

УДК 553.89

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4586

Шифр специальности ВАК: 1.6.3, 1.6.4, 1.6.10

Качественные характеристики и причины окраски аподоломитового нефрита Воймаканского месторождения, Средне-Витимская горная страна

Е.В. Кислов^{1✉}, И.С. Гончарук^{1,2}, А.Г. Николаев³, Ф.Г. Вагизов³,
В.В. Вантеев¹, Н.М. Хасанова³

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

² Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Россия, г. Улан-Удэ

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, г. Казань

✉ evg-kislov@ya.ru

Аннотация. Актуальность. Нефрит – высоколиквидный, но недостаточно исследованный ювелирно-поделочный камень. Статья посвящена ранее не изученному Воймаканскому месторождению аподоломитового нефрита, основное внимание уделено причинам окраски нефрита, остающимся дискуссионными в отношении этого камня в целом. **Цель.** Определение качественных характеристик нефрита Воймаканского месторождения и причин его окраски. **Методы.** Органолептический метод с применением бинокля, геммологических фонарика и лупы 20-кратного увеличения. Выполнены силикатный и ICP-MS анализы, определены колориметрические параметры, применена оптическая абсорбционная спектроскопия, выполнены мёссбауэровские измерения. **Результаты.** Нефрит зелено-вато-белый, светло-зеленый, серовато-зеленый и коричневый, образует обособления в телах кальцит-тремолитового скарна на контакте доломитовых мрамора и амфиболита, преобразованного в эпидот-тремолитовый скарн. Оптические спектры поглощения нефрита отличаются широкой полосой поглощения малой интенсивности в видимой области в районе 650–670 нм, связанной с механизмом переноса заряда $Fe^{2+VI} \rightarrow Fe^{3+VI}$ в соседних октаэдрических позициях. **Выводы.** Нефрит соответствует требованиям к камнесамоцветному сырью. Диопсидит с линзочками и прослоями нефрита может использоваться для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций. Железо в нефрите находится в виде ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} в различных позициях в структуре минерала, а именно 58,4 % Fe^{2+} располагаются в октаэдрических позициях M_1 – M_3 , 30,9 % Fe^{2+} – в позиции восьмерной координации M_4 , 8,4 % Fe^{3+} располагается в октаэдрических позициях M_1 – M_3 . Эти данные согласуются с полосами в оптических спектрах поглощения, что и создает окраску изучаемых нефритов. Электронный парамагнитный резонанс и люминесцентная спектроскопия показали, что ионы Mn^{2+} располагаются в двух неэквивалентных позициях. Степень зеленого оттенка нефрита усиливается с увеличением содержания Fe^{2+} . Коричневую окраску нефрита определяет Fe^{3+} в структуре тремолита.

Ключевые слова: нефрит, Воймаканское месторождение, качественные характеристики, оптическая абсорбционная спектроскопия, мёссбауэровские измерения, причины окраски

Благодарности: Авторы признательны за предоставленные материалы и информацию ООО «ВВС» и лично Станиславу Ивановичу Москва и Виктору Сергеевичу Кодочигову, за выполнение анализов Любови Владимировне Митрофановой, Туяне Гатыповне Хумаевой, Ольге Васильевне Корсун, Елене Дмитриевне Утиной, Маргарите Григорьевне Егоровой, Дарье Владимировне Киселевой. Замечания и предложения рецензентов редакции способствовали значительному улучшению рукописи. Сбор материалов и анализы выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>, подготовка статьи выполнена в рамках государственного задания ГИН СО РАН, № гос. рег. АААА-А21-121011390003-9, и ИГГ УрО РАН, № гос. рег. 123011800011-2. Использовано оборудование ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) и «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

Для цитирования: Качественные характеристики и причины окраски аподоломитового нефрита Воймаканского месторождения, Средне-Витимская горная страна / Е.В. Кислов, И.С. Гончарук, А.Г. Николаев, Ф.Г. Вагизов, В.В. Вантеев, Н.М. Хасанова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 107–123. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4586

UDC 553.89

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4586

Qualitative characteristics and color causes of dolomite type nephrite, Voimakan deposit, Meadle-Vitim mountain country

E.V. Kislov^{1✉}, I.S. Goncharuk^{1,2}, A.G. Nikolaev³, F.G. Vagizov³,
V.V. Vanteev¹, N.M. Khasanova³

¹ N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

² D. Banzarov Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation

³ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

✉ evg-kislov@ya.ru

Abstract. Relevance. Nephrite is a highly valuable but insufficiently researched gemstone. The article is devoted to the previously unexplored Voimakan deposit of dolomite type, the main attention is paid to the causes of nephrite coloring, which remain controversial in relation to this stone in general. **Aim.** To determine the quality characteristics of the Voimakan deposit nephrite and the causes of its color. **Methods.** An organoleptic method using binoculars, a gemological flashlight and a magnifying glass of 20x magnification. Silicate and ICP-MS analyses were performed, colorimetric parameters were determined, optical absorption spectroscopy was applied, and Mössbauer measurements were carried out. **Results.** Greenish-white, light green, grayish-green and brown nephrite forms segregations in calcite-tremolite skarn bodies at the contact of dolomite marble and amphibolite transformed into epidote-tremolite skarn. The optical absorption spectra of nephrite are characterized by a wide low-intensity absorption band in the visible region in the region of 650–670 nm, associated with the charge transfer mechanism $Fe^{2+_{VI}} \rightarrow Fe^{3+_{VI}}$ in neighboring octahedral positions. **Conclusions.** Nephrite meets the requirements for gemstone raw materials. Diopside with nephrite lenses and interlayers can be used for carving multicolored products or inlays. Iron in nephrite is found in the form of Fe^{3+} and Fe^{2+} ions in various positions in the structure of the mineral, namely 58,4% of Fe^{2+} is located in octahedral positions M_1 – M_3 , 30,9% of Fe^{2+} is located in the position of octal coordination M_4 , 8,4% of Fe^{3+} is located in octahedral positions M_1 – M_3 . These data are consistent with the bands in the optical absorption spectra, which creates the coloration in the studied nephrites. Electronic paramagnetic resonance and luminescent spectroscopy have shown that Mn^{2+} ions are located in two nonequivalent positions. The degree of green shade of nephrite increases with growth in Fe^{2+} content. The brown color of nephrite is determined by Fe^{3+} in the tremolite structure.

Keywords: nephrite, Voimakan deposit, qualitative characteristics, optical absorption spectroscopy, Mössbauer measurements, causes of color

Acknowledgements: The authors are grateful for the materials and information provided by LLC “VVS” and personally to Stanislav I. Moskva and Victor S. Kodochigov, to Lyubov V. Mitrofanova, Tuyana G. Khumaeva, Olga V. Korsun, Elena D. Utina, Margarita G. Egorova, Daria V. Kiseleva for performing analyses. The comments and suggestions of the editorial board reviewers contributed to a significant improvement of the manuscript. The collection of materials and analyses were carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>, the preparation of the article was carried out within the framework of the state assignment of the GIN SB RAS, no. state reg. AAAA-A21-121011390003-9, and IGG UrO RAN, no. state reg. 123011800011-2.

For citation: Kislov E.V., Goncharuk I.S., Nikolaev A.G., Vagizov F.G., Vanteev V.V., Khasanova N.M. Qualitative characteristics and color causes of dolomite type nephrite, Voimakan deposit, Meadle-Vitim mountain country. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 107–123. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4586

Введение

Нефрит – высоколиквидный ювелирно-поделочный камень, плотный агрегат моноклинного амфибола тремолит-ферроактинолитового ряда, преимущественно тремолита, обладающий характерной спутанно-волокнистой микроструктурой. Нефрит особенно ценится в Китае, Новой Зеландии, на тихоокеанском побережье Северной Америки.

Месторождения нефрита подразделяются на два эндогенных геолого-промышленных типа. Первый

тип – апосерпентинитовый в метасоматитах офиолитов. Второй тип – аподоломитовый в тремолит-кальцитовых магнезиальных скарнах. Россыпи, преимущественно аллювиальные, обычно приурочены к коренным месторождениям.

По состоянию на 01.01.2022 Государственным балансом запасов в России учтены 26 месторождений апосерпентинитового и аподоломитового нефрита. В 2022 г. разрабатывались Кавоктинское, Нижне-Олломинское, Сергеевская залежь, Хайтин-

ское, Голубинское месторождения аподоломитового нефрита в Бурятии. Воймаканское месторождение нефрита в Бурятии подготавливалось к отработке, Удоканское в Забайкальском крае и Буромское в Бурятии разведывались. В нераспределенном фонде месторождений аподоломитового нефрита нет. Все российские месторождения аподоломитового нефрита находятся в Витимской нефритоносной провинции.

За рубежом большинство месторождений аподоломитового нефрита находятся в Китае, их названия транскрибированы по системе Палладия. Наиболее крупные известные месторождения – в Северо-Западном Китае. В Синцзян-Уйгурском автономном районе находится обрабатываемый уже 6 тысяч лет нефритоносный пояс Хотан как с коренными месторождениями [1–5], так и знаменитыми россыпными месторождениями Юрункаш – «река белого нефрита», и Каракаш – «река черного нефрита» [6–9]. К поясу Хотан с востока примыкает нефритоносный район Алтынтаг [10–14]. Еще восточнее в провинции Цинхай находятся месторождения Голмуд и другие [15–17]. Ряд месторождений находится в Северо-Восточном Китае: Тели – в провинции Хэйлунцзян [18–20], Паньши – в провинции Гиринь [21], Сюань и Санпийю – в провинции Ляонин [22, 23]. В Восточном Китае известно месторождение Сяомэйлин в провинции Цзянсу [24, 25]. В Юго-центральной части Китая находятся месторождения Луаньчуань в провинции Хэнань [26, 27] и Дахуа в Гуанси-Джуанском автономном районе [28–30]. В Юго-западном Китае – месторождения Лунси в провинции Сычуань [31, 32] и Лодянь в провинции Гуйжоу [33, 34].

В других странах следует отметить месторождение Чхунчхон в Южной Корее [35–37], район Коулл на полуострове Эйр в Южной Австралии [38, 39], месторождение Альпе Мастабия (Вал Маленко) в Ломбардии, Италия [40], месторождение Злоты Сток в Нижней Силезии, Польша [41–43].

Научно-исследовательские работы на российских месторождениях аподоломитового нефрита проводились в основном в 1980-х гг. В какой-то мере исследования нефрита Витимской нефритоносной провинции возобновлены лишь в последние годы [44–48].

Окраска – важное свойство камнесамоцветного сырья, в том числе и нефрита, определяющая уровень качества ювелирно-поделочного камня и стоимость изделия. Для апосерпентинитового нефрита характерны различные оттенки зеленого цвета до коричневого (табачного, болотного) и черного. Для аподоломитового нефрита характерен широкий диапазон окрасок от белого, серого до светло-зеленого (салатного), коричневого (медового) и черного.

Окраска нефрита зависит от его химического состава и механических примесей – чистый тремолит бесцветен. Традиционно считается, что окраска нефрита определяется содержанием железа и отношением двух- и трехвалентного железа, показано это и для аподоломитового нефрита Витимской нефритоносной провинции [45, 46]. В качестве причин идиоохроматической окраски рассматриваются изоморфные примеси хрома, ванадия, марганца, никеля. Аллохроматическая окраска может быть вызвана примесью таких минералов, как графит, хлорит, хромгроссуляр, оксиды и гидроксиды железа и марганца, молибденит, галенит. Для точного определения причин окраски необходимы кристаллохимические исследования, проведенные в данной работе на примере Воймаканского месторождения.

Определение качества нефрита – сложная задача, зависящая от ряда параметров: блочности, цвета, однородности окраски либо ценившейся неоднородности (эффекта «кошачьего глаза», каемки прокрашивания, декоративных дендритов), количества, размера и распределения включений инородных минералов и горных пород, развития вторичных минералов, блеска. Наиболее ценится яркий голубовато-зеленый нефрит с минимальным количеством зерен хромита, белый нефрит и тремолитовый «кошачий глаз». Высоко ценятся аллювиальные гальки и валуны нефрита, особенно с поверхностными корочками прокрашивания – например, белый нефрит с красной корочкой, позволяющей вырезать многоцветное изделие.

В СССР и России не было и нет государственного стандарта на нефрит. Первым документом, определяющим требования к нефриту, стали «Технические условия ТУ 41-01-297-77 «Нефрит в блоках», утвержденные Всесоюзным промышленным объединением «Союзкварцсамоцветы». Их сменили «Технические условия ТУ 41-07-052-90 «Камни цветные природные в сырье», утвержденные Научно-производственным объединением «Кварцсамоцветы».

В соответствии с ними различается нефрит ювелирный саянский, витимский – зеленый различных тонов и оттенков, белый различных оттенков, черный. Окраска однотонная равномерная. Допускается слабовыраженная неоднородность в окраске и равномерная вкрапленность темных минералов размером не более 2 мм в диаметре при концентрировании не более двух включений на 1 см². Для первого сорта минимальные размеры сортового камня не менее 100×100×50 мм, для второго сорта – 30×50×30 мм.

Нефрит поделочный саянский, витимский – зеленый различных тонов и оттенков, белый, черный, «табачный». Окраска пятнистая, струйчатая. До-

пускаются инородные включения минералов и трещиноватость, не влияющие на механическую прочность камня и его полируемость. Первый сорт – неоднородность окраски слабо выражена, минимальные размеры сортового камня не менее 100×100×100 мм. Второй сорт – неоднородность окраски ярко выражена, минимальные размеры сортового камня не менее 100×100×50 мм.

Несложно заметить, что технические условия 1990 г. не учитывают современных тенденций мирового, точнее китайского, рынка, особенно в отношении привлекательных для него цветовых неоднородностей нефрита. В настоящее время горнодобывающие компании разрабатывают и утверждают стандарты предприятия, но они действуют лишь в отношении нефрита, добываемого на их лицензионных площадях.

В Китае до сих пор нет устоявшегося стандарта определения сортности. Обычно используется наименование конкретного месторождения. Например, нефрит наивысшего качества называют «Хотанский нефрит». При этом под таким названием продается нефрит с разных месторождений, даже наиболее качественный зеленый апосерпентинитовый нефрит из Бурятии и Британской Колумбии. Тем не менее разрабатываются местные стандарты, например стандарт зеленого апосерпентинитового нефрита месторождения Манас, выпущенный Бюро по надзору за качеством Синьцзян-Уйгурского автономного района. Стандарт распространяется на зеленый нефрит, добываемый в этом районе. В стандарте используются цвет, текстура и просвечиваемость для разделения зеленого нефрита Манас на четыре сорта: отличный, хороший, мелкодисперсный и плохой. Традиционные сорта следующие.

Хотанский нефрит белый, желтый, голубовато-белый, серый, черный из уезда Хотан Синьцзян-Уйгурского автономного района. Он почти полностью состоит из тремолита, но может содержать до 5 мас. % примесей, таких как диопсид, эпидот, клинозоизит, оливин, доломит, кварц, магнетит, пирит, апатит, лимонит и углеродистые вещества, рассеянные в нефрите и придающие различные оттенки цвета. Различают четыре цветовые разновидности: белый, желтый, синий и черный хотанский нефрит. Наиболее ценный белый хотанский нефрит, обычно от белого до очень бледно-желтого цвета, содержащий более 99 мас. % тремолита, и желтый хотанский нефрит, который обязан своим более глубоким желтым цветом включениям оксидов железа. Синие разновидности содержат микроскопические включения голубовато-зеленых силикатных минералов (кроме актинолита), а черные разновидности содержат до 5 мас. % как минералов железа, так и углеродистых веществ.

Куньлунь или цинхайский нефрит бледно-зеленый, белый с восточной части гор Куньлунь в провинции Цинхай. Он состоит из актинолита и тремолита в различных пропорциях и, как правило, также содержит небольшое количество волластонита. Наиболее ценные блоки с узорами зеленого и белого цвета.

Лантяньский нефрит белый, желтовато-белый, желтый, серый, бледно-голубой, светло-зеленый из уезда Лантянь провинции Шэньси, Китай. Цвета обусловлены включениями оксидов железа (желтый), графита (серый) и минералов группы хлорита, эпидота или серпентина (бледно-голубой и светло-зеленый). В историческом месторождении Юйчуань нефрит содержит минералы группы серпентина, главным образом антигорит, которые придают ему зеленые узоры или зеленую окантовку.

Нефрит Манас зеленый, серо-зеленый, оливково-зеленый, темно-зеленый из уезда Манас Синьцзян-Уйгурского автономного района. Зеленый нефрит состоит в основном из тремолита и лишь в незначительной степени из актинолита. Зеленый цвет обусловлен микроскопическими включениями зеленых силикатов, в основном хлорита и минералов группы серпентина. Нефрит также часто содержит небольшое количество диопсида, гроссуляра и хромшпинели.

Нефрит Мэйлин белого, серовато-белого, серого цвета с месторождения Сяомэйлин, уезд Лиян, провинция Цзянсу. Типичный тремолитовый нефрит.

Нефрит Сюянь от белого до зеленого цвета с месторождения Сюянь в провинции Ляонин. Содержит как тремолит, так и актинолит в различных пропорциях. Некоторые разновидности могут также содержать антигорит.

Нефрит Наньян, или Душан, из уезда Наньян провинции Хэнань неоднородный белого, желтоватого цвета с розоватыми, зелеными, желтыми вкраплениями, используется для резьбы.

Различается также черный и белый нефрит. Аналогично в России покупатели из Китая часто просят «семерку», имея в виду апосерпентинитовый нефрит жилы № 7 Оспинского месторождения. При этом реальное происхождение нефрита их не интересует, а только высокое качество – яркий голубовато-зеленый цвет, повышенная просвечиваемость и малое количество зерен хромита.

Значительное количество нефрита в Китай поставляет канадская компания «Джэд Уэст», классифицирующая нефрит по категориям AAA, AA, A, B и C. AAA применяется к сырью для самых дорогих браслетов и подвесок, составляет 3 % производства компании. Категории AA и A отвечают сырью для рядовых ювелирных изделий. Резьба выполняется из нефрита сортов B и C. Сырье для

резьбы составляет около 70 % продукции и продается по цене от 20 до 30 долларов за килограмм. Более низкие сорта используются для изготовления облицовочной плитки, погребальных урн и других декоративных целей. Промышленные сорта имеют более приглушенный цвет и более высокую концентрацию включений магнетита и трещин. Такая система оценки часто применяется в Китае для китайского и российского нефрита, при этом в большей мере учитываются блочность и выход сортового нефрита.

В данной работе приведены результаты исследования Воймаканского месторождения, находящегося на западном фланге Витимской нефритоносной провинции. Научно-исследовательские работы на этом месторождении ранее не проводились, публикации в открытой печати отсутствуют. Основное внимание уделено качественным характеристикам нефрита и причинам его окраски.

Воймаканское месторождение

Воймаканское месторождение аподоломитового нефрита находится в западной части Витимской нефритоносной провинции. В географическом отношении месторождение расположено на территории Баунтовского эвенкийского района Республики

Бурятия в Средне-Витимской горной стране (рис. 1).

Воймаканское проявление апокарбонатного нефрита выявлено во время работ экспедиции “Байкал-кварцсамоцветы” в 1981 г. А.П. Секериным при проведении рекогносцировочных маршрутов в среднем течении р. Ципы. Среди развалов элювиально-делювиальных глыб гранитов и мраморов были обнаружены валуны кальцит-тремолитовых скарнов. Геологоразведочные работы на Воймаканском проявлении проводились до 1991 г. в небольшом объеме в связи с наличием в этом районе более перспективных объектов. В 1990–2000-е гг. велась нелегальная добыча нефрита в карьере с нагорными канавами. Ситуация изменилась в 2012 г. после получения лицензии на геологическое изучение, разведку и добычу нефрита ЗАО «МС Холдинг».

Район расположения Воймаканского месторождения характеризуется развитием различных осадочных, метаморфических и интрузивных пород, осложнен тектоникой (рис. 1). В районе месторождения меандрирующая р. Ципа и её приток р. Воймакан протекают по типичной U-образной долине с широким, участками узким, скальным днищем. С ними связаны аллювиальные отложения русла р. Ципы и первой надпойменной террасы.

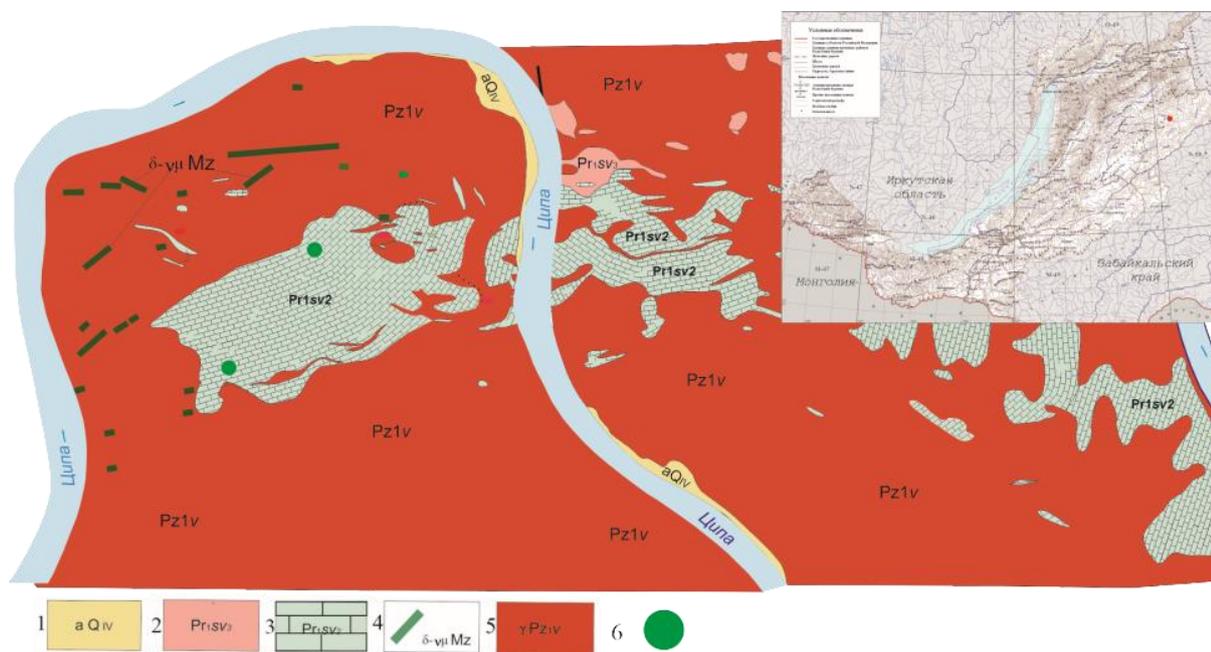


Рис. 1. Геологическая схема Воймаканского месторождения (по [49] с дополнениями и исправлениями): 1 – аллювиальные отложения; 2, 3 – суванихинская свита: 2 – верхняя подсвита: сланцы, гнейсы, амфиболиты, известняки, метаэффузивы; 3 – средняя подсвита: известняки, доломиты, сланцы; 4 – мезозойские интрузивы: габбро, диориты, габбро-диориты; 5 – Витимканский интрузивный комплекс: граниты, гранодиориты, диориты, аплиты, пегматиты; 6 – залежи нефрита

Fig. 1. Geological scheme of the Voimakan deposit (after [49] with additions and corrections): 1 – alluvial deposits; 2, 3 – Suvaniukha formation: 2 – upper sub-formation: shales, gneisses, amphibolites, limestones, meta-effusives; 3 – middle sub-formation: limestones, dolomites, shales; 4 – Mesozoic intrusions: gabbro, diorites, gabbro-diorites; 5 – Vitimkan intrusive complex: granites, granodiorites, diorites, aplites, pegmatites; 6 – nephrite areas

Суванихинская свита нижнего протерозоя подразделяется на подсвиты. К верхней подсвите относятся кварц-биотитовые, биотит-кордиеритовые, силлиманит-биотитовые, биотит-роговообманковые сланцы, гнейсы, амфиболиты, прослои и горизонты кристаллических известняков, метаморфизованных кислых и основных эффузивов. К средней подсвите отнесены кристаллические известняки, доломиты с прослоями биотитовых сланцев.

Большая часть площади месторождения сложена выходами Витимканского интрузивного комплекса нижнего палеозоя. Первая фаза представлена порфиroidными амфибол-биотитовыми гранитами, гранодиоритами, диоритами, дайками аплитов, телами пегматитов. Вторая фаза – лейкократовыми биотитовыми равномернозернистыми, реже гнейсовидными гранитами, гранодиоритами. К мезозою отнесены дайки габбро, диоритов, габбро-диоритов.

В пределах Воймаканского месторождения широко распространены разрывные нарушения различного времени заложения, ориентировки и амплитуды. Отчетливо выделяются две диагональные системы разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простирания. Разрывные нарушения характеризуются наличием зон дробления и милонитизации с крутыми углами падения (60–90°). К зонам разломов приурочены дайки магматических пород, тела метасоматических пород.

Метасоматические изменения с образованием нефритоносных зон развиты вблизи контактов мраморизованных доломитов и амфиболитов (рис. 2). В гранитах метасоматические изменения выражаются в существенном увеличении содержания эпидота, клиноцоизита, уменьшении содержания биотита, появлении тремолита и хлорита. В амфиболитах роговая обманка замещается тремолитом, плагиоклаз – эпидотом, появляется хлорит, порода преобразуется в эпидот-тремолитовый скарн. Метасоматические изменения в карбонатных породах проявлены сильнее, с образованием кальцит-тремолитовых скарнов с желваками, гнездами и жилами нефрита на небольшом удалении от гранитов.

На Правобережном участке Воймаканского месторождения нефрита выявлено 8 залежей нефрита. По залежам № 1 и 2 защищены запасы. На Левобережном участке работы продолжаются.

Залежь № 1 нефрита (рис. 2) залегает в теле кальцит-тремолитового скарна в доломитовом мраморе недалеко от контакта с метасоматизированными амфиболитом и гранитом. Отмечаются контакты с эпидот-тремолитовым скарном. Вдоль контактов залежь тектонизирована, по трещинам борозды и зеркала скольжения. Залежь № 1 имеет

крутое падение на юго-запад, сложена тремя разрозненными телами (блоками), разделенными кальцит-тремолитовым скарном и находящимися на расстоянии 4,0–4,5 м друг от друга. Длина первого блока 12 м, мощность от 0,15 до 1,04 м, в среднем 0,58 м; длина второго блока 7 м, мощность 0,10–2,25 м, в среднем 1,74 м; длина третьего блока 7 м, мощность 0,17–0,65 м, в среднем 0,41 м.

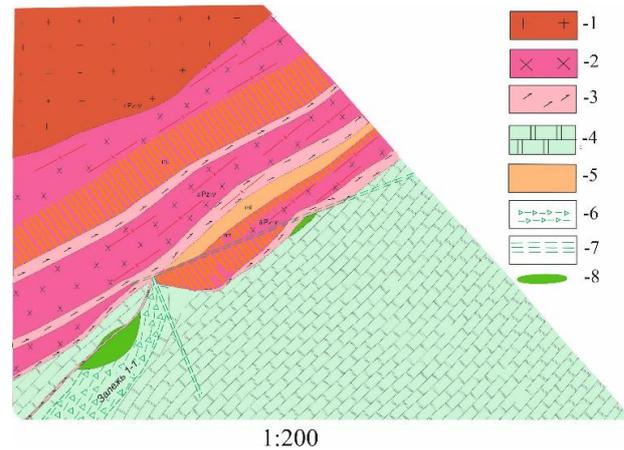


Рис. 2. Геологическая схема залежи 1 (по материалам [49] с дополнениями и исправлениями). Витимканский интрузивный комплекс: 1 – первая фаза: порфиroidные амфибол-биотитовые граниты, гранодиориты, диориты, дайки аплитов, тела пегматитов; 2 – вторая фаза: лейкократовые биотитовые равномернозернистые, реже гнейсовидные граниты, гранодиориты; суванихинская свита: 3 – верхняя подсвита: кварц-биотитовые, биотит-кордиеритовые, силлиманит-биотитовые, биотит-роговообманковые сланцы, гнейсы, амфиболиты, прослои и горизонты кристаллических известняков, метаморфизованных кислых и основных эффузивов; 4 – средняя подсвита: кристаллические известняки, доломиты, прослои биотитовых сланцев; 5 – метасоматически измененные породы; 6 – тектонические брекчии; 7 – зоны разрывных нарушений; 8 – тела кальцит-тремолитовых скарнов с желваками и жилами нефрита

Fig. 2. Geological scheme of vein 1 (after [49] with additions and corrections). Vitimkan intrusive complex: 1 – first phase: porphyritic amphibole-biotite granites, granodiorites, diorites, aplite dikes, pegmatite bodies; 2 – second phase: leucocratic biotite equigranular, rarely gneiss-like granites, granodiorites; Suvanikha formation: 3 – upper sub-formation: quartz-biotite, biotite-cordierite, sillimanite-biotite, biotite-hornblende shales, gneisses, amphibolites, interlayers and horizons of crystalline limestones, metamorphosed acid and basic effusives; 4 – middle sub-formation: crystalline limestones, dolomites, interlayers of biotite shales; 5 – metasomatically altered rocks; 6 – tectonic breccias; 7 – faults zones; 8 – calcite-tremolite skarns bodies with nephrite nodules and veins

Залежь № 2 залегает в теле кальцит-тремолитового скарна среди доломитового мрамора, недалеко от контакта с метасоматизированным гранитом, контакты кальцит-тремолитового скарна с доломитом катаклазированы и окварцованы. В плане залежь имеет форму крутопадающей линзы. По простиранию залежь прослежена на 15 м, мощность от 0,22 до 1,34 м, в среднем 0,59 м.

Материалы и методы исследования

Изучены образцы из кернов скважин, в меньшей мере из валовых проб, полученных в ходе геолого-разведочных работ ООО «ВВС» по заказу ЗАО «МС Холдинг» на Воймаканском месторождении. Для детального исследования отобраны 12 образцов нефрита и 5 образцов вмещающих пород. Визуальное петрографическое и минералогическое изучение проводилось при естественном освещении, применялась фотофиксация. Декоративные свойства (окраска, оттенок, рисунок, наличие каемок, степень шероховатости) определялись при помощи бинокулярного микроскопа МБС-10 и геммологического фонарика. Шлифы изучены с помощью петрографического микроскопа «Olympus Vx-51».

Силикатный анализ выполнен в ЦКП «Гео-спектр» ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, на спектрофотометре UNICO 1201 (United Products and Instruments, США), работающем в спектральном интервале 315–1000 нм; атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR-6M («Unicam», Англия) с соответствующим программным обеспечением. SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, P₂O₅ определялись фотометрическим методом; CaO, MgO, MnO, Fe₂O₃, CO₂ – атомно-абсорбционным спектроскопическим; FeO, CO₂ – титриметрическим; ппп, S – гравиметрическим; Na₂O, K₂O – пламенно-фотометрическим; Cr, V, Co, Ni, Cu – атомно-эмиссионным спектральным методом. Применялись весы электронные ВСЛ-200/0,1А (ЗАО «ВЕС-СЕРВИС», г. Санкт-Петербург, Россия) с диапазоном взвешивания от 0,01 до 205 г. Аналитики Л.В. Митрофанова, Т.Г. Хумаева, О.В. Корсун, Е.Д. Утина, М.Г. Егорова.

Разложение проб и анализ содержания элементов-примесей проводилось с помощью ICP-MS-анализа в ЦКП «Геоаналитик» (ИГГ УрО РАН) на квадрупольном ИСП масс-спектрометре NexION300S (Perkin Elmer, США). Микроволновое разложение проб осуществлялось смесью кислот HCl+HNO₃+HF с использованием системы Berghof Speedwave MWS 3+. Типичные операционные условия масс-спектрометра: мощность радиочастотного генератора – 1300 Вт, материал конусов интерфейса – платина. Все измерения проводились в режиме количественного анализа с построением

градуировочных кривых. Для построения градуировочных зависимостей использовались сертифицированные в соответствии ISO 9001 мультиэлементные стандартные растворы (Perkin Elmer Instruments). Для контроля правильности и точности определения микроэлементного состава использованы сертифицированные образцы базальта BCR-2 и андезита AGV-2 (USGS). В течение анализа серии проб измерение стандартного образца проводилось с периодичностью 1:5–1:10. Полученные концентрации редких, рассеянных и редкоземельных элементов удовлетворительно согласуются с аттестованными величинами с допустимым отклонением в пределах 15 %. Погрешности определения элементов составили (отн. %): 24 (Cr, Ni, Co, Cu, V, Ba, Sr), 30 (Rb), 41 (P3Э), 50 (Zr), 60 (Y, Hf, Ta, Nb, Th, U), аналитик Д.В. Киселева.

Оптические свойства – прозрачность, цвет, оптические эффекты, включения, изучались с помощью бинокулы МБС-10 и геммологической лупы 20-кратного увеличения в КФУ, г. Казань. При определении цвета, оттенков, тона и насыщенности использовались шкала цвета по системе GIA и требования ТУ 117-3-0761-7-00 для определения тона и насыщенности цвета образцов. Исследования проводились методом оптической абсорбционной спектроскопии. Оптические спектры поглощения записывались на стандартизированном спектрофотометре МФУ-К. Регистрация оптических спектров поглощения производилась в интервале длин волн 400–800 нм с шагом 1 нм. Для объективного измерения и описания окраски образцов 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 по международной системе CIE Lab рассчитывались с использованием специализированной программы «Спектр». Координаты цвета с помощью специальной таблицы переводились в системы GIA, которые используются для оценки цвета. Все экспериментальные исследования проводились при комнатной температуре. С каждого образца снималось по 5 спектров. Спектры люминесценции регистрировались на рамановской установке inVia Qontor Renishaw, источник возбуждения – лазер с длиной волны 532 нм, мощностью 500 мВт, съемка велась при комнатной температуре. Спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) регистрировались с помощью спектрометра CMS8400 X-диапазона (ADANI, Minsk, Belarus) с частотой 9,4 ГГц.

Мёссбауэровские измерения на ядрах ^{57}Fe в образцах нефрита проводились с применением стандартного спектрометра постоянного ускорения производства компании WissEl (ФРГ). В качестве источника резонансного гамма-излучения (14,4 кэВ) использовался изотоп ^{57}Co внедренный в родиевую матрицу (ЗАО РИТВЕРЦ, г. Санкт Петербург) с активностью 35 мКи. Для исследования кусочки образцов были растерты в агатовой ступке до мелкодисперсного состояния. Использовалась навеска равная 138 мг/см^2 . Измерения были проведены при комнатной температуре и температуре 80 К. Низкотемпературное измерение осуществлялось с помощью проточного гелиевого криостата марки CFICEV-MOSS производства компании ICE Oxford (Великобритания). Температура образца поддерживалась с точностью $\pm 1 \text{ К}$ с помощью температурного контроллера (model 32B, Cryo-Con, USA). Для калибровки скоростной шкалы мёссбауэровского спектрометра использовалась фольга металлического железа толщиной 7 микрон. Значения изомерных сдвигов, составляющих спектра приведены относительно $\alpha\text{-Fe}$ при комнатной температуре. Математическая обработка спектров осуществлялась с помощью программного пакета «SpectrRelax». Для описания формы линии гамма-резонансного поглощения использовалась функции «псевдо-Войта», $PV(x) = \alpha G(x) + (1-\alpha)L(x)$, где $G(x)$ – функция Гаусса, $L(x)$ – функция Лоренца.

Результаты исследования

Качественные характеристики нефрита. На Воймаканском месторождении нефрит имеет преимущественно зеленовато-белую, светло-зеленую, серовато-зеленую и коричневую окраску (рис. 3). В некоторых образцах окраска неоднородная из-за включений визуально различимых призматических зерен тремолита, кальцита, диопсида, обособлений кальцит-тремолитового агрегата. Просвечиваемость по краю штуфа от 1 до 5 см. Твердость 5–5,5 по шкале Мооса. Плотность $2,94\text{--}2,95 \text{ г/см}^3$. Блеск матовый, излом раковистый или занозистый. Содержание поделочного нефрита II сорта по штуфным пробам 5–50 об. %, среднее содержание поделочного нефрита II сорта по валовым пробам по залежам 3,1–5,2 об. %. Нефрит принимает совершенную полировку с зеркальным блеском. Дефекты: разноориентированные трещины, включения инородных минералов и пород, развитые по поверхностям и трещинам пленки кальцита, вторичных минералов железа и марганца. Качество нефрита зачастую ухудшено интенсивным замещением хлоритом и тальком.

С нефритом ассоциируют своеобразные породы, состоящие в основном из диопсида с прожилками и линзами нефрита (рис. 3, в). Мы их назвали по со-

ставу диопсидитами, хотя классический диопсидит – это пироксенит, состоящий преимущественно из диопсида с незначительной примесью магнетита и иногда ортопироксена, оливина или основного плагиоклаза, образующий жилы в ультраосновных породах и ранние дифференциаты габброидных интрузивов. Преобладающий в породе диопсид светло-бежевый, цвета слоновой кости, неравномернозернистый – иногда зерна достигают 2 см в сечении.

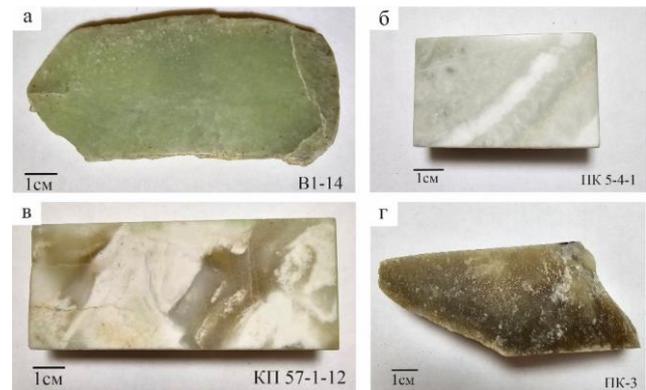


Рис. 3. Цветовые вариации нефрита Воймаканского месторождения: а) светло-зеленый, б) зеленовато-белый с обособлениями кальцит-тремолитового агрегата, в) зеленовато-серый до светло-коричневого – пропластки в диопсидите, з) коричневый

Fig. 3. Color variations of the Voimakán deposit nephrite: а) light green, б) greenish-white with calcite-tremolite aggregates, в) greenish gray to light brown – interlayers in diopside, з) brown

Химический и изотопный состав пород отображен в таблицах: силикатного анализа (табл. 1) и анализа элементов-примесей (табл. 2).

Оптические и спектроскопические свойства. Нефрит Воймаканского месторождения состоит в основном из маложелезистого тремолита – $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$. Тремолит относится к моноклинно-призматическому классу симметрии. В кристаллической решетке минерала участвуют двойные цепочки кремнекислородных тетраэдров $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ с самостоятельным анионом $[\text{OH}]^-$, которые чередуются с лентами катионных полиэдров, главным образом октаэдров. Катионные позиции М1, М2, М3 октаэдрические, а позиция М4 характеризуется восьмерной координацией.

На рис. 4 приведен мессбауэровский спектр образца нефрита в диапазоне скоростей, в котором могут быть линии возможных примесных составляющих, обладающих магнитным упорядочением. Как видно из спектра, в области больших скоростей линии поглощения не наблюдаются. Следовательно, в исследованном образце магнитоупорядочен-

ные оксидные фазы железа при комнатной температуре отсутствуют.

Таблица 1. Результаты силикатного анализа пород, мас. %; Cr, V, Co, Ni, Cu в г/т

Table 1. Results of silicate analysis of rocks, wt %; Cr, V, Co, Ni, Cu in ppm

| № проб Sample no. | КС-19 | КС-18 | VI-14 | КР-5-3-7 | РК-1 N | РК-3 | КР-81-1-3 | РК-1 S |
|--------------------------------|-------|-------|-------|----------|--------|--------|-----------|--------|
| SiO ₂ | 56,30 | 56,20 | 56,50 | 51,60 | 56,10 | 57,60 | 0,90 | 43,40 |
| TiO ₂ | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | <0,02 |
| Al ₂ O ₃ | 0,70 | 0,50 | 0,50 | 0,70 | 1,00 | 0,60 | 0,10 | 10,20 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,34 | <0,10 | 0,17 | 0,10 | 0,24 | <0,10 | 0,10 | 1,54 |
| FeO | 0,92 | 0,44 | 0,44 | 0,28 | <0,10 | 0,24 | <0,10 | 1,20 |
| MnO | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,11 |
| MgO | 24,00 | 24,64 | 23,60 | 20,09 | 25,70 | 25,30 | 21,34 | 13,97 |
| CaO | 12,48 | 13,02 | 13,68 | 18,17 | 12,76 | 13,02 | 31,30 | 21,31 |
| Na ₂ O | 0,11 | 0,12 | 0,11 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,05 | 0,12 |
| K ₂ O | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,09 | 0,03 | 0,05 | <0,01 | 0,04 |
| P ₂ O ₅ | <0,10 | <0,10 | <0,10 | <0,10 | <0,10 | <0,10 | 0,87 | 0,15 |
| п,п,п | 4,70 | 4,39 | 4,65 | 8,81 | 3,16 | 3,03 | 44,72 | 7,11 |
| Σ | 99,70 | 99,44 | 99,76 | 100,05 | 99,24 | 100,00 | 99,45 | 99,97 |
| CO ₂ | - | - | 1,98 | 6,6 | 0,66 | 0,44 | 44,66 | 3,52 |
| S | - | - | <0,10 | <0,10 | <0,10 | <0,10 | <0,10 | <0,10 |
| F | 0 | 0 | 0,20 | 0,10 | 0,27 | 0,34 | 0,06 | 0,07 |
| Cr | 9 | 10 | <5 | <5 | 7 | 5,5 | 5 | 6 |
| V | - | - | 6 | 36 | 9 | 11 | 4,5 | 60 |
| Co | 10 | 18 | 11 | 11 | 9 | 41 | 19 | 13 |
| Ni | 22 | 25 | <3 | 4 | 3 | <3 | 3,5 | 7,7 |
| Cu | - | - | <3 | <3 | <3 | <3 | 3,5 | <3 |

Примечание: здесь и далее – нефрит: КС-18, КС-19, VI-14 светло-зеленый, КР-5-3-7 зеленовато-белый, РК-1 N белый с желтоватым оттенком, РК-3 коричневый; КР-81-1-3 – доломит, РК-1 S – эпидот-тремолитовый скарн.

Note: hereafter – nephrite: KS-18, KS-19, VI-14 is light green, KP-5-3-7 is white with a green tint, PK-1 N is white with a yellowish tinge, PK-3 is brown; KP-81-1-3 is dolomite, PK-1 S is epidote-tremolite skarn.

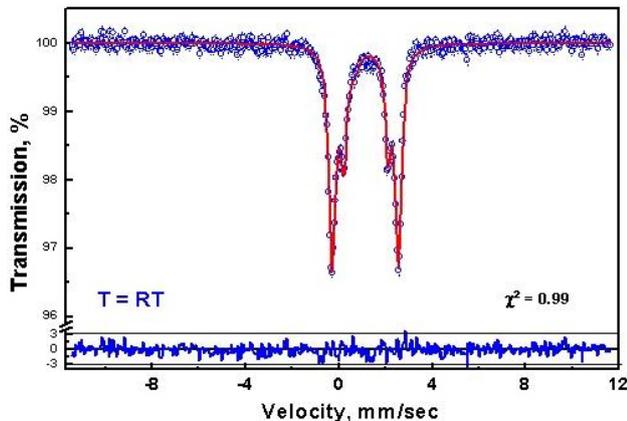


Рис. 4. Мёссбауэровский спектр образца нефрита КС-18, демонстрирующий отсутствие магнитоупорядоченных фаз атомов железа в минерале

Fig. 4. Mössbauer spectrum of the nephrite sample KS-18, demonstrating the absence of magnetically ordered phases of iron atoms in the mineral

Таблица 2. Содержание рассеянных элементов в породах, г/т

Table 2. Trace elements content in rocks, ppm

| № проб Sample no. | КС-18 | КС-19 | VI-14 | РК-3 | КР-5-3-7 | РК-1 N | РК-1 S | КР-81-1-3 |
|-------------------|---------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|-----------|
| Li | 6 | 2,6 | 4 | 5 | 10 | 7 | 16 | 1,3 |
| Be | 6,4 | 5 | 5,6 | 13 | 10 | 9 | 6,2 | 0,08 |
| Sc | 1,2 | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 34 | 2,4 |
| Ti | 60 | 60 | 17 | 50 | 30 | 30 | 4200 | 90 |
| V | 14 | 6 | 9 | 11 | 40 | 10 | 70 | 2,5 |
| Cr | 8 | 9 | 2,8 | 7 | 3 | 9 | 6 | 7 |
| Mn | 320 | 400 | 300 | 190 | 380 | 160 | 500 | 180 |
| Co | 12 | 8 | 21 | 42 | 14 | 11 | 21 | 22 |
| Ni | 18 | 16 | 23 | 19 | 27 | 19 | 34 | 50 |
| Cu | 5 | 6 | 1,9 | 1,8 | 2,9 | 1,9 | 16,6 | 5 |
| Zn | 50 | 30 | 50 | 30 | 50 | 17 | 110 | 12 |
| Ga | 1,5 | 1,2 | 1,4 | 1 | 2,6 | 1,3 | 22 | 0,4 |
| Ge | 0,5 | 0,5 | 1,1 | 0,7 | 1,2 | 0,7 | 1,8 | 0,026 |
| As | 103 | 104 | 0,44 | 0,36 | 0,41 | 0,21 | 1,9 | 1,5 |
| Se | 0,21 | 0,29 | 0,22 | 0,21 | 0,29 | 0,3 | 2,5 | 0,5 |
| Rb | 2,6 | 2,9 | 3,1 | 2,7 | 8 | 0,9 | 2 | 0,13 |
| Sr | 60 | 80 | 9 | 8 | 18 | 3,4 | 210 | 50 |
| Y | 1 | 5 | 0,7 | 1,5 | 0,7 | 3 | 80 | 0,9 |
| Zr | 1,4 | 2,8 | 1,9 | 0,5 | 2,2 | 0,6 | 69 | 12 |
| Nb | 1,7 | 0,4 | 0,6 | 0,41 | 0,2 | 0,4 | 60 | 0,7 |
| Mo | 0,17 | 0,26 | 0,08 | 0,05 | 0,15 | 0,028 | 2,6 | 0,09 |
| Ag | 0,017 | <0,0004 | 0,145 | 3,3 | 0,116 | 0,075 | 2,1 | 0,141 |
| Cd | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,04 | 0,13 | 0,06 |
| Sn | 0,47 | 0,28 | 0,035 | 0,023 | 0,036 | 0,24 | 4 | 0,08 |
| Sb | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,09 | 0,017 |
| Te | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 0,013 | <0,01 |
| Cs | 0,7 | 1 | 1,5 | 1 | 0,8 | 0,19 | 0,23 | 0,009 |
| Ba | 5,5 | 4 | 2,3 | 11 | 3,5 | 7 | 12 | 3,3 |
| La | 0,27 | 3 | 0,6 | 0,6 | 0,14 | 1,4 | 60 | 0,25 |
| Ce | 0,31 | 7 | 1,1 | 1,2 | 0,34 | 3,5 | 170 | 0,7 |
| Pr | 0,032 | 1,1 | 0,1 | 0,16 | 0,046 | 0,43 | 23 | 0,07 |
| Nd | 0,099 | 4,5 | 0,36 | 0,72 | 0,21 | 1,7 | 80 | 0,3 |
| Sm | 0,018 | 1,1 | 0,07 | 0,17 | 0,048 | 0,31 | 15 | 0,06 |
| Eu | 0,0052 | 0,24 | 0,011 | 0,026 | 0,019 | 0,051 | 2,7 | 0,017 |
| Gd | 0,021 | 1 | 0,068 | 0,16 | 0,055 | 0,32 | 14 | 0,074 |
| Tb | 0,004 | 0,14 | 0,012 | 0,028 | 0,01 | 0,05 | 1,8 | 0,011 |
| Dy | 0,038 | 0,8 | 0,07 | 0,16 | 0,07 | 0,28 | 10 | 0,07 |
| Ho | 0,014 | 0,15 | 0,017 | 0,033 | 0,014 | 0,06 | 2,2 | 0,018 |
| Er | 0,07 | 0,4 | 0,051 | 0,1 | 0,051 | 0,19 | 6 | 0,059 |
| Tm | 0,02 | 0,05 | 0,008 | 0,013 | 0,009 | 0,026 | 0,9 | 0,009 |
| Yb | 0,17 | 0,3 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,17 | 6 | 0,06 |
| Lu | 0,023 | 0,05 | 0,009 | 0,011 | 0,008 | 0,025 | 0,8 | 0,01 |
| Hf | 0,016 | 0,034 | 0,04 | 0,017 | 0,033 | 0,019 | 2,6 | 0,12 |
| Ta | 0,2 | 0,007 | 0,025 | 0,027 | 0,012 | 0,018 | 3,2 | 0,028 |
| W | 50 | 50 | 70 | 60 | 24 | 30 | 40 | 30 |
| Tl | 0,009 | 0,005 | 0,018 | 0,014 | 0,05 | 0,008 | 0,022 | 0,0031 |
| Pb | 2,8 | 4 | 2,4 | 2,4 | 3 | 2,1 | 4 | 4 |
| Bi | <0,0005 | <0,0005 | 0,0087 | 0,0013 | 0,0019 | 0,00104 | 0,094 | 0,037 |
| Th | 0,021 | 0,12 | 0,03 | 0,026 | 0,03 | 0,04 | 12,8 | 0,4 |
| U | 1,1 | 0,28 | 0,26 | 0,16 | 0,19 | 0,07 | 2,8 | 0,9 |

На рис. 5, 6 приведены мёссбауэровские спектры исследованного образца нефрита при температуре 295 и 80 К. Компоненты модельного спектра при комнатной температуре показаны цветными кривыми. Красной линией показан результирующий модельный спектр, полученный математической обработкой в приближении нескольких пар-

циальных компонент. В нижней части панели приведен разностный спектр между экспериментальным и модельным спектром, показывающий, что отклонения не превышают трех статистических ошибок, то есть в пределах 3σ . Математическая обработка спектров выявляет наличие, по крайней мере, трех основных парциальных дублетов. В структуре подобных минералов различают псевдо-октаэдрические узлы M1, M2, M3. Точечная симметрия узлов M1 и M2 соответствует оси второго порядка 2, тогда как точечная симметрия узла M3 – $2/m$. Существует также один катионный узел M4, окруженный восемью анионами с точечной симметрией 2, анионы, формирующие этот узел, расположены в виде искаженной квадратной антипризмы ([50]).

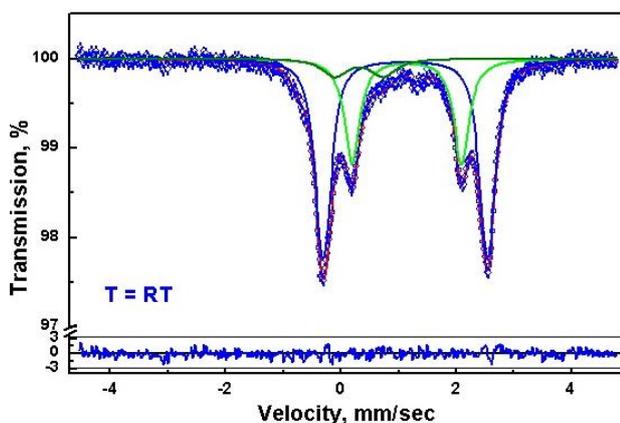


Рис. 5. Мёссбауэровские спектры образца нефрита KS-18 при температуре 295 К

Fig. 5. Mössbauer spectrum of a nephrite sample KS 18 at 295 K

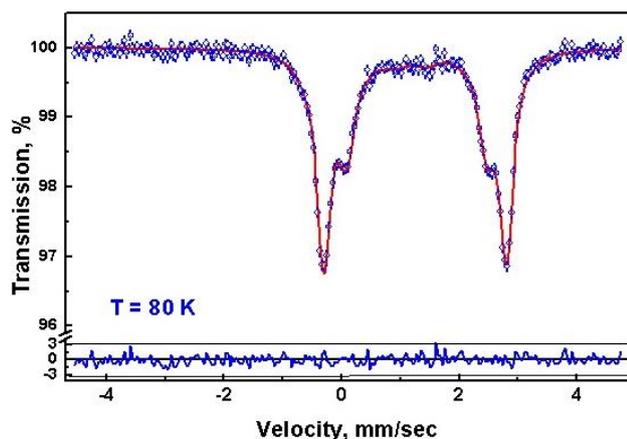


Рис. 6. Мёссбауэровские спектры образца нефрита KS-18 при температуре 80 К

Fig. 6. Mössbauer spectrum of a nephrite sample KS-18 at 80 K

Площадь дублета с наибольшим квадрупольным расщеплением составляет 58,4 %. Изомерный сдвиг (IS) этого дублета (D1) равен 1,12 мм/с, квадрупольное расщепление (QS) – 2,84 мм/с, ширина линии – порядка 0,34 мм/с. На рис. 5 он обозначен синей линией. Этот дублет может соответствовать ионам Fe^{2+} в октаэдрических позициях. Следующий по интенсивности дублет – D2 со сверхтонкими параметрами: IS=1,14 мм/с, QS=1,89 мм/с. Площадь этого дублета составляет 30,9 %, ширина линии – 0,31 мм/с. На рисунке он обозначен зеленой линией. Этот дублет также соответствует ионам Fe^{2+} , вероятно, располагающимся в позициях M4 [50]. В спектре выявляется также небольшой по площади дублет D3 (~8,4 %), имеющий сверхтонкие параметры (IS=0,31 мм/с, QS=0,84 мм/с), близкие к параметрам Fe^{3+} иона в октаэдрической позиции. Ширина линий этого дублета порядка 0,51 мм/с. На рисунке этот дублет показан оливковой линией.

Кроме этих трех основных компонент, в спектре наблюдается также небольшой узкий пик в области скорости 1,33 мм/с, соответствующий правой линии дублета со следующими сверхтонкими параметрами: IS=0,30 мм/с, QS=2,07 мм/с, $\Gamma=0,27$ мм/с. Площадь этого дублета составляет всего 2,3 %, поэтому эта компонента не показана на рис. 6. Понижение температуры до 80 К приводит к смещению изомерных сдвигов дублетов в сторону положительных скоростей за счет эффекта Доплера второго порядка и небольшому увеличению квадрупольных расщеплений, что характерно для ионов Fe^{2+} . В табл. 3 приведены сверхтонкие параметры выявленных дублетов при 295 и 80 К.

Таблица 3. Сверхтонкие параметры парциальных дублетов при температуре 295 и 80 К

Table 3. Ultrathin Hyperfine parameters of the partial doublets at 295 and 80 K

| T, K | D1 | | D2 | | D3 | |
|------|---------------|------|------|------|------|------|
| | IS | QS | IS | QS | IS | QS |
| | мм/сек/мм/сек | | | | | |
| 295 | 1,12 | 2,84 | 1,14 | 1,89 | 0,31 | 0,84 |
| 80 | 1,25 | 3,11 | 1,26 | 2,40 | 0,37 | 1,08 |

Следует отметить, что для дублетов D1 и D2 температурный сдвиг изомерного сдвига примерно одинаков, что свидетельствует о равной жесткости связи этих ионов Fe^{2+} с локальным окружением. Однако температурное изменение квадрупольного расщепления для ионов железа в позиции M4 почти в два раза больше по сравнению с изменением QS для ионов Fe^{2+} в октаэдрической позиции. Вероят-

но, это связано с особенностями структуры энергетических уровней ионов Fe^{2+} в позиции М4.

Общая особенность оптических спектров поглощения нефрита Воймаканского месторождения – наличие широкой полосы поглощения малой интенсивности в видимой области в районе 650–670 нм (рис. 7). По результатам исследования нефрита мессбауэровской спектроскопией можно сделать вывод, что данная полоса связана с механизмом переноса заряда между разновалентными ионами железа, которые располагаются в соседних октаэдрических позиция $\text{Fe}^{2+}_{\text{VI}} \rightarrow \text{Fe}^{3+}_{\text{VI}}$. В ультрафиолетовой области находится интенсивная полоса поглощения, связанная с механизмом переноса заряда $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{2+}_{(\text{VI},\text{VIII})}$, длинноволновый край которой протягивается в видимую область.

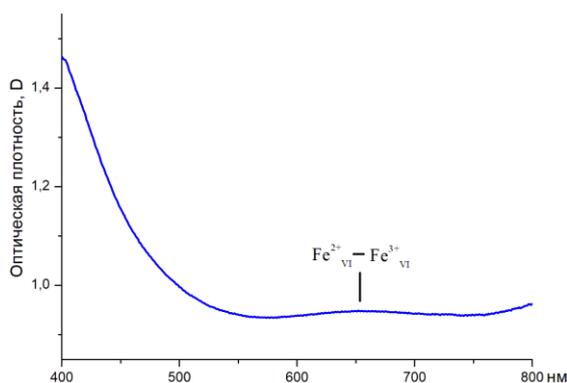


Рис. 7. Оптический спектр поглощения образца нефрита Воймаканского месторождения

Fig. 7. Optical absorption spectrum of a nephrite sample from the Voimakansky deposit

Люминесцентная спектроскопия показала преимущественное расположение ионов Mn^{2+} в позиции кальция, а также незначительное расположение ионов Mn^{2+} в октаэдрических позициях минерала (рис. 8). Результаты ЭПР спектроскопии также подтвердили данные выводы (рис. 9). Методом ЭПР было выявлено также расположение ионов Fe^{3+} в позиции кремния (рис. 10).

Таким образом, по данным мессбауэровской и оптической спектроскопии выявлено, что железо в нефрите находится в виде ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} в различных позициях в структуре минерала, а именно 58,4 % Fe^{2+} располагается в октаэдрических позициях М₁–М₃, 30,9 % Fe^{2+} располагается в позиции восьмерной координации М₄, 8,4 % Fe^{3+} располагается в октаэдрических позициях М₁–М₃. Эти данные согласуются с полосами в оптических спектрах поглощения, что и создает окраску в изучаемых нефритах. ЭПР и люминесцентная спектроскопия показала, что ионы Mn^{2+} располагаются в двух неэквивалентных позициях.

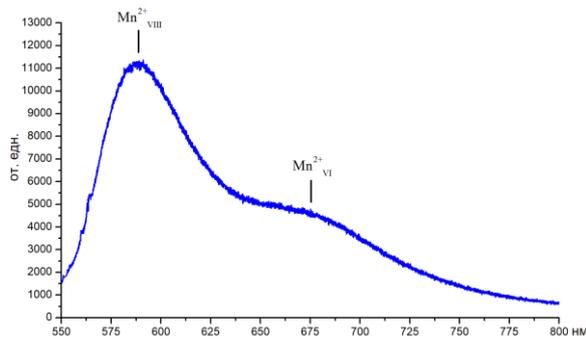


Рис. 8. Спектр люминесценции образца нефрита Воймаканского месторождения

Fig. 8. Luminescence spectrum of a nephrite sample from the Voimakansky deposit

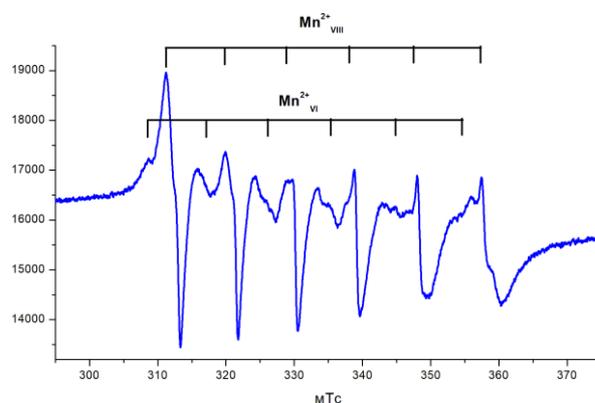


Рис. 9. Спектр ЭПР образца нефрита Воймаканского месторождения в диапазоне 300–370 мТс

Fig. 9. EPR spectrum of the Voimakansky nephrite sample in the range of 300–370 mT

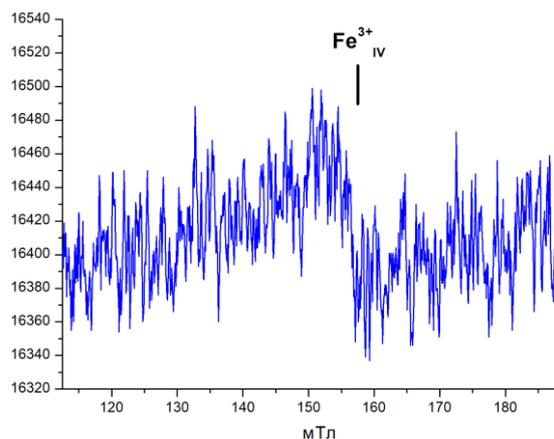


Рис. 10. Спектр ЭПР образца нефрита Воймаканского месторождения в диапазоне 140–170 мТс

Fig. 10. Th EPR spectrum of the Voimakansky nephrite sample is in the range of 140–170 mT

Получены результаты оценки окраски светло-салатного нефрита по цветовой системе CIELab (табл. 4).

Таблица 4. Оценка окраски по цветовой системе CIE Lab
Table 4. Assessment of colour according to the CIE Lab color system

| L | a | B |
|-------|-------|------|
| KS-18 | | |
| 48,35 | -3,29 | 3,83 |
| 49,40 | -3,31 | 4,56 |
| 50,57 | -3,47 | 4,95 |
| 51,34 | -3,83 | 6,76 |
| 48,59 | -3,54 | 4,22 |
| KS-19 | | |
| 49,97 | -4,85 | 0,36 |
| 49,78 | -5,49 | 0,80 |
| 49,76 | -5,07 | 0,52 |
| 48,99 | -4,97 | 0,64 |
| 48,60 | -4,77 | 0,80 |

Обсуждение

Качественные характеристики нефрита Воймаканского месторождения показывают, что он соответствует действующим требованиям по качеству и возможности применения к поделочному нефриту II сорта согласно техническими условиями ТУ 41-07-052-90 «Камни цветные природные в сырье». Отличительная особенность нефрита Воймаканского месторождения – интенсивное замещение хлоритом, и особенно тальком, вплоть до полного оталькования, что значительно ухудшает качество сырья.

Особенности геологии месторождения и рудных залежей, структуры и текстуры пород Воймаканского месторождения типичны для Витимской нефритоносной провинции [45, 46, 48]. Спецификой Воймаканского месторождения можно считать широкое развитие в нефритоносных телах диопсидита. Порода обладает декоративностью – диопсидит цвета слоновой кости содержит линзочки, затейливые прослои нефрита серого, светло-зеленого, светло-коричневого цвета, принимает зеркальную полировку. Такой диопсидит может использоваться как камнесамоцветное сырье для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций.

Причины окраски нефрита – предмет детальных исследований, поскольку цвет – один из главных показателей качества камнесамоцветного сырья. Нефрит Воймаканского месторождения разнообразных оттенков отличается по химическому составу. По мере увеличения содержания суммарного железа в валовых пробах нефрита Воймаканского месторождения окраска изменяется от коричневой до светло-зеленой: коричневый – 0,28 мас. % $Fe_2O_{3общ.}$, белый с желтоватым оттенком – 0,34 мас. % $Fe_2O_{3общ.}$, белый со светло-зеленым оттенком – 0,41 мас. % $Fe_2O_{3общ.}$, светло-зеленый – 0,54, 0,66, 1,36 мас. % $Fe_2O_{3общ.}$ (табл. 1). Степень зеленого оттенка усиливается с увеличением содержания железа. Этот эффект связан с содержанием именно двухвалентного железа: у белого с желтоватым оттенком <0,10 мас. % FeO; коричневого – 0,24 мас. % FeO;

белого со светло-зеленым оттенком – 0,28 мас. % FeO; светло-зеленого – 0,44, 0,44, 0,92 мас. % FeO (табл. 1). Увеличение содержания трехвалентного железа не сказывается на окраске: у белого с салатным оттенком – 0,10 мас. % Fe_2O_3 ; светло-зеленого – <0,1, 0,17, 0,34; белого с желтоватым оттенком – 0,24 (табл. 1, рис. 11).

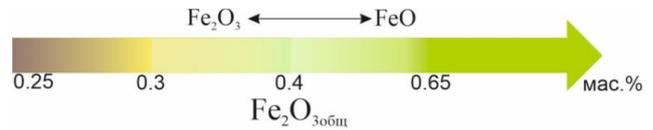


Рис. 11. Изменение окраски нефрита: с увеличением содержания железа усиливается степень зеленого оттенка, окраска нефрита изменяется от коричневой до светло-зеленой

Fig. 11. Change in nephrite color: with iron content growth, the degree of green hue increases, the color of nephrite changes from brown to light green

При этом в коричневом нефрите зафиксировано <0,10 мас. % Fe_2O_3 , хотя коричневую окраску нефрита традиционно связывают с переходом железа из двухвалентного в трехвалентное состояние [46], развитием оксидов и гидроксидов железа [51, 52] в связи с гипергенными изменениями. Но коричневый образец РК-3 практически мономинеральный – отмечена лишь небольшая жилка хлорита. Образец отличается повышенными содержаниями трех рассеянных элементов: 42 г/т Co, 11 г/т Ba, 3,3 г/т Ag (табл. 2), но возможная роль этих элементов как хромофоров сомнительна. В коричневом нефрите Кавоктинского месторождения повышенные содержания этих элементов не зафиксированы [48].

Общая особенность оптических спектров поглощения нефрита Ваймаканского месторождения – наличие широкой полосы поглощения малой интенсивности в видимой области в районе 650–670 нм (рис. 7). Результаты исследования нефрита мессбауровской спектроскопией свидетельствуют, что эта полоса связана с механизмом переноса заряда между разновалентными ионами железа, которые располагаются в соседних октаэдрических позиции $Fe^{2+}_{VI} \rightarrow Fe^{3+}_{VI}$. При этом общее содержание трехвалентного железа остается недостаточным для определения силикатным анализом, хотя и определяет коричневую окраску нефрита, вторичные минералы железа не зафиксированы.

Заключение

Нефрит соответствует действующим требованиям по качеству и возможности применения в качестве камнесамоцветного сырья. Развито интенсивное замещение хлоритом, и особенно тальком, что

значительно ухудшает качество сырья. Диопсидит с линзочками, затейливыми прослоями нефрита серого, светло-зеленого, светло-коричневого цвета может использоваться как камнесамоцветное сырье для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций.

Железо в нефрите находится в виде ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} в различных позициях в структуре минерала, а именно 58,4 % Fe^{2+} располагается в октаэдрических позициях M_1 – M_3 , 30,9 % Fe^{2+} располагается в позиции восьмерной координацией M_4 , 8,4 % Fe^{3+} рас-

полагается в октаэдрических позициях M_1 – M_3 . Эти данные согласуются с полосами в оптических спектрах поглощения, что и создает окраску в изучаемых нефритах. ЭПР и люминесцентная спектроскопия показала, что ионы Mn^{2+} располагаются в двух неэквивалентных позициях. Кристаллохимические исследования подтверждают, что степень зеленого оттенка нефрита усиливается с ростом содержания Fe^{2+} , а коричневую окраску нефрита определяет вхождение Fe^{3+} в структуру тремолита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chemical zone of nephrite in Alamas, Xinjiang, China / Y. Liu, J. Deng, G.H. Shi, T. Lu., H. He, Y.-N. Ng, C. Shen, L. Yang, Q. Wang // *Resource Geology*. – 2010. – Vol. 60. – P. 249–259. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00135.x>
2. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China / Y. Liu, J. Deng, G. Shi, X. Sun, L. Yang // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 42. – P. 440–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.05.012>
3. Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit / Y. Liu, R. Zhang, Zh. Zhang, G. Shi, Q. Zhang, M. Abuduwayiti, J. Liu // *Lithos*. – 2015. – Vol. 212–215. – P. 128–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.002>
4. Formation of the nephrite deposit with five mineral assemblage zones in the Central Western Kunlun Mountains, China / X. Zhang, G. Shi, X. Zhang, G. Gao // *Journal of Petrology*. – 2022. – Vol. 63. – egac117. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egac117>
5. Preliminary study on forgery identification of Hetian Jade with Instrumental Neutron Activation Analysis / K. Nangeelil, P. Dimpfl, M. Mamtimin, S. Huang, Z. Sun // *Applied Radiation and Isotopes* – 2023. – Vol. 191. – 110535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110535>
6. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China / Y. Liu, J. Deng, G. Shi, X. Sun, L. Yang // *Ore Geology Reviews*. – 2011. – Vol. 41. – P. 122–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.004>
7. SHRIMP U-Pb zircon ages, mineral compositions and geochemistry of placer nephrite in the Yurungkash and Karakash River deposits, West Kunlun, Xinjiang, northwest China: implication for a Magnesium Skarn / Y. Liu, R.-Q. Zhang, M. Abuduwayiti, C. Wang., S. Zhang, C. Shen, Z. Zhang, M. He, Y. Zhang, X. Yang // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – Vol. 72. – P. 699–727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.023>
8. Jing Y., Liu Y. Genesis and mineralogical studies of zircons in the Alamas, Yurungkash and Karakash Rivers nephrite deposits, Western Kunlun, Xinjiang, China // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 149. – 105087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105087>
9. Constraints on crystallinity of graphite inclusions in nephrite jade from Xinjiang, Northwest China: implications for Nephrite Jade formation temperatures / J. Zheng, L. Chen, C. Zhang, Y. Liu, R. Tian, J. Wu, Y. Wu, S. Zhang // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – 1403. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13111403>
10. The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, northwest China / K. Gao, G. Shi, M. Wang, G. Xie, J. Wang, X. Zhang, T. Fang, W. Lei, Y. Liu // *Geoscience Frontiers*. – 2019. – Vol. 10. – P. 1597–1612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.10.008>
11. Mineralogy and geochemistry of nephrite jade from Yinggelike deposit, Altyn Tagh (Xinjiang, NW China) / Y. Jiang, G. Shi, L. Xu, X. Li // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – 418. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10050418>
12. Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China / X. Liu, G. Gil, Y. Liu, X. He, M. Syczewski, B. Baginski, T. Fang, X. Shu // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – Vol. 131. – 103972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103972>
13. Polysynthetic twinning of diopsides in the Niewang and Tatliksu nephrite deposits, Xinjiang, China / H. Liang, G. Shi, Y. Yuan, C., Cao X Sun., X. Zhang // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – 1575. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121575>
14. A new type of white nephrite from limestone replacement along the Kunlun–Altyn Tagh mountains: a case from the Mida Deposit, Qiemo County, Xinjiang, China / T. Jiang, G. Shi, D. Ye, X. Zhang, L. Zhang, H. Han // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13. – 1677. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13121677>
15. Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: insights from spectroscopic and compositional analyses / H. Yu, R. Wang, J. Guo, J. Li, X. Yang // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. – 2016. – Vol. 111. – P. 313–325. DOI: <https://doi.org/10.2465/jmps.151103>
16. Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China / H.Y. Yu, R.C. Wang, J.C. Guo, J.G. Li, X.W. Yang // *Science China Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 59. – P. 1597–1609. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-015-0231-8>
17. Gong N., Wang C., Xu S. Color origin of greyish-purple tremolite jade from Sanchahe in Qinghai Province, NW China // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – 1049. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13081049>
18. Gao S., Bai F., Heide G. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tieli, China // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 107. – P. 155–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.016>
19. Xu H., Bai F. Origin of the subduction-related Tieli nephrite deposit in Northeast China: Constraints from halogens, trace elements, and Sr isotopes in apatite group minerals // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 142. – 104702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104702>

20. Xu H., Bai F., Jiang D. Geochemical characteristics and composition changes of tremolite at various stages in the mineralization process of nephrite from Tieli, Heilongjiang, Northeastern China // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – Vol. 14. – P. 204. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06578-6>
21. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, Northeast China / F. Bai, G. Li, J. Lei, J. Sun // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 115. – P. 103171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103171>
22. Zhang C., Yu X., Jiang T. Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, northeast China: Implications for metamorphic conditions and ore genesis // *Geoscience Frontiers*. – 2019. – Vol. 10. – P. 425–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.009>
23. Zheng F., Liu Y., Zhang H.-Q. The petrogeochemistry and zircon U-Pb age of nephrite placer deposit in Xiuyan, Liaoning // *Rock and Mineral Analysis*. – 2019. – Vol. 38. – P. 438–448. DOI: <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.201807310089>
24. Evidences from infrared and Raman spectra: Xiaomeiling is one reasonable provenance of nephrite materials used in Liangzhu Culture / P. Li, Z. Liao, Zh. Zhou, Q. Wu // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2021. – Vol. 261. – P. 120012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120012>
25. Li P., Liao Z., Zhou Zh. The residual geological information in Liangzhu jades: Implications for their provenance // *Proceedings of the Geologists' Association*. – 2022. – Vol. 133. – P. 256–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2022.04.003>
26. Age determination of nephrite by in-situ SIMS U-Pb dating syngenetic titanite: a case study of the nephrite deposit from Luanchuan, Henan, China / X.-X. Ling, E. Schmädicke, Q.-L. Li, J. Gose, R.-Y. Wu, S.-Q. Wang, Y. Liu, G.-C. Tang, X.-H. Li // *Lithos*. – 2015. – Vol. 220–223. – P. 289–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.019>
27. Integrated interpretation of pXRF data on ancient nephrite artifacts excavated from Tomb No. 1 in Yuehe Town, Henan Province, China / D. Chen, Y. Yang, B. Qiao, J. Li, W. Luo // *Heritage Science*. – 2022. – Vol. 10. – P. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00642-w>
28. Nephrite jade from Guangxi province, China / Z. Yin, C. Jiang, M. Santosh, Y. Chen, Y. Bao, Q. Chen // *Gems and Gemology*. – 2014. – Vol. 50. – P. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.50.3.228>
29. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China / Q. Zhong, Z. Liao, L. Qi, Zh. Zhou // *Gems and Gemology*. – 2019. – Vol. 55. – P. 198–215. DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.55.2.198>
30. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of green nephrite from Dahua, Guangxi, Southern China / B. Bai, J. Du, J. Li, B. Jiang // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 118. – P. 103362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103362>
31. Gemmological and mineralogical characteristics of nephrite from Longxi, Sichuan Province / W. Wang, Z. Liao, Z. Zhou, J. Shang, P. Li, D. Cui, L. Li, Q. Chen // *Journal of Gems and Gemmology*. – 2022. – Vol. 24. – P. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.15964/j.cnki.027jgg.2022.01.003>
32. Spectroscopic characteristics of Longxi nephrite from Sichuan and its color genesis / W.-l. Fu, H. Lu, J. Chai, Z.-y. Sun // *Spectroscopy and spectral analysis*. – 2023. – Vol. 43. – P. 1408–1412. DOI: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2023\)05-1408-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2023)05-1408-05)
33. Discussing the coloration mechanism of Luodian Jade from Guizhou / L. Wang, J.H. Lin., T.P. Ye, J. Tan, B. Wang, L. Yang // *Open Access Library Journal*. – 2020. – Vol. 7. – P. e6364. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1106364>
34. Geochemical characteristics and ore-forming mechanism of Luodian nephrite deposit, Southwest China and comparison with other nephrite deposits in Asia / N. Li, F. Bai, L. Xu, Y. Che // *Ore Geology Reviews*. – 2023. – Vol. 160. – P. 105604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105604>
35. Yui T.-F., Kwon S.-T. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea // *Economic Geology*. – 2002. – Vol. 97. – P. 593–601. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.593>
36. Feng Y., He X., Jing Y. A new model for the formation of nephrite deposits: a case study of the Chuncheon nephrite deposit, South Korea // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 141. – P. 104655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104655>
37. Geochemical characteristics of Nephrite from Chuncheon, South Korea: implications for geographic origin determination of nephrite from dolomite-related deposits / N. Li, F. Bai, Q. Peng, M. Liu // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1468. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13101468>
38. Nichol D. Two contrasting nephrite jade types // *Journal of Gemmology*. – 2000. – Vol. 27. – P. 193–200.
39. Tan T.L., Ng N.N., Lim N.C. Studies on nephrite and jadeite jades by Fourier transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopic techniques // *Cosmos*. – 2013. – Vol. 9. – P. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
40. Adamo I., Bocchio R. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: review and update // *Gems and Gemology*. – 2013. – Vol. 49. – P. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.49.2.98>
41. Raman and FTIR spectra of nephrites from the Złoty Stok and Jordanów Śląski (the Sudetes and Fore-Sudetic Block, SW Poland) / I. Korybska-Sadło, G. Gil, P. Gunia, M. Horszowski, M. Sitarz // *Journal of Molecular Structure*. – 2018. – Vol. 1166. – P. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.020>
42. Gil G., Barnes J.D., Boschi C. Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin // *Canadian Mineralogist*. – 2015. – Vol. 53. – P. 533–556. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.1500018>
43. 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 / G. Gil, B. Bagiński, P. Gunia, S. Madej, M. Sachanbiński, P. Jokubauskas, Z. Belka // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 118. – P. 103335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103335>
44. Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса / М.В. Бурцева, Г.С. Рипп, В.Ф. Посохов, А.Е. Мурзинцева // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56. – № 3. – С. 516–527. DOI: [10.15372/GiG20150303](https://doi.org/10.15372/GiG20150303)
45. Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. Месторождения нефритов. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. – 377 с.
46. Гомбоев Д.М., Андросов П.В., Кислов Е.В. Кавоктинское месторождение светлоокрашенного нефрита: условия залегания и особенности вещественного состава // *Разведка и охрана недр*. – 2017. – № 9. – С. 44–50.

47. Физико-химические особенности флюидов, сформировавших апогипербазитовые и апокарбонатные нефриты / А.А. Филиппова, А.С. Мехоношин, В.А. Бычинский, К.В. Чудненко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 168–178. DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3112
48. Кислов Е.В., Худякова Л.И., Николаев А.Г. Отходы переработки аподоломитового нефрита и направление их использования // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8. – № 2. – С. 195–206. DOI: doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75
49. Кодочигов В.С., Курбатов С.Л. Отчет о поисково-оценочных работах на Воймаканском проявлении апокарбонатного нефрита за 2011–2014 гг., с подсчетом запасов по состоянию на 1.02.2014 г. – Улан-Удэ, 2014.
50. Spectroscopic and related evidence on the coloring and constitution of New Zealand jade / C.J. Wilkins, W.C. Tennant, B.E. Williamson, C.A. McCammon // American Mineralogist. – 2003. – Vol. 88. – P. 1336–1344. DOI: 10.2138/am-2003-8-917
51. Медведев В.Я., Иванова Л.А. Флюидный режим нефритообразования. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сиб. отд-ние, 1989. – 129 с.
52. The genesis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pishan brown nephrite bearing Mg-skarn deposit in Xinjiang / X.-F. Liu, Y. Liu, Z.-J. Li, A. Maituohuti, G.-Y. Tian, D.-X. Guo // Acta Petrologica et Mineralogica. – 2017. – Vol. 36. – P. 259–273.

Информация об авторах

Евгений Владимирович Кислов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; <https://orcid.org/0000-0003-2266-0942>; evg-kislov@ya.ru

Ирина Станиславовна Гончарук, студент Института естественных наук Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова, Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а; лаборант Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; goncarukirina993@gmail.com

Анатолий Германович Николаев, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5; <http://orcid.org/0000-0002-8082-6536>; anatolij-nikolaev@yandex.ru

Фарит Габдулхакович Вагизов, кандидат физико-математических наук, доцент Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а; <http://orcid.org/0000-0001-7965-1583>; vagizovf@gmail.com

Владислав Владимирович Вантеев, аспирант Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; vanteev997@mail.ru

Наиля Мидхатовна Хасанова, кандидат физико-математических наук, инженер Научно-исследовательской лаборатории методов увеличения нефтеотдачи Научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты» (головной центр) Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>; nailia.khasanova@kpfu.ru

Поступила в редакцию: 19.02.2024

Поступила после рецензирования: 25.02.2024

Принята к публикации: 05.11.2024

REFERENCES

1. Liu Y., Deng J., Shi G.H., Lu T., He H., Ng Y.-N., Shen C., Yang L., Wang Q. Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China. *Resource Geology*, 2010, vol. 60, pp. 249–259. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00135.x>
2. Liu Y., Deng J., Shi G., Sun X., Yang L. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, vol. 42, pp. 440–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.05.012>
3. Liu Y., Zhang R., Zhang Zh., Shi G., Zhang Q., Abuduwayiti M., Liu J. Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: implications for the genesis of a magnesian skarn deposit. *Lithos*, 2015, vol. 212–215, pp. 128–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.002>
4. Zhang X., Shi G., Zhang X., Gao G. Formation of the nephrite deposit with five mineral assemblage zones in the Central Western Kunlun Mountains, China. *Journal of Petrology*, 2022, vol. 63, egac117. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egac117>
5. Nangeelil K., Dimpfl P., Mamtimin M., Huang S., Sun Z. Preliminary study on forgery identification of Hetian Jade with Instrumental Neutron Activation Analysis. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, vol. 191, 110535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110535>
6. Liu Y., Deng J., Shi G., Sun X., Yang L. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China. *Ore Geology Reviews*, 2011, vol. 41, pp. 122–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.004>
7. Liu Y., Zhang R.-Q., Abuduwayiti M., Wang C., Zhang S., Shen C., Zhang Z., He M., Zhang Y., Yang X. SHRIMP U-Pb zircon ages, mineral compositions and geochemistry of placer nephrite in the Yurungkash and Karakash River deposits, West Kunlun, Xinjiang, northwest China: implication for a Magnesium Skarn. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 699–727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.023>

8. Jing Y., Liu Y. Genesis and mineralogical studies of zircons in the Alamas, Yurungkash and Karakash Rivers nephrite deposits, Western Kunlun, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 149, 105087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105087>
9. Zheng J., Chen L., Zhang C., Liu Y., Tian R., Wu J., Wu Y., Zhang S. Constraints on Crystallinity of Graphite Inclusions in Nephrite Jade from Xinjiang, Northwest China: implications for Nephrite Jade Formation Temperatures. *Minerals*, 2023, vol. 13, 1403. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13111403>
10. Gao K., Shi G., Wang M., Xie G., Wang J., Zhang X., Fang T., Lei W., Liu Y. The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, northwest China. *Geoscience Frontiers*, 2019, vol. 10, pp. 1597–1612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.10.008>
11. Jiang Y., Shi G., Xu L., Li X. Mineralogy and geochemistry of nephrite jade from Yinggelike deposit, Altyn Tagh (Xinjiang, NW China). *Minerals*, 2020, vol. 10, 418. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10050418>
12. Liu X., Gil G., Liu Y., He X., Syczewski M., Bagiński B., Fang T., Shu X. Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131, 103972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103972>
13. Liang H., Shi G., Yuan Y., Cao C., Sun X., Zhang X. Polysynthetic twinning of diopsides in the Niewang and Tatliksu nephrite deposits, Xinjiang, China. *Minerals*, 2022, vol. 12, 1575. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121575>
14. Jiang T., Shi G., Ye D., Zhang X., Zhang L., Han H. A New Type of White Nephrite from Limestone Replacement along the Kunlun–Altyn Tagh Mountains: a case from the Mida Deposit, Qiemo County, Xinjiang, China. *Crystals*, 2023, vol. 13, 1677. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13121677>
15. Yu H., Wang R., Guo J., Li J., Yang X. Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: insights from spectroscopic and compositional analyses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2016, vol. 111, pp. 313–325. DOI: <https://doi.org/10.2465/jmps.151103>
16. Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C., Li J.G., Yang X.W. Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China. *Science China Earth Sciences*, 2016, vol. 59, pp. 1597–1609. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-015-0231-8>
17. Gong N., Wang C., Xu S. Color origin of greyish-purple tremolite jade from Sanchahe in Qinghai Province, NW China. *Minerals*, 2023, vol. 13, 1049. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13081049>
18. Gao S., Bai F., Heide G. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tieli, China. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, 155–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.016>
19. Xu H., Bai F. Origin of the subduction-related Tieli nephrite deposit in Northeast China: Constraints from halogens, trace elements, and Sr isotopes in apatite group minerals. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 142, 104702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104702>
20. Xu H., Bai F., Jiang D. Geochemical characteristics and composition changes of tremolite at various stages in the mineralization process of nephrite from Tieli, Heilongjiang, Northeastern China. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, 204. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06578-6>
21. Bai F., Li G., Lei J., Sun J. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, Northeast China. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 115, 103171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103171>
22. Zhang C., Yu X., Jiang T. Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, northeast China: implications for metamorphic conditions and ore genesis. *Geoscience Frontiers*, 2019, vol. 10, pp. 425–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.009>
23. Zheng F., Liu Y., Zhang H.-Q. The petrogeochemistry and zircon U-Pb age of nephrite placer deposit in Xiuyan, Liaoning. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, vol. 38, pp. 438–448. (In Chinese). DOI: <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.201807310089>
24. Li P., Liao Z., Zhou Zh., Wu Q. Evidences from infrared and Raman spectra: Xiaomeiling is one reasonable provenance of nephrite materials used in Liangzhu Culture. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, vol. 261, 120012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120012>
25. Li P., Liao Z., Zhou Zh. The residual geological information in Liangzhu jades: Implications for their provenance. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2022, vol. 133, pp. 256–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2022.04.003>
26. Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L., Gose J., Wu R.-Y., Wang S.-Q., Liu Y., Tang G.-C., Li X.-H. Age determination of nephrite by in-situ SIMS U-Pb dating syngenetic titanite: a case study of the nephrite deposit from Luanchuan, Henan, China. *Lithos*, 2015, vol. 220–223, pp. 289–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.019>
27. Chen D., Yang Y., Qiao B., Li J., Luo W. Integrated interpretation of pXRF data on ancient nephrite artifacts excavated from Tomb No. 1 in Yuehe Town, Henan Province, China. *Heritage Science*, 2022, 10, 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00642-w>
28. Yin Z., Jiang C., Santosh M., Chen Y., Bao Y., Chen Q. Nephrite jade from Guangxi province, China. *Gems and Gemology*, 2014, vol. 50, pp. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.50.3.228>
29. Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China. *Gems and Gemology*, 2019, vol. 55, pp. 198–215. DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.55.2.198>
30. Bai B., Du J., Li J., Jiang B. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of green nephrite from Dahua, Guangxi, Southern China. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 118, 103362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103362>
31. Wang W., Liao Z., Zhou Z., Shang J., Li P., Cui D., Li L., Chen Q. Gemmological and mineralogical characteristics of nephrite from Longxi, Sichuan Province. *Journal of Gems and Gemology*, 2022, vol. 24, pp. 20–27. (In Chinese). DOI: <https://doi.org/10.15964/j.cnki.027jgg.2022.01.003>
32. Fu W.-l., Lu H., Chai J., Sun Z.-y. Spectroscopic characteristics of Longxi nephrite from Sichuan and its color genesis. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2023, vol. 43, pp. 1408–1412. (In Chinese). DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2023\)05-1408-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2023)05-1408-05)
33. Wang L., Lin J.H., Ye T.P., Tan J., Wang B., Yang L. Discussing the coloration mechanism of Luodian Jade from Guizhou. *Open Access Library Journal*, 2020, vol. 7, e6364. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1106364>

34. Li N., Bai F., Xu L., Che Y. Geochemical characteristics and ore-forming mechanism of Luodian nephrite deposit, Southwest China and comparison with other nephrite deposits in Asia. *Ore Geology Reviews*, 2023, vol. 160, 105604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105604>
35. Yui T.-F., Kwon S.-T. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea. *Economic Geology*, 2002, vol. 97, pp. 593–601. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.593>
36. Feng Y., He X., Jing Y. A new model for the formation of nephrite deposits: a case study of the Chuncheon nephrite deposit, South Korea. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 141, 104655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104655>
37. Li N., Bai F., Peng Q., Liu M. Geochemical characteristics of nephrite from Chuncheon, South Korea: implications for geographic origin determination of nephrite from dolomite-related deposits. *Crystals*, 2023, vol. 13, 1468. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13101468>
38. Nichol D. Two contrasting nephrite jade types. *The Journal of Gemmology*, 2000, vol. 27, pp. 193–200.
39. Tan T.L., Ng N.N., Lim N.C. Studies on nephrite and jadeite jades by Fourier transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopic techniques. *Cosmos*, 2013, vol. 9, pp. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
40. Adamo I., Bocchio R. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: review and update. *Gems and Gemology*, 2013, vol. 49, pp. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.49.2.98>
41. Korybska-Sadło I., Gil G., Gunia P., Horszowski M., Sitarz M. Raman and FTIR spectra of nephrites from the Złoty Stok and Jordanów Śląski (the Sudetes and Fore-Sudetic Block, SW Poland). *Journal of Molecular Structure*, 2018, vol. 1166, pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.020>
42. Gil G., Barnes J.D., Boschi C. Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin. *Canadian Mineralogist*, 2015, vol. 53, pp. 533–556. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.1500018>
43. Gil G., Bagiński B., Gunia P., Madej S., Sachanbiński 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 Geology Reviews*, 2020, vol. 118, 103335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103335>
44. Burtseva M.V., Ripp G.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. Nephrites of East Siberia: geochemical features and problems of genesis. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 402–410. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2015.02.003>
45. Sutorin A.N., Zamaletdinov R.S., Sekerina N.V. *Deposits of nephrite*. Irkutsk, ISU Publ. house, 2015. 377 p. (In Russ.)
46. Gomboev D.M., Androsov V.P., Kislov E.V. Kavokta deposit of light-colored nephrite: occurrence and characteristics of the composition. *Prospect and protection of mineral resources*, 2017, no. 9, pp. 44–50. (In Russ.)
47. Filippova A.A., Mekhonoshin A.S., Bychinsky V.A., Chudnenko K.V. Physico-chemical features of fluides, which formed apohyperbasite, and apocarbonate jades. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 168–178. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3112
48. Kislov E.V., Khudyakova L.I., Nikolaev A.G. Dolomite type nephrite processing wastes and their application. *Mining Science and Technology (Russia)*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 195–206. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>
49. Kodachigov V.S., Kurbatov S.L. *Report on the prospecting and evaluation work on the Voimakan locality of carbonate type nephrite for 2011–2014, with the calculation of reserves as of 1.02.2014*. Ulan-Ude, 2014 (In Russ.)
50. Wilkins C.J., Tennant W.C., Williamson B.E., McCammon C.A. Spectroscopic and related evidence on the coloring and constitution of New Zealand jade. *American Mineralogist*, 2003, vol. 88, pp. 1336–1344. DOI: 10.2138/am-2003-8-917
51. Medvedev V.Ya., Ivanova L.A. *Fluid mode of nephrite formation*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 129 p. (In Russ.)
52. Liu X.-F., Liu Y., Li Z.-J., Maituohuti A., Tian G.-Y., Guo D.-X. The genesis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pishan brown nephrite bearing Mg-skarn deposit in Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, vol. 36, pp. 259–273. (In Chinese).

Information about the authors

Evgeny V. Kislov, Cand. Sc., Leading Researcher, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; evg-kislov@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2266-0942>

Irina S. Goncharuk, Student, D. Banzarov Buryat State University, 24a, Smolin street, Ulan-Ude, 670000, Russian Federation; Laboratory Assistant, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; goncarukirina993@gmail.com

Anatoly G. Nikolaev, Cand. Sc., Associate Professor, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation; anatolij-nikolaev@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8082-6536>

Farit G. Vagizov, Cand. Sc., Associate Professor, Kazan Federal University, 16a, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation; vagizovf@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-7965-1583>

Vladislav V. Vanteev, Postgraduate Student, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; vanteev997@mail.ru

Nailia M. Khasanova, Cand. Sc., Engineer, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation; nailia.khasanova@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Received: 19.02.2024

Revised: 25.02.2024

Accepted: 05.11.2024