете на 12 атомов кислорода									
1	2,94	0,05	1,42	0,53	0,13	0,07	—	2,90	8,03
2	2,54	0,01	1,38	1,08	0,63	0,05	0,02	2,52	8,23
3	2,97	0,04	1,46	0,44	0,17	0,06	0,04	2,87	8,05
4	2,93	0,04	1,44	0,49	0,17	0,10	—	2,89	8,06
5	2,92	0,04	1,43	0,53	0,13	0,07	0,01	2,92	8,05
6	2,92	0,04	1,43	0,53	0,14	0,07	—	2,92	8,05
7	2,94	0,01	1,22	0,72	0,11	0,02	0,01	3,03	8,06

Примечания. Образец ОВ-03. Гроссуляры из оторочек вокруг хромита. Анализ 2 – уваровит из прожилка в хромите.

Notes. Sample ОВ-03. Grossular is from rims around chromite. Analysis 2 – uvarovite from a vein in chromite.

В хромите отмечены редкие прожилки уваровита. Кристаллохимическая формула граната следующая – $(\text{Ca}_{2,52}\text{Fe}_{0,46}\text{Mn}_{0,05}\text{Mg}_{0,02})_{3,05}(\text{Cr}_{1,08}\text{Al}_{0,88}\text{Fe}^{3+}_{0,17})_{2,13}[(\text{Si}_{2,54}\text{Al}_{0,50}\text{Ti}_{0,01})_{3,05}\text{O}_{12}]$, т.е. с преобладанием минала уваровита (до 54 %). Ранее уваровит отмечался в нефритах месторождения Фентиен на Тайване [Wan, Yeh, 1984], проявления Нырдовоменшор на Полярном Урале и месторождений Британской Колумбии, Канада [Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015]. Гранат, отвечающий по составу твердому раствору уваровит-гроссуляру отмечен в апосерпентинитовом нефрите месторождения Наславице в Польше [Gil et al., 2020]. Однако

опубликованные результаты анализа граната месторождения Фентиен соответствуют хромистому гроссуляру – в среднем 11,6 % Cr_2O_3 , максимальное содержание 12,86 %. Более высокий результат анализа ядра кристалла вызван загрязнением анализа хромитом, находящимся в центре кристалла хромистого гроссуляра – так называемый жабий глаз. Анализы уваровита из нефритов Нырдовоменшора и Британской Колумбии не опубликованы. В нефрите района Кутчо в Британской Колумбии [Jiang, Bai, Zhao, 2021] гранат определен как гроссуляр. Пока единственная достоверная находка уваровита в апосерпентинитовом нефрите с

месторождения Манас в Северном Тянь-Шане на севере Синцзян-Уйгурского автономного округа Китая зафиксирована недавно [Wang, Shi, 2021].

В нефритах, претерпевших перекристаллизацию вплоть до образования прожилков светло-серого цвета, хромит обрастает каймой хромистогоgrossуляра или переходит в цинксодержащий феррихромит [Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015]. В Баженовском месторождении проявились оба этих явления, дополненные появлением уваровита.

В нефрите и промежуточной тремолитовой породе рассеяны тонкие, менее 1 мм, зерна никелина и маухерита светло-желтого цвета с металлическим блеском. Единичные зерна никелина с примесью сурьмы до 7,24 мас. % (табл. 5) размером 0,05–0,12 мм встречаются как среди тремолита, так и в трещинах в зернах хромита (см. рис. 7). Кристаллохимическая формула никелина достаточно выдержанная – $(\text{Ni}_{0,94-0,98}\text{Co}_{0,01-0,04}\text{Fe}_{0,01-0,03})_{0,99-1,01}(\text{As}_{0,91-1,00}\text{Sb}_{0,01-0,08})_{0,99-1,01}$. Еще более тонкие зерна маухерита (табл. 6) распылены по матрице нефрита. Кристаллохимическая формула минерала следующая – $(\text{Ni}_{10,14-10,72}\text{Co}_{0,16-0,33}\text{Fe}_{0,05-0,50}\text{Cu}_{\leq 0,04})_{10,87-11,03}(\text{As}_{7,84-8,09}\text{Sb}_{0,01-0,09})_{7,94-8,12}$. Интересно, что маухерит из нефрита содержит меньше примесей. Ранее никелин и маухерит были отмечены в нефритах Миасского нефритоносного района [Архиреев, 2007], но их химический состав не опубликован.

В промежуточной породе изредка отмечаются чешуйки талька размером до 1 см, составляющие до 3–4 % объема породы. С тальком ассоциирует серпентин, отмечаются обособления буровато-желтоватых агрегатов, вероятно, продуктов замещения карбонатов.

Нефрит просвечивает на глубину от 0,5 до 2 см. В отдельных образцах развита интенсивная трещиноватость, еще реже проявлена рассланцованность. По параллельным трещинам отдельности развиты белые до желтоватых пленки низкотемпературного кальцита. Характер излома неровный, блеск жирный до матового, твердость по шкале Мооса 6–6,5.

Трещиноватость и пониженная блочность вызваны проведением буровзрывных работ в карьере. Нефрит принимает совершенную полировку с незначительной шагренью. На полированной поверхности выделяются прожилки. Некоторые из них имеют повышенный рельеф, другие, наоборот, идеальную зеркальную поверхность (рис. 8). Нефрит отвечает требованиям, предъявляемым к поделочному камню, соответствует поделочному нефриту II сорта с выходом 50 % [Камни..., 1990].

Химический состав нефрита Баженовского месторождения (табл. 7) аналогичен составу апоультрамафитового нефрита известных месторождений [Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015].

Химический состав никелина, мас. %

Таблица 5

Table 5

Chemical composition of nickeline, wt. %

№ анализа	Ni	Co	Fe	S	As	Sb	Сумма
1	41,59	0,60	1,12	0,06	55,02	0,92	99,31
2	42,09	0,61	0,80	–	54,37	1,18	99,05
3	42,72	0,60	0,65	–	54,87	1,08	99,92
4	42,16	0,75	0,38	–	55,07	0,83	99,19
5	42,18	0,73	0,67	–	54,66	1,19	99,43
6	41,65	0,74	0,57	–	55,08	1,13	99,17
7	43,09	0,80	0,27	–	54,35	0,86	99,37
8	41,82	0,60	0,35	–	55,65	0,90	99,32
9	40,67	1,79	0,31	–	49,40	7,24	99,41
10	41,72	1,19	0,46	–	55,01	0,60	98,98
11	41,41	1,18	0,54	–	55,79	0,55	99,47
12	42,20	1,33	0,41	–	54,77	0,58	99,29
13	42,34	1,29	0,24	–	54,81	0,52	99,20
14	40,95	1,20	1,30	–	55,19	0,52	99,16
15	41,60	1,27	0,88	–	54,95	0,53	99,23
16	42,49	1,35	0,25	–	54,42	0,47	98,98
Формульные единицы в расчете на два атома							
1	0,96	0,01	0,03	–	0,99	0,01	1,99
2	0,97	0,01	0,02	–	0,98	0,02	2,00
3	0,98	0,01	0,02	–	0,98	0,01	2,00
4	0,97	0,02	0,01	–	0,99	0,01	2,00
5	0,97	0,02	0,02	–	0,98	0,01	2,00
6	0,96	0,02	0,01	–	1,00	0,01	2,00
7	0,98	0,02	0,01	–	0,98	0,01	2,00
8	0,96	0,02	0,01	–	1,00	0,01	2,00
9	0,96	0,04	0,01	–	0,91	0,08	2,00

№ анализа	Ni	Co	Fe	S	As	Sb	Сумма
10	0,96	0,03	0,01	–	0,99	0,01	2,00
11	0,95	0,03	0,01	–	1,00	0,01	2,00
12	0,97	0,03	0,01	–	0,98	0,01	2,00
13	0,97	0,03	0,01	–	0,98	0,01	2,00
14	0,94	0,03	0,03	–	0,99	0,01	2,00
15	0,95	0,03	0,02	–	0,99	0,01	2,00
16	0,97	0,03	0,01	–	0,98	0,01	2,00

Примечание. 1–8 – образец ОВ-2; 9–16 – образец ОВ-3.

Note. 1–8 – sample ОВ-2; 9–16 – sample ОВ-3.

Таблица 6

Химический состав маухерита, мас. %

Table 6

Chemical composition of maucherite, wt. %

№ анализа	Ni	Co	Fe	Cu	As	Sb	Сумма
1	49,67	0,89	0,62	–	48,47	0,18	99,83
2	50,41	1,24	0,53	–	48,33	0,13	100,64
3	49,59	0,72	0,51	–	47,58	0,91	99,31
4	49,40	1,12	0,56	–	47,92	0,72	99,72
5	49,41	1,10	0,53	–	48,08	0,54	99,66
6	49,04	1,11	0,74	–	48,53	0,15	99,57
7	48,92	1,01	0,60	–	47,83	0,88	99,24
8	49,99	1,01	0,23	–	46,96	0,82	99,01
9	50,10	1,10	0,34	–	46,81	0,87	99,22
10	47,70	1,54	1,70	0,16	47,85	0,33	99,28
11	47,53	1,34	2,21	0,22	47,84	0,40	99,54

Формульные единицы в расчете на 19 атомов

1	10,57	0,19	0,14	–	8,08	0,02	19,00
2	10,63	0,26	0,12	–	7,98	0,01	19,00
3	10,62	0,16	0,12	–	7,98	0,09	18,99
4	10,53	0,24	0,13	–	8,00	0,07	18,97
5	10,54	0,23	0,12	–	8,04	0,06	18,99
6	10,46	0,24	0,17	–	8,09	0,02	18,98
7	10,51	0,22	0,14	–	8,04	0,09	19,00
8	10,72	0,22	0,05	–	7,89	0,08	18,96
9	10,72	0,23	0,08	–	7,84	0,09	18,96
10	10,20	0,33	0,38	0,03	8,02	0,03	18,99
11	10,14	0,29	0,50	0,04	7,99	0,04	19,00

Примечание. 1–9 – образец ОВ-2, 10, 11 – образец ОВ-3.

Note. 1–9 – sample ОВ-2; 10, 11 – sample ОВ-3.



Рис. 8. Шар из нефрита Баженовского месторождения, диаметр 5 см

Fig. 8. Ball of nephrite from the Bazhenov deposit, diameter 5 cm

Таблица 7

Химический состав нефрита, серпентинита и промежуточной тремолитовой породы, мас. %

Table 7

Chemical composition of nephrite, serpentinite and intermediate tremolite rock, wt. %

№ образца	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ	MnO	MgO	CaO	NiO	As ₂ O ₃	П.п.п.	Сумма
OB2	58,07	0,45	0,12	3,32	0,10	23,12	12,25	0,14	0,07	2,40	100,04
OB3	58,22	0,32	0,33	4,47	0,11	22,27	12,05	0,13	0,12	2,10	100,12
OB4	58,49	0,39	0,08	3,48	0,10	23,05	12,04	0,13	0,04	2,20	100,00
OB5	58,15	0,27	0,14	3,96	0,11	22,58	12,19	0,07	0,10	2,50	100,07

Примечание. OB-2, OB-4, OB-5 – нефрит, OB-3 – промежуточная тремолитовая порода. Анализ выполнен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на приборе XRF 1800.

Note. OB-2, OB-4, OB-5 – nephrite, OB-3 – intermediate tremolite rock. The analysis was carried out by X-ray spectral fluorescence on an XRF 1800 instrument.

Природа окраски и кристаллохимические особенности

В кристаллической решетке тремолита участвуют двойные цепочки кремнекислородных тетраэдров [Si₄O₁₁]⁶⁻ с самостоятельным анионом [OH]⁻, которые чередуются с лентами катионных полиэдров, главным образом октаэдров.

В структуре тремолита катионные позиции M1, M2, M3 октаэдрические, а позиция M4 характеризуется восьмерной координацией [Бахтин, 1985; Киевленко, 2000].

Общая особенность оптических спектров поглощения нефритов Баженовского месторождения – наличие широкой полосы поглощения в ближней инфракрасной области в районе 990 нм (рис. 9).

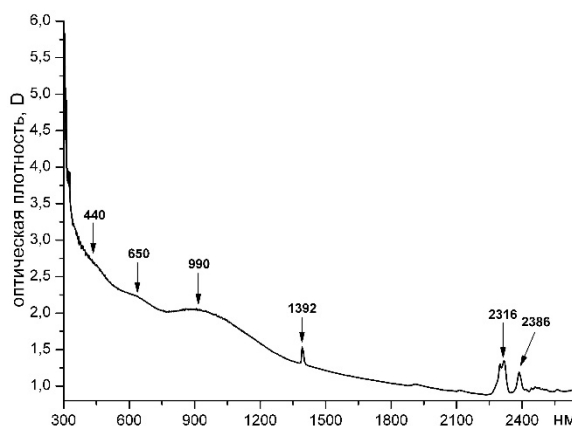


Рис. 9. Оптический спектр поглощения нефрита из Баженовского месторождения

Fig. 9. Optical absorption spectrum of nephrite from the Bazhenov deposit

При исследовании конфигурации этой линии и результатов химических анализов нефрита было выявлено, что эта полоса связана со спин-разрешенными переходами $^5T_2(^5D) \rightarrow ^5E(^5D)$ в ионах Fe²⁺ в позициях M1, M2, M3, которые замещают Mg²⁺. Полосы поглощения на длинах волны 440 и 650 нм связаны с ионами Cr³⁺, которые также изоморфно замещают ионы Mg²⁺ в октаэдрических позициях. Полосы поглощения в районе 440 и 650 нм в спектре изучаемого нефрита обусловлены разрешенными по спину переходами из основного состояния $^4A_{2g}(^4F)$ на более

высокие энергетические уровни $^4T_{1g}(^4F)$ и $^4T_{2g}(^4F)$ соответственно [Свиридов, Свиридова, Смирнов, 1976; Платонов, Таран, Балицкий, 1984].

Узкие полосы поглощения на длине волны 2316 и 2386 нм связаны с колебаниями OH- группы в структуре тремолита, а линия поглощения 1392 нм – первый обертоном основных колебаний OH- групп [Бахтин, 1985].

По результатам интерпретации оптических спектров поглощения нефритов был проведен расчет координат цветности по международной колориметрической системе МКО-1931. Цветовые координаты

доминирующей длины волны основного цветового тона составили $\lambda = 576\text{--}578,2$ нм, а величина насыщенности основного цветового тона изменялась в пределах 34,4–54,29 %.

Линии в спектрах комбинационного рассеяния нефрита Баженовского месторождения соответствуют тремолиту с повышенным содержанием железа [Орлов, Вигасина, Успенская, 2007]. Данный метод позволяет выявить изоморфную примесь двухвалентного железа по появлению дополнительных линий (ОН)⁻ колебаний в районе $3\ 600\text{--}3\ 700\text{ см}^{-1}$.

Нефриты с одинаковыми оттенками могут иметь разные диапазоны цветовой насыщенности и интенсивности цветового тона. Поэтому определение цвета невооруженным глазом может быть проблематичным. Основной хромофор, с которым связана окраска нефрита, — ионы Fe^{2+} . Изоморфизм $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$ в кристаллической структуре тремолита приводит к изменению интенсивности и положения линий ОН-колебаний в инфракрасном диапазоне в районе $3\ 600\text{--}3\ 700\text{ см}^{-1}$, что можно использовать для оценки состава нефрита и особенностей его

окраски [Burns, 1966; Плюснина, 1972]. Существует методика определения содержания ионов Mg^{2+} и Fe^{2+} в кристаллической структуре тремолита по соотношению интенсивности различных линий, связанных с колебаниями ОН⁻ групп [Feng et al., 2017]. По этой методике коэффициент отношения линий на длинах волн $3\ 646$, $3\ 662$ и $3\ 675\text{ см}^{-1}$ ОН⁻ колебаний около 1 свойственно белому нефриту, $0,98\text{--}1$ — светло-зеленому, $0,90\text{--}0,98$ — голубовато-зеленому, ниже $0,91$ — ярко-зеленому. Расчет относительных коэффициентов интенсивности колебаний позволяет стандартизировать определение цвета нефрита, выявить и дать оценку дополнительных оттенков, которые присутствуют в окраске нефрита [Feng et al., 2017].

Интенсивность полос колебаний ОН⁻ групп которые связаны с примесью двухвалентного железа в нефрите Баженовского месторождения находятся в пределах $0,94\text{--}0,95$ (рис. 10). По полученным результатам КР-спектроскопии можно говорить о зеленой окраске нефрита Баженовского месторождения, которая связана исключительно с ионами Fe^{2+} .

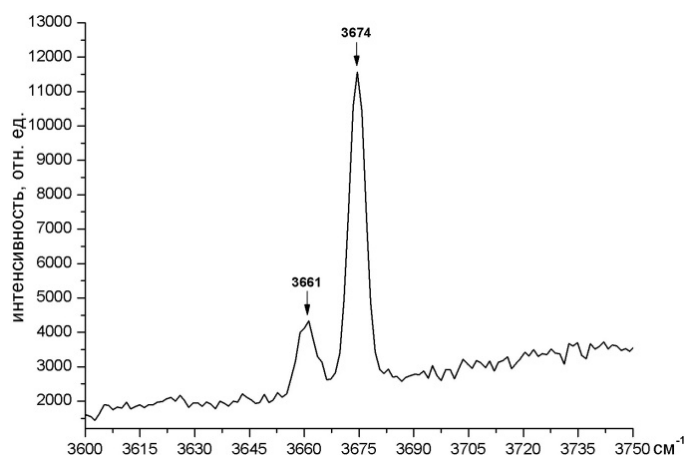


Рис. 10. Полосы колебаний ОН⁻ групп в нефрите в инфракрасном диапазоне длин волн $3\ 600\text{--}3\ 750\text{ см}^{-1}$

Fig. 10. Oscillation bands of ОН⁻ groups in nephrite in the infrared wavelength range $3\ 600\text{--}3\ 750\text{ см}^{-1}$

Тела апоультрамафитового нефрита, выявленные на Баженовском месторождении хризотил-асбеста, относятся к наиболее продуктивному генетическому типу — жилам в контакте апогаббровых родинитов с серпентинитами [Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015].

Традиционно считается, что апосерпентинитовый нефрит — типичная контактовая порода, формирующаяся в результате метасоматического замещения серпентинитов, реже других ультраосновных пород [Колесник, 1965; Harlow, Sorensen, 2005; Сутурин, Замалетдинов, Секерина, 2015]. Состав алюмосиликатных пород, к контакту которых с серпентинитами приурочены жилы нефрита, различен, чаще всего это дайки от кислого до основного состава. Метасо-

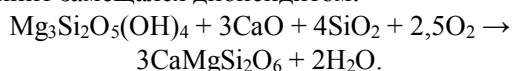
матическое происхождение при важной роли разломов показано для нефрита месторождения Манас в Синцзян-Уйгурском автономном районе Китая [Tang, Liu, Zhou, 2002], Йорданов в Польше [Gil et al., 2015], Агардакского в Туве [Мурзин и др., 2020] и других.

В то же время Колман [Coleman, 1977] связывал нефритообразование с высококальциевыми растворами, образующимися при серпентинизации лерцолитов. Так, Секерин [Секерин, 1982] посчитал, что происхождение такого флюида мантийное. Граниты также предполагаются как вероятный источник богатых кремнеземом флюидов из-за пространственной близости, высокого содержания кремнезема в гранитах, а также

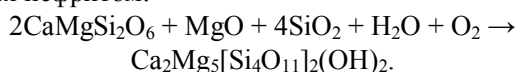
изотопных данных, прежде всего изотопного состава Sr [Harlow, Sorensen, 2005; Gil et al., 2015, 2020].

Другие исследователи наряду с признанием роли флюидов, образовавшихся при серпентинизации, большое внимание уделяют вкладу метаморфизма и считают, что апоультрамафитовый нефрит приурочен к зонам серпентинитового меланжа [Добрецов, Татаринцев, 1983; Prokhor, 1991]. Метасоматоз при участии флюидов метаморфического происхождения принят в отношении генезиса нефрита горы Огден, Британская Колумбия, Канада [Simandl, Riveros, Schiarizza, 1999], Южного острова Новой Зеландии [Adams, Beck, Campbell, 2007], Фентиев на Тайване [Yui et al., 2014], района Кутчо, Британская Колумбия, Канада [Jiang, Bai, Zhao, 2021].

Особенности взаимоотношения нефрита Баженовского месторождения с другими породами не противоречат этим утверждениям. Нефрит Баженовского месторождения находится на контакте серпентинитов с родингитизированным габбро, сопровождается промежуточной тремолитовой породой, что свидетельствует о его метасоматическом происхождении. В нефрите происходит метасоматическое замещение хромита хромистымgrossуляром. Очевидно, что в формирование нефрита внесли свой вклад флюиды, содержащие кальций и кремнезем. Судя по реликтам клинопироксена, формирование нефрита проходило в два этапа. На прогрессивном этапе серпентинит замещался диопсидитом:



А уже на регрессивном этапе диопсидит замещался нефритом:



Однако неясно, насколько интенсивно маломощные дайки габбро или плагиогранитов могли преобразовать серпентиниты – достаточно ли было флюида и термального воздействия. Да и их размещение контролируется разломами. Без учета тектонического стресса трудно объяснить появление скрытокристаллических спутанноволокнистых структур, соб-

ственно и определяющих нефрит в отличие от явнозернистого тремолитита.

Таким образом, в происхождении нефрита Баженовского месторождения сочетались тектонические и метасоматические процессы.

Заключение

На Баженовском месторождении хризотил-асбеста выявлены тела апоультрамафитового нефрита, относящиеся к наиболее продуктивному генетическому типу – жилам в контакте апогаббровых родингитов с серпентинитами. Окраска нефрита однородная до неоднородной, насыщенная зеленая до яблочно-зеленой, травяно-зеленой, шпинатно-зеленой, серовато-зеленой, светло-зеленой, белесой. Иногда отмечаются пятна, прожилки, линзочки яркого синева-зеленого или, наоборот, светло-зеленого цвета.

Нефрит состоит преимущественно из тремолита, хромит ухудшает качество поделочного камня, но его замещает хромистыйgrossуляр, придающий нефриту более яркую зеленую окраску. Качество нефрита снижает примесь серпентина и талька, трещиноватость из-за проведения буровзрывных работ. Особенность нефрита Баженовского месторождения – постоянное присутствие никелина, маухерита и уваровита. Зеленая окраска связана с ионами Fe^{2+} . Хромистыйgrossуляр, замещающий хромит, вызывает появление локальных ярких голубовато-зеленых пятен.

В происхождении нефрита Баженовского месторождения сочетались тектонические и метасоматические процессы. Формирование нефрита проходило в два этапа. На прогрессивном этапе серпентинит замещался диопсидитом $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3\text{CaO} + 4\text{SiO}_2 + 2,5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$. На регрессивном этапе диопсидит замещался нефритом $2\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{MgO} + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$.

Нефрит Баженовского месторождения отвечает требованиям, предъявляемым к поделочному камню.

Список источников

- Аеров Г.Д., Зарянов К.Б., Самсонов Я.П., Гильмутдинов Г.Х. Цветные камни в гипербазитах Казахстана // Геология, методы поисков, разведка и оценка месторождений ювелирных, поделочных и декоративно-облицовочных камней. М. : Всесоюзное 6-е производственное объединение при Министерстве геологии СССР, 1975. С. 16–18.
- Архиреев И.Е. Минеральный состав нефритов Факультетского и Придорожного проявлений Миасского района (Южный Урал) // Материалы V Всероссийского совещания «Минералогия Урала-2007» : сб. науч. ст. Миасс ; Екатеринбург : УрО РАН, 2007. С. 204–206.
- Архиреев И.Е., Масленников В.В., Макагонов Е.П., Кабанова Л.Я. Южно-Уральская нефритовая провинция // Разведка и охрана недр. 2011. № 3. С. 18–22.
- Баженовское месторождение хризотил-асбеста / ред. К.К. Золотов, Б.А. Попов. М. : Недра, 1985. 271 с.
- Бахтин А.И. Пороодообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1985. 192 с.
- Беляев Е.В., Антонов В.А., Полянин В.С., Щербакова Т.А., Мирошников К.Е. Новые виды минерального сырья Северного Кавказа // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016. № 6. С. 16–21.

- Гадиятов В.Г., Маршинцев В.К. Цветные камни Якутии и их месторождения. Екатеринбург : Банк культурной информации, 2000. 328 с.
- Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Гурбанова О.А., Попов С.В. Коллекционные минералы и поделочные камни в ультрабазитах и базитах Северного Кавказа // Вестник Владикавказского научного центра. 2018. Т. 18, № 2. С. 29–35.
- Горбунова Н.П., Татарникова Л.А., Кудякова В.С., Попов М.П. Волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр XRF-1800 (SHIMADZU, Япония): методика определения микропримесей в рубинах // Ежегодник-2014. Труды ИГГ УрО РАН. 2015. Вып. 162. С. 238–241.
- Гусев А.И. Геммология Алтая с основами геммотуризма : учеб. пособие для студ. вузов. Бийск : БПГУ им. В.М. Шукшина, 2007. 155 с.
- Добрецов Н.Л., Татарников А.Н. Жадеит и нефрит в офиолитах (на примере Западного Саяна). Новосибирск : Наука, 1983. 126 с.
- Ерохин Ю.В. Хромитовое оруденение Баженовского офиолитового комплекса (Средний Урал) // Литосфера. 2006. № 3. С. 160–165.
- Ерохин Ю.В. Минералогия родингитов Баженовского месторождения (Средний Урал) // Минералогический альманах. 2017. Т. 22, № 3. 136 с.
- Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Золосев К.К., Попов М.П., Григорьев В.В. Мариинскит из Баженовского офиолитового комплекса – вторая находка в мире // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455, № 4. С. 441–443.
- Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Иванов К.С. Раннесилурийский возраст даек плагиогранита из Баженовского офиолитового комплекса, Средний Урал (по данным Th-U-Pb-датирования монацита) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 3. С. 17–21.
- Ефимов В.И., Барабанов В.П. Условия формирования структуры Баженовского месторождения хризотил-асбеста и закономерности в размещении природных и промышленных типов руд // Записки Санкт-Петербургского горного института. 1997. Т. 143. С. 63–69.
- Зырянова Л.А., Чернышов А.И., Сенькин О.А., Трифонов В.А., Голубицкая И.Н. Декоративно-художественные и технологические свойства нефрита проявлений отрогов Катунского хребта (Горный Алтай) // Геммология : сб. ст. Томск : Томский ЦНТИ, 2006. С. 48–52.
- Казак А.П., Добрецов Н.Л., Молдаванцев Ю.Е. Глаукофановые сланцы, жадеиты, везувианиты и нефриты гипербазитового массива Рай-Из // Геология и геофизика. 1976. № 2. С. 60–66.
- Камни цветные природные в сырье. Технические условия ТУ 41-07-052-90. М. : Кварцсамоцветы, 1990. 28 с.
- Киевленко Е.Я. Геология самоцветов. М. : Земля, 2000. 582 с.
- Кислов Е.В. Развитие минерально-сырьевой базы нефрита Бурятии // Геммология : сб. ст. Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. С. 82–89.
- Кислов Е.В., Попов М.П., Нурмухаметов Ф.М. Кондиционность нефрита Нырдовоменшорского месторождения, Полярный Урал // Динамика и взаимодействие геосфер Земли : материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посв. 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2021. Т. I. С. 312–314.
- Колесник Ю.Н. Нефриты Сибири. Новосибирск : Наука, 1965. 149 с.
- Кротов Б.П. Петрографическое описание южной части Миасской дачи // Труды общества естествоиспытателей Казанского ун-та. 1915. Т. 47, вып. 1. 402 с.
- Крылова Г.И., Кокарев Г.Н., Смирнов А.А., Шуляева Л.Н. Проявления цветных камней в Куяльском массиве ультрамафитов // Вопросы оруденения в ультрамафитах. М. : Наука, 1985. С. 117–125.
- Лоскутов А.Б., Новгородова Е.А. Минералы. Баженовское месторождение хризотил-асбеста. Екатеринбург : Уральский рабочий, 2013. 340 с.
- Макагонов Е.П., Архиреев И.Е. Нефрит Урала // Геоархеология и археологическая минералогия. 2014. № 1. С. 15–19.
- Мамуровский А.А. Месторождение нефрита на горе Бикиляр. М. : Литосфера, 1918. 52 с.
- Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Варламов Д.А., Шанина С.Н. Золотоносные родингиты Агардакского массива гипербазитов (Ю. Тува, Россия) и проблемы их генезиса // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62, № 3. С. 224–246.
- Орлов Р.Ю., Вигасина М.Ф., Успенская М.Е. Спектры комбинационного рассеяния минералов. М. : ГЕОС, 2007. 142 с.
- Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С. Природа окраски самоцветов. М. : Недра, 1984. 196 с.
- Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1976. 175 с.
- Рычков В.М., Сенькин О.А., Рычкова С.И. Нефриты, родингиты, жадеиты Алтая и Сибири // Природные ресурсы Горного Алтая. Горно-Алтайск : ИП Высоцкая Г.Г., 2012. Вып. 1–2. С. 78–91.
- Свиридов Д.Т., Свиридова Р.К., Смирнов Ю.Ф. Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М. : Наука, 1976. 266 с.
- Секерин А.П. Петрология родингитов Саяно-Байкальской горной области // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262, № 1. С. 175–177.
- Спиридонов Э.М., Антонов А.А., Барсукова Н.С., Попель И.А., Рапопорт М.С., Соколов Ю.А. Минералогия родингитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста / ред. О.К. Иванов, Э.М. Спиридонов, В.Г. Кривовичев. Екатеринбург : Изд-во УГГА, 1996. 94 с.
- Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. Месторождения нефритов. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2015. 377 с.
- Худякова Л.И., Кислов Е.В., Палеев П.Л., Малышев А.В. Комплексное использование некондиционного нефрита // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 8. С. 68–76.
- Юшкин Н.П., Иванов О.К., Попов В.А. Введение в топоминералогия Урала. М. : Наука, 1986. 295 с.
- Adams C.J., Beck R.J., Campbell H.J. Characterization and origin of New Zealand nephrite jade using its strontium isotopic signature // Lithos. 2007. V. 97. P. 307–322.
- Burns R.G., Strens R.G.J. Infrared study of the hydroxyl bands in clinoamphiboles // Science. 1966. V. 153, № 3738. P. 890–892.

- Coleman R.G.** Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere? (Minerals and Rocks, vol. 12). Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1977. 229 p.
- Feng X., Zhang Y., Lu T., Zhang H.** Characterization of Mg and Fe Contents in Nephrite Using Raman Spectroscopy // *Gems & Gemology*. 2017. V. 53, No. 2. P. 204–212.
- Flint D.J., Dubowski E.A.** Cowell jade province: detailed geological mapping and diamond drilling of jade and ornamental marble outcrops, 1982–1987. Department of mines and energy of South Australia. Rept. Bk. No. 89/51. Dme No. 85/88. 1991. V. 2. 98 p.; V. 3. 26 p.; V. 4. 29 p.
- Gil G., Barnes J.D., Boschi C., Gunia P., Szakmany G., Bendo Z., Raczynski P., Peterdi B.** Origin of serpentinite-related nephrite from Jordanów and adjacent areas (SW Poland) and its comparison with selected nephrite occurrences // *Geological Quarterly*. 2015. V. 59, No. 3. P. 457–472.
- Gil G., Baginski B., Gunia P., Madej S., Sachanbinski M., Jokubauskas P., Belka Z.** Comparative Fe and Sr isotope study of nephrite deposits hosted in dolomitic marbles and serpentinites from the Sudetes, SW Poland: Implications for Fe-As-Au-bearing skarn formation and post-obduction evolution of the oceanic lithosphere // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 118. P. 103335.
- Jiang B., Bai F., Zhao J.** Mineralogical and geochemical characteristics of green nephrite from Kutcho, northern British Columbia, Canada // *Lithos*. 2021. V. 388, № 106030. doi: 10.1016/j.lithos.2021.106030
- Harlow G.E., Sorensen S.S.** Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: metasomatic connections // *Int. Geol. Rev.* 2005. V. 47. P. 113–146.
- Khudyakova L.I., Kislov E.V., Paleev P.L., Kotova I.Yu.** Nephrite-bearing mining waste as a promising mineral additive in the production of new cement types // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 394. doi: 10.3390/min10050394
- Kislov E.V.** Russian nephrite resources and related genesis study // *Proceedings of the China International Gems & Jewelry Academic Conference*. Abstract volume, Beijing, China, 19–23 October 2019. P. 211–213.
- Prokhor S.A.** The genesis of nephrite and emplacement of the nephrite-bearing ultramafic complexes of East Sayan // *International Geology Review*. 1991. V. 33. P. 290–300.
- Simandl G.J., Riveros C.P., Schiarizza P.** Nephrite (Jade) Deposits, Mount Ogden Area, Central British Columbia (NTS 093N 13W) // *British Columbia Geological Survey. Geological Fieldwork 1999, Paper 2000-1*. P. 339–347.
- Tang Y.L., Liu D.Q., Zhou R.H.** Geological characteristics of Manasi green jade in Xinjiang // *Acta Petrol. Mineral.* 2002. V. 9. P. 22–25 (In Chinese).
- Yui T.-F., Usuki T., Chen C.-Y., Ishida A., Sano Y., Suga K., Iizuka Y., Chen C.-T.** Dating thin zircon rims by NanoSIMS: the Fengtien nephrite (Taiwan) is the youngest jade on Earth // *International Geology Review*. 2014. V. 56, № 16. P. 1932–1944.
- Wan H.M., Yeh C.L.** Uvarovite and grossular from the Fengtien nephrite deposits, Eastern Taiwan // *Mineralogical Magazine*. 1984. V. 48, No. 346. P. 31–37.
- Wang J., Shi G.** Comparative Study on the Origin and Characteristics of Chinese (Manas) and Russian (East Sayan) Green Nephrites // *Minerals*. 2021. V. 11. 1434. <https://doi.org/10.3390/min11121434>
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh.** Black nephrite jade from Guangxi, Southern China // *Gems and Gemology*. 2019. V. 55, № 2. P. 198–215.

References

- Aerov G.D., Zaryanov K.B., Samsonov Ya.P., Gil'mutdinov G.Kh. *Tsvetnye kamni v giperbazitakh Kazakhstana* [Colored stones in the hyperbasites of Kazakhstan] // *Geologiya, metody poiskov, razvedka i otsenka mestorozhdeniy yuvelirnykh, podolochnykh i dekorativno-oblitsovochnykh kamney*. Moscow: All-Soyuz 6 proizvodstvennoe ob'edinenie pri Ministerstve geologii SSSR, 1975. pp. 16–18. In Russian.
- Arkhireev I.E. *Mineral'nyi sostav nefritov Fakul'tetskogo i Pridorozhnogo proyavleniy Miasskogo rayona (Yuzhnyi Ural)* [Mineral composition of nephrite from the Faculty and Roadside occurrences of the Miass region (South Urals)] // *Mineralogiya Urala-2007. Sbornik nauchnykh statey / Materialy V Vserossiyskogo soveshaniya*. Miass-Yekaterinburg: UrO RAN, 2007. pp. 204–206. In Russian.
- Arkhireev I.E., Maslennikov V.V., Makagonov E.P., Kabanova L.Ya. *Yuzhno-Ural'skaya nefritonosnaya provintsiya* [South Ural nephrite province] // *Razvedka i okhrana neдр*. 2011. No. 3. pp. 18–22. In Russian.
- Bazhenovskoe mestorozhdenie hrizotil-asbesta* [Bazhenov deposit of chrysotile-asbestos] / Red. K.K. Zoloev, B.A. Popov. Moscow: Nedra, 1985. 271 p. In Russian.
- Bakhtin A.I. *Porodoobrazuyushie silikaty: opticheskie spektry, kristallohimiya, zakonomernosti okraski, tipomorfizm* [Rock-forming silicates: optical spectra, crystal chemistry, color patterns, typomorphism]. Kazan: Izd. Kazanskogo un-ta, 1985. 192 p. In Russian.
- Belyaev E.V., Antonov V.A., Polyanin V.S., Sherbakova T.A., Miroshnikov K.E. *Novye tipy mineral'nogo syr'ya Severnogo Kavkaza* [New types of mineral raw materials of the North Caucasus] // *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2016. No. 6. pp. 16–21. In Russian.
- Gadiyatov V.G., Marshintsev V.K. *Tsvetnye kamni Yakutii i ih mestorozhdeniya* [Colored stones of Yakutia and their deposits]. Yekaterinburg: Bank Kul'turnoy informatsii, 2000. 328 p. In Russian.
- Gazeev V.M., Gurbanova A.G., Gurbanova O.A., Popov S.V. *Kollektsionnye mineraly i podolochnye kamni v ul'trabazitah I bazitah Severnogo Kavkaza* [Collectible minerals and ornamental stones in ultrabasites and basites of the North Caucasus] // *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Centre*. 2018. V. 18, No. 2. pp. 29–35.
- Gorbunova N.P., Tatarinova L.A., Kudyakova V.S., Popov M.P. *Volnovoy rentgenofluorescentnyi spektrometr XRF-1800 (SHIMADZU, Yaponiya): metodika opredeleniya mikroprimesey v rubinakh* [Wave X-ray fluorescence spectrometer XRF-1800 (SHIMADZU, Japan): method for determining trace impurities in rubies] // *Ezhegodnik-2014. Trudy IGG UrO RAN*. 2015. Vyp. 162. pp. 238–241. In Russian.
- Gusev A.I. *Gemmologiya Altaya s osnovami gemmoturizma: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Gemology of Altai with the basics of gemmotourism: a textbook for university students]. Biysk: BPGU im. V.M. Shukshina, 2007. 155 p.

- Dobretsov N.L., Tatarinov A.V. *Zhadeit i nefrit v ofiolitakh (na primere Zapadnogo Sayana)* [Jadeite and nephrite in ophiolites (the example of West Sayan)]. Novosibirsk: Nauka, 1983. 126 p. In Russian.
- Erokhin Yu.V. *Khromitovoe orudnenie Bazhenovskogo ofiolitovogo kompleksa (Sredniy Ural)* [Chromite mineralization of the Bazhenovsky ophiolite complex (the Middle Urals)] // *Litosfera*. 2006. No. 3. pp. 160–165. In Russian.
- Erokhin Yu.V. Bazhenovskoe Deposit (Central Urals, Russia): Mineralogy of Rodingites. *Mineralogical Almanac*. 2017. V. 22, Iss. 3. Moscow: Mineral-Almanac Ltd. 136 p.
- Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Zolov K.K., Popov M.P., Grigor'ev V.V. Mariinskite from the Bazhenovskii ophiolite complex: The second finds in the world // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 455, No. 2. pp. 408–410.
- Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Ivanov K.S. *Rannesiluriyskiy vozrast daek plagiogranita iz Bazhenovskogo ofiolitovogo kompleksa, Sredniy Ural (po dannym Th-U-Pb-datirovaniya monazita)* [Early Silurian age of dikes of plagiogranite from the Bazhenovskiy ophiolite complex, Middle Urals (according to Th-U-Pb dating of monazite)] // *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2018. No. 3. pp. 17–21. In Russian.
- Efimov V.I., Barabanov V.P. *Usloviya formirovaniya struktury Bazhenovskogo mestorozhdeniya khrizotil-asbesta I zakonomernosti v razmeshenii prirodnikh i promyshlennykh tipov rud* [Conditions for the formation of the structure of the Bazhenovskoe deposit of chrysotile-asbestos and patterns in the distribution of natural and industrial types of ores] // *Zapiski Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo gornogo institute*. 1997. T. 143. C. 63–69. In Russian.
- Zyryanova L.A., Chernyshov A.I., Senkin O.A., Trifonov V.A., Golubitskaya I.N. *Dekorativno-hudozhestvennye I tehnologicheskie svoystva nefrita proyavleniy otrogov Katunskogo hrebta (Gorniy Altay)* [Decorative, artistic and technological properties of nephrite localities of the spurs of the Katunsky ridge (Gorny Altai)] // *Gemmologiya: Sbornik statey*. Tomsk: FGU "Tomsk TsNTI", 2006. pp. 48–52. In Russian.
- Kazak A.P., Dobretsov N.L., Moldavantsev Yu.E. *Glaukofanovye slantsy, zhadeity, vezuvianity i nefrity giperbazitovogo massiva Ray-Iz* [Glaucofanous schists, jadeites, vesuvianites and nephrites of the Rai-Iz hyperbasite massif] // *Geologiya i geofizika*. 1976. No. 2. pp. 60–66. In Russian.
- Kamni tsvetnye prirodnye v syr'e. Tekhnicheskie usloviya TU 41-07-052-90*. [Colored natural stones in raw materials. Specifications TU 41-07-052-90]. Moscow: NPO «Kvartssamotsvety», 1990. 28 p.
- Kievlenko E.Ya. *Geologiya samotsvetov* [Geology of Gems]. Moscow: Zemlya, 2000. 582 p. In Russian.
- Kislov E.V. *Razvitie mineral'no-syr'evoy bazy nephrita Buryatii* [Development of the mineral resource base of nephrite in Buryatia] // *Gemmologiya: sbornik statey*. Tomsk: Izdatel'stvo TsNTI, 2017. pp. 82–89. In Russian.
- Kislov E.V., Popov M.P., Nurmukhametov F.M. *Konditsionnost' nefrita Nyrdvomenshorskogo mestorozhdeniya, Polyarniy Ural* [Conditionality of nephrite from the Nyrdvomenshore deposit, Polar Urals] // *Dinamika i vzaimodeystvie geosfer Zemli. Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashennoy 100-letiyu podgotovki v Tomskom gosudarstvennom universitete spetsialistov v oblasti nauk o Zemle. Tom I*. Tomsk: Izdatel'stvo TsNTI. 2021. pp. 312–314. In Russian.
- Kolesnik Yu.N. *Nefrity Sibiri* [Nephrites of Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 1965. 149 p. In Russian.
- Krotov B.P. *Petrograficheskoe opisanie yuzhnoy chasti Miasskoy dachi* [Petrographic description of the southern part of the Miass dacha] // *Proceedings of the Society of Naturalists of Kazan University*. 1915. V. 47, No 1. 402 p. In Russian.
- Krylova G.I., Kokarev G.N., Smirnov A.A., Shulyaeva L.N. *Proyavleniya tsvetnykh kamney v Kuyul'skom massive ul'tramafitov* [Localities of colored stones in the Kuyul massif of ultramafic rocks] // *Problemy orudneniya v ultramafitah*. Moscow: Nauka, 1985. pp. 117–125. In Russian.
- Loskutov A.B., Novgorodova E.A. *Mineraly. Bazhenovskoe mestorozhdenie khrizotil-asbesta*. [Minerals. Bazhenovskoye deposit of chrysotile-asbestos]. Yekaterinburg: OAO «IPP «Ural'skiy rabochiy», 2013. 340 p. In Russian.
- Makagonov E.P., Arkhireev I.E. *Nefrit Urala* [Nephrite of the Urals] // *Geoarcheology and archaeological mineralogy*, 2014. No. 1. pp. 15–19. In Russian.
- Mamurovskiy A.A. *Mestorozhdenie nefrita na gore Bikilyar* [Jade deposit on Mount Bikilyar]. Moscow: Litogea, 1918. 52 p. In Russian.
- Murzin V.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Shanina S.N. Gold-Bearing Rodingites of the Agardag Ultramafic Massif (South Tuva, Russia) and Problems of Their Genesis // *Geology of Ore Deposits*. 2020. V. 62, No. 3. pp. 204–224.
- Orlov R.Yu., Vigasina M.F., Uspenskaya M.E. *Spektry kombinatsionnogo rasseyaniya mineralov* [Raman spectra of minerals]. Moscow: GEOS, 2007. 142 p. In Russian.
- Platonov A.N., Taran M.N., Balitskiy V.S. *Priroda okraski samotsvetov* [The nature of the color of gems]. Moscow: Nedra, 1984. 196 p. In Russian.
- Plusnina I.I. *Infrakrasnye spektry mineralov* [Infrared spectra of minerals]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1976. 175 p. In Russian.
- Rychkov V.M., Sen'kin O.A., Rychkova S.I. *Nefrity, rodingity, zhadeity Altaya I Sibiri* [Nephrites, rodingites, jadeites of Altai and Siberia] // *Prirodnye resursy Gornogo Altaya. Vyp.1–2*. Gorno-Altaysk: IP Vysotskaya G.G., 2012. pp. 78–91. In Russian.
- Sviridov D.T., Sviridova R.K., Smirnov Yu.F. *Opticheskie spektry ionov perekhodnykh metallov v kristallakh* [Optical spectra of transition metal ions in crystals]. Moscow: Nauka, 1976. 266 p. In Russian.
- Sekerin A.P. *Petrologiya rodingitov Sayano-Baikal'skoy gornoy oblasti* [Petrology of rodingites of the Sayan-Baikalian mountain region] // *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1982. V. 262, No. 1. pp. 175–177. In Russian.
- Spiridonov E.M., Antonov A.A., Barsukova N.S., Popel' I.A., Rapoport M.S., Sokolov Yu.A. *Mineralogiya rodingitov Bazhenovskogo mestorozhdeniya khrizotil-asbesta* [Mineralogy of rodingites of the Bazhenovskoye chrysotile-asbestos deposit] / *Red. O.K. Ivanov, E.M. Spiridonov, V.G. Krivovichev*. Yekaterinburg: Izdatel'stvo UGGA, 1996. 94 p. In Russian.
- Sututrin A.N., Zamaletdinov R.S., Sekerina N.V. *Mestorozhdeniya nefritov* [Nephrite deposits]. Irkutsk: Izdatel'stvo IGU, 2015. 377 p. In Russian.
- Khudyakova L.I., Kislov E.V., Paleev P.L., Malyshev A.V. *Kompleksnoe ispol'zovanie nekonditsionnogo nefrita* [Comprehensive use of substandard nephrite] // *Bulletin of the Tomsk polytechnic university – geo assets engineering*. 2020. V. 331, No. 8. pp. 68–76. In Russian.

- Yushkin N.P., Ivanov O.K., Popov V.A. *Vvedenie v topomineralogiyu Urala*. [Introduction to Ural Topomineralogy]. Moscow: Nauka, 1986. 295 p. In Russian.
- Adams C.J., Beck R.J., Campbell H.J. Characterization and origin of New Zealand nephrite jade using its strontium isotopic signature // *Lithos*. 2007. V. 97. pp. 307–322.
- Burns R.G., Strens R.G.J. Infrared study of the hydroxyl bands in clinoamphiboles // *Science*. 1966. V. 153. No. 3738. pp. 890–892.
- Coleman R.G. *Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere?* (Minerals and Rocks, v. 12). Berlin, Heidelberg and New York: Springer-Verlag, 1977. 229 p.
- Feng X., Zhang Y., Lu T., Zhang H. Characterization of Mg and Fe Contents in Nephrite Using Raman Spectroscopy // *Gems & Gemology*. 2017. V. 53, No. 2. pp. 204–212.
- Flint D.J., Dubowski E.A. Cowell jade province: detailed geological mapping and diamond drilling of jade and ornamental marble outcrops, 1982–1987. Department of mines and energy of South Australia. Rept. Bk. No. 89/51. Dme No. 85/88. 1991. V. 2. 98 p. V. 3. 26 p.
- Gil G., Barnes J.D., Boschi C., Gunia P., Szakmany G., Bendo Z., Raczynski P., Peterdi B. Origin of serpentinite-related nephrite from Jordanów and adjacent areas (SW Poland) and its comparison with selected nephrite occurrences // *Geological Quarterly*. 2015. V. 59, No. 3. pp. 457–472.
- Gil G., Baginski B., Gunia P., Madej S., Sachanbinski M., Jokubauskas P., Belka Z. Comparative Fe and Sr isotope study of nephrite deposits hosted in dolomitic marbles and serpentinites from the Sudetes, SW Poland: Implications for Fe-As-Au-bearing skarn formation and post-obduction evolution of the oceanic lithosphere // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 118. 103335.
- Jiang B., Bai F., Zhao J. Mineralogical and geochemical characteristics of green nephrite from Kutcho, northern British Columbia, Canada // *Lithos*. 2021. V. 388. N 106030. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106030
- Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections // *Int. Geol. Rev.* 2005. V. 47. pp. 113–146.
- Khudyakova L.I., Kislov E.V., Paleev P.L., Kotova I.Yu. Nephrite-bearing mining waste as a promising mineral additive in the production of new cement types // *Minerals*. 2020. V. 10. 394. doi:10.3390/min10050394
- Kislov E.V. Russian nephrite resources and related genesis study // *Proceedings of the China International Gems & Jewelry Academic Conference*. Abstract volume, Beijing, China, 19–23 October 2019. pp. 211–213.
- Prokhor S.A. The genesis of nephrite and emplacement of the nephrite-bearing ultramafic complexes of East Sayan // *International Geology Review*. 1991. V. 33. pp. 290–300.
- Simandl G.J., Riveros C.P., Schiarizza P. Nephrite (Jade) Deposits, Mount Ogden Area, Central British Columbia (NTS 093N 13W) // *British Columbia Geological Survey. Geological Fieldwork 1999, Paper 2000-1*. pp. 339–347.
- Tang Y.L., Liu D.Q., Zhou R.H. Geological characteristics of Manasi green jade in Xinjiang // *Acta Petrol. Mineral.* 2002. V. 9. pp. 22–25 (In Chinese).
- Yui T.-F., Usuki T., Chen C.-Y., Ishida A., Sano Y., Suga K., Iizuka Y., Chen C.-T. Dating thin zircon rims by NanoSIMS: the Fengtien nephrite (Taiwan) is the youngest jade on Earth // *International Geology Review*. 2014. V. 56, No. 16. pp. 1932–1944.
- Wan H.M., Yeh C.L. Uvarovite and grossular from the Fengtien nephrite deposits, Eastern Taiwan // *Mineralogical Magazine*. 1984. V. 48, No. 346. pp. 31–37.
- Wang J., Shi G. Comparative Study on the Origin and Characteristics of Chinese (Manas) and Russian (East Sayan) Green Nephrites // *Minerals*. 2021. V. 11. 1434. <https://doi.org/10.3390/min11121434>
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China // *Gems and Gemology*. 2019. V. 55, No. 2. pp. 198–215.

Информация об авторах:

Кислов Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория металлогении и рудообразования, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия; ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудообразующих процессов, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: evg-kislov@ya.ru

Ерохин Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория региональной геологии и геотектоники, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: erokhin-yu@yandex.ru

Попов М.П., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра минералогии, петрографии и геохимии, факультет геологии и геофизики, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия; старший научный сотрудник, лаборатория региональной геологии и геотектоники, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: popovml@yandex.ru

Николаев А.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра минералогии и литологии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kislov E.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Metallogeny and Ore Formation, Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia; Leading Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Formation Processes, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: evg-kislov@ya.ru

Erokhin Yu.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Regional Geology and Geotectonics, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: erokhin-yu@yandex.ru

Popov M.P., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry, Faculty of Geology and Geophysics, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia; Senior Researcher, Laboratory of Regional Geology and Geotectonics, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: popovm1@yandex.ru

Nikolaev A.G., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Mineralogy and Lithology, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: anatolij-nikolaev@yandex.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 12.09.2022

The article was submitted 28.03.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accepted for publication 12.09.2022