

УДК 549.01:553.89

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-4-609-628

Минеральный состав и модель формирования аподоломитового нефрита Воймаканского месторождения, Средне-Витимская горная страна

Е. В. Кислов¹, И. С. Гончарук^{1,2}, В. В. Вантеев¹

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба

²Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Институт естественных наук, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

Поступила в редакцию 26.01.2024 г., принята к печати 13.03.2024 г.

Объект исследования. Воймаканское месторождение аподоломитового нефрита. **Цель.** Определение минерального состава и выработка модели формирования нефрита. **Материалы и методы.** Изучены 12 образцов нефрита и 5 образцов вмещающих пород. Применены бинокуляр, геммологические фонарь и лупа, петрографический микроскоп. Минеральный состав изучен на растровом электронном микроскопе с системой энергодисперсионного количественного микроанализа. **Результаты.** Нефрит светло-салатный, салатный, серо-салатный и бурый (медовый). Образует обособления в телах кальцит-тремолитового скарна на контакте доломитового мрамора и амфиболита, преобразованного в эпидот-тремолитовый скарн. Минералы нефрита отнесены к парагенезисам: реликтовому (минералы амфиболита, доломита, скарнов): доломит, магнетит, уранинит, фторопацит, циркон, эпидот I; метасоматическому донефритовому: диопсид, кварц I, окерманит, оливин; метасоматическому нефритовому: кальцит I, тремолит; регрессивному метасоматическому: кварц II, серпентин, тальк, хлорит, эпидот II; вторичному: англезит, ванадинит, вульфенит, голландит (?), сильвин, уранофан, самородные бронза, медь, серебро. **Выводы.** Нефрит соответствует требованиям, предъявляемым к камнесамоцветному сырью. Развито интенсивное замещение хлоритом и, особенно, тальком, что значительно ухудшает качество сырья. Диопсидит с линзочками, прослоями нефрита может использоваться для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций. Представлена модель формирования нефрита с первоначальным образованием по доломиту диопсида, его замещением тремолитом или кальцит-тремолитовым агрегатом, далее ранний призматический тремолит замещается спутанно-волоконистым скрытокристаллическим тремолитом. Кальцит скарна также может замещаться тремолитом с образованием нефрита. При продолжении регрессивного процесса тремолит замещается хлоритом или тальком в ассоциации с кальцитом.

Ключевые слова: нефрит, Воймаканское месторождение, минеральный состав, причины окраски, модель формирования

Источник финансирования

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

Mineral composition and formation model of dolomite type nephrite, Voimakan deposit, Middle-Vitim mountain country

Evgeniy V. Kislov¹, Irina S. Goncharuk^{1,2}, Vladislav V. Vanteev¹

¹N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, 6a Sakhyanov st., Ulan-Ude 670047, Russia

²D. Banzarov Buryat State University, Institute of Natural Sciences, 24a Smolin st., Ulan-Ude 670000, Russia

Received 26.01.2024, accepted 13.03.2024

Research subject. The Voimakan deposit of dolomite type nephrite. **Aim.** Determination of the mineral composition and development of a model for the formation of nephrite. **Materials and Methods.** 12 samples of nephrite and 5 samples of host rocks were studied. A binocular, a gemological lantern, a magnifying glass, and a petrographic microscope were used. The mineral composition was studied using a scanning electron microscope with an energy dispersive quantitative

Для цитирования: Кислов Е.В., Гончарук И.С., Вантеев В.В. (2024) Минеральный состав и модель формирования аподоломитового нефрита Воймаканского месторождения, Средне-Витимская горная страна. *Литосфера*, 24(4), 609-628. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-609-628>

For citation: Kislov E.V., Goncharuk I.S., Vanteev V.V. (2024) Mineral composition and formation model of dolomite type nephrite, Voimakan deposit, Middle-Vitim mountain country. *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 609-628. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-609-628>

© Е.В. Кислов, И.С. Гончарук, В.В. Вантеев, 2024

microanalysis system. *Results.* Nephrite is light salad, salad, gray-salad and brown (honey). It forms segregations in calcite-tremolite skarn bodies at the contact of dolomite marble and amphibolite transformed into epidote-tremolite skarn. Nephrite minerals are classified as parageneses: relict (minerals of dolomite, amphibolite and skarns): dolomite, magnetite, uraninite, fluorapatite, zircon, epidote I; metasomatic before nephrite: diopside, quartz I, okermanite, olivine; metasomatic nephrite: calcite I, tremolite; regressive metasomatic: quartz II, serpentine, talc, chlorite, epidote II; secondary: anglesite, vanadinite, wulfenite, hollandite (?), sylvin, uranophane, native bronze, copper, silver. *Conclusion.* Nephrite meets the requirements for gemstone raw materials. Intensive replacement with chlorite and, especially, talc has been developed, which significantly worsens the quality of raw materials. Diopside with nephrite lenses, interlayers can be used for carving multicolored products or inlays. A model of nephrite formation is presented with the initial formation of diopside on dolomite, its replacement by tremolite or calcite-tremolite aggregate; the early prismatic tremolite is replaced by a tangled fibrous cryptocrystalline tremolite. Skarn calcite can also be replaced by tremolite to form nephrite. With the continuation of the regressive process, tremolite is replaced by chlorite or talc in association with calcite.

Keywords: nephrite, Voimakán deposit, mineral composition, model of origin

Funding information

The collection of materials and analytical works were funded by the grant of 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. AAAA21-121011390003-9

Acknowledgements

The authors are grateful to VVS LLC and personally to S.I. Moskva and V.S. Kodochigov for the materials and information provided, E.V. Khodyreva for performing the analyses. Comments and suggestions from editor S.L. Votyakov and two editorial reviewers contributed to a significant improvement of the manuscript. The equipment of the Center for Shared Use "Geospectr" of the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) was used.

ВВЕДЕНИЕ

Нефрит – высоколиквидный ювелирно-поделочный камень, плотный агрегат моноклинного амфибола тремолит-актинолитового ряда, 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 офиолитовых комплексов. Второй тип – аподоломитовый в тремолит-кальцитовых магнезиальных скарнах. Россыпи, преимущественно аллювиальные, обычно приурочены к коренным месторождениям.

Для апосерпентинитового нефрита характерны различные оттенки зеленого цвета, до бурого (табачного, болотного) и черного. Для аподоломитового нефрита характерен широкий диапазон окрасок – от белого, серого до светло-зеленого (салатного), бурого (медового) и черного. 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.

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 обработке, на Удоканском в Забайкальском крае и Буромском в Бурятии проводились геологоразведочные работы. 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. Наиболее крупные месторождения известны в Северо-Западном Китае, ряд месторождений – на Северо-Востоке, в меньшей мере – в Восточном и Южном Китае (Zhang et al., 2023). На большинстве изученных месторождений тела нефрита локализируются в контакте доломита и гранита. Есть исключения, например месторождения Дахуа (Zhong et al., 2019) и Лодянь (Zhang et al., 2019), образовавшиеся на контакте диабазы и известняка, или Луаньчуань (Ling et al., 2015) – в доломите вне контакта с метагаббро.

В других странах следует отметить месторождение Чхунчхон в Южной Корее, сформированное на контакте доломита и амфиболита (Yui, Kwon, 2002; Feng et al., 2022; Li et al., 2023), и месторождение Злоты Сток в Нижней Силезии, Польша, образованное на контакте доломита и гранита (Gil et al., 2015, 2020; Korybska-Sadło et al., 2018). Месторождения района Коуэлл на п-ове Эйр в Южной Австралии (Nichol, 2000; Tan et al., 2013) и Альпе Мастабия (Вал Маленко) в Ломбардии, Италия (Adamo, Vocchio, 2013), изучены недостаточно.

До сих пор остается дискуссионной роль метаморфических и метасоматических процессов в формировании нефрита.

Для месторождений Витимской нефритоносной провинции более характерно образование нефрита на контакте доломита и амфиболита, слагающих ксеноблоки в граните Ангаро-Витимского батолита. Но научно-исследовательские работы на российских месторождениях нефрита проводились в основном в 1980-х гг. В какой-то мере исследования нефрита Витимской нефритоносной провинции возобновлены лишь в последние годы (Бурцева и др., 2015; Сутурин и др., 2015; Гомбоев и др., 2017; Кочнев, Краснов, 2017; Кочнев и др., 2018; Филиппова и др., 2021; Кислов и др., 2023). В связи с этим необходимо изучение минерального состава нефрита и вмещающих пород в целях выяснения особенностей его происхождения и геологического контроля качества камнесамоцветного сырья. В данной работе приведены результаты исследования Воймаканского месторождения, находящегося на западном фланге Витимской нефритонос-

ной провинции. Научно-исследовательские работы на этом месторождении ранее не проводились, публикации в открытой печати отсутствуют.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВОЙМАКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Воймаканское месторождение аподолмитового 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 в 1981 г. А.П. Секериным при проведении рекогносцировочных маршрутов в среднем течении р. Ципа. Среди развалов элювиально-делювиальных глыб гранитов и мраморов обнаружены валуны кальцит-тремолитовых скарнов. Геологоразведочные работы на Воймаканском проявлении проводились до 1991 г. экспедицией

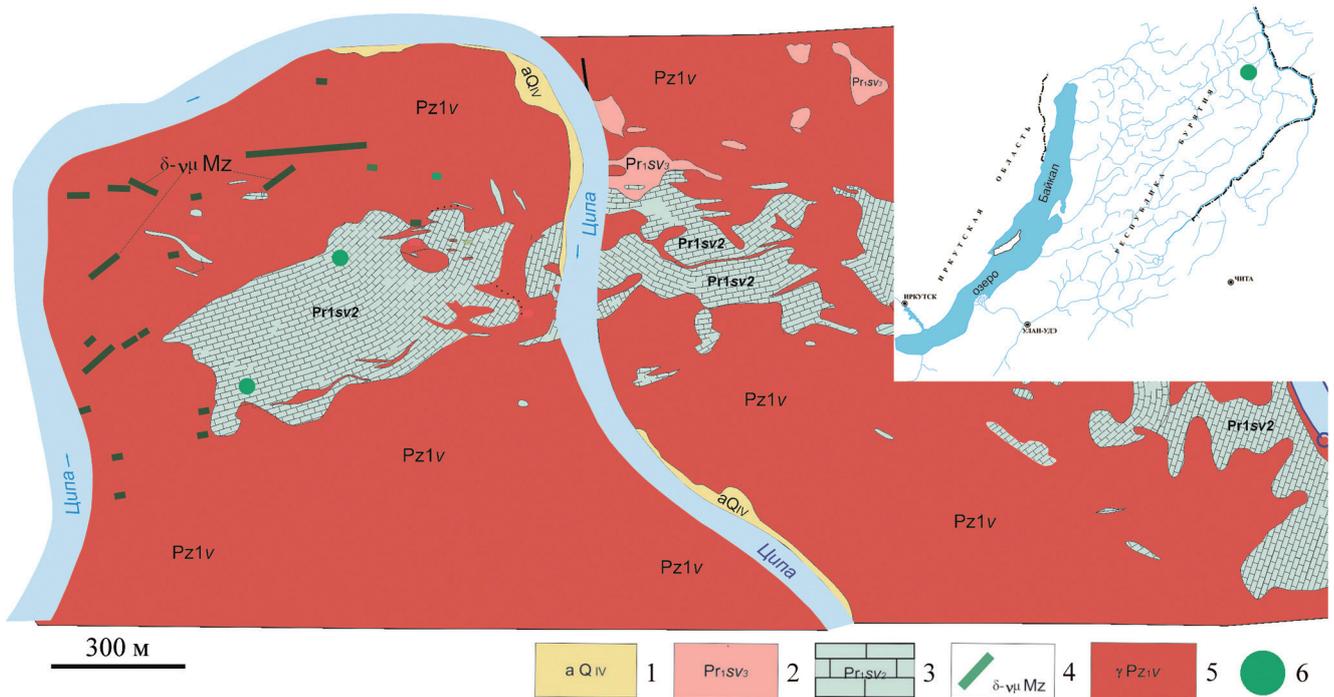


Рис. 1. Геологическая карта Воймаканского месторождения, по (Кодочигов, Курбатов, 2015) с дополнениями и исправлениями.

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 map of the Voimakán deposit, after (Kodochigov, Kurbatov, 2015) with additions and corrections.

1 – alluvial deposits; 2, 3 – Suvanikha formation: 2 – upper sub-formation (shales, gneisses, amphibolites, limestones, metaeffusives); 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.

“Байкалкварцсамоцветы” 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” (Кодочигов, Курбатов, 2015).

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

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 равномерно-зернистыми, 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 нефритиноносных 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.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены образцы из кернов скважин, в меньшей мере из валовых проб, полученных в ходе геологоразведочных 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 фонаря. Шлифы изучены под петрографическим микроскопом Olympus Vx-51.

Состав минералов изучен на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энергодисперсионного количественного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания) в ЦКП “Геоспектр” (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Условия исследования: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3–0.4 нА, размер зонда <0.1 мкм, время измерения 50 с (“живое” время), ошибка анализа на сумму достигает 2–4 мас. % в зависимости от качества поверхности образца и особенностей его состава. Содержание трехвалентного железа вычислено по стехиометрии. Анализ фторapatита нормированы на 100% в связи с завышением суммы из-за наложения О и F. Аналитик Е.В. Ходырева.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Качественные характеристики нефрита. Нефрит имеет преимущественно светло-салатную, салатную, серо-салатную и бурую (медовую) окраску (рис. 3). В некоторых образцах она неоднородна из-за включений визуально различимых призматических зерен тремолита, кальцита, диопсида, обособлений кальцит-тремолитового скарна. Дефекты: разноориентированные трещины, включения чужеродных минералов и пород, развитые по поверхностям и трещинам пленки кальцита, вторичных минералов железа и марганца. Качество нефрита часто ухудшено из-за интенсивного развития хлорита и талька.

Петрографическое описание. Нефрит образует желваки, жилы, гнезда, линзы в жильных телах кальцит-тремолитового скарна. Кальцит-тремолитовый скарн белый, матовый, сложен удлиненно-призматическими кристаллами и радиально-лучистыми агрегатами тремолита и тонко-лучистыми агрегатами кальцита.

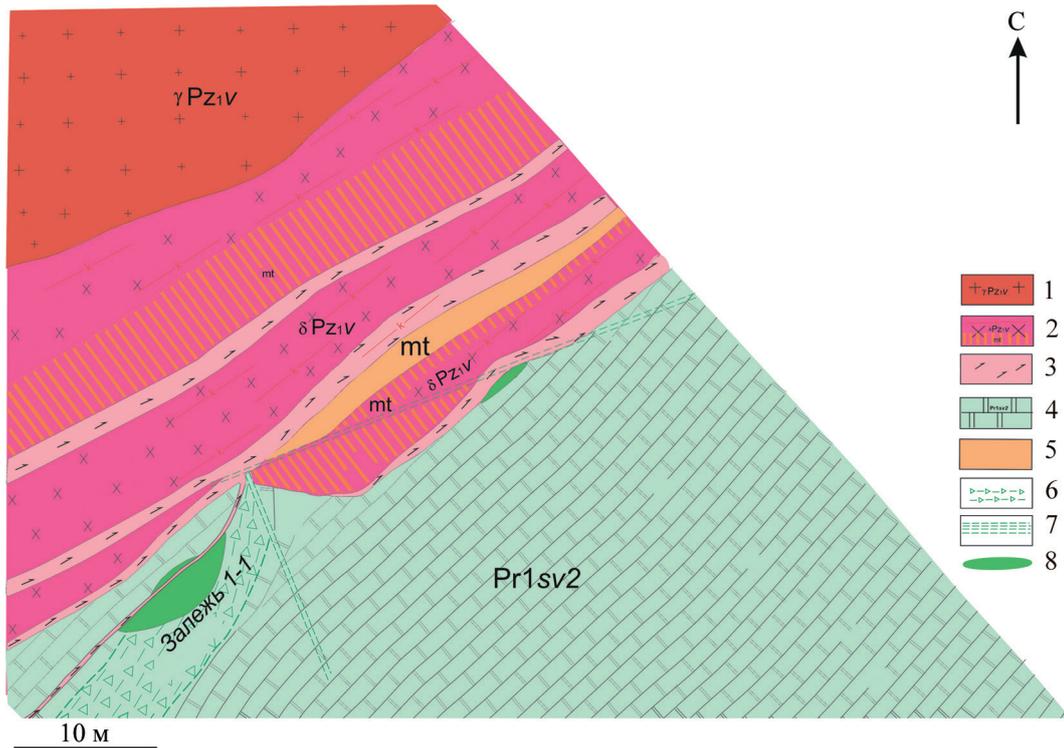


Рис. 2. Залежь нефрита 1-1 на контакте мраморизованных доломитов и амфиболитов, по (Кодочигов, Курбатов, 2015) с дополнениями и исправлениями.

Витимканский интрузивный комплекс: 1 – первая фаза (порфировидные амфибол-биотитовые граниты, гранодиориты, диориты, дайки аплитов, тела пегматитов), 2 – вторая фаза (лейкокротные биотитовые равномерно-зернистые, реже гнейсовидные граниты, гранодиорит); 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. Nephrite lode 1-1 at the contact of marbled dolomites and amphibolites, after (Kodochigov, Kurbatov, 2015) 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 acidic 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.

На контакте с кальцит-тремолитовым скарном часто расположены *эпидот-тремолитовые скарны*, образованные по амфиболитам в результате эпидотизации и, в меньшей степени, хлоритизации. Эпидот-тремолитовые скарны – среднезернистые полосчатые породы. Их окраска варьируется от зеленой до темно-зеленой. Структура основной массы эпидот-тремолитовых скарнов гранобластовая. Эпидот-тремолитовые скарны сложены крупными удлиненно-призматическими, реже игольчатыми кристаллами тремолита (рис. 4а), интерстиции между которыми заполнены серпентином, в подчиненном количестве присутствуют крупные кристаллы эпидота, иногда с включениями циркона.

Карбонатные породы в непосредственной близости залежей нефрита представлены кристаллическими *доломитами*, в меньшей степени мраморизованными известняками. Внешне это светло-серые, кремовые разномасштабные полнокристаллические породы. Структура доломита гранобластовая, основные минералы – кальцит и доломит. Кальцит часто мелкий, часто удлиненный, единичные зерна достигают 0.1 мм. Доломит в шлифах представлен гипидиоморфными зернами с ярко выраженными полисинтетическими двойниками, размеры зерен достигают 0.25 мм. Встречаются изометричные агрегаты хлорита и зерна фтор-апатита.

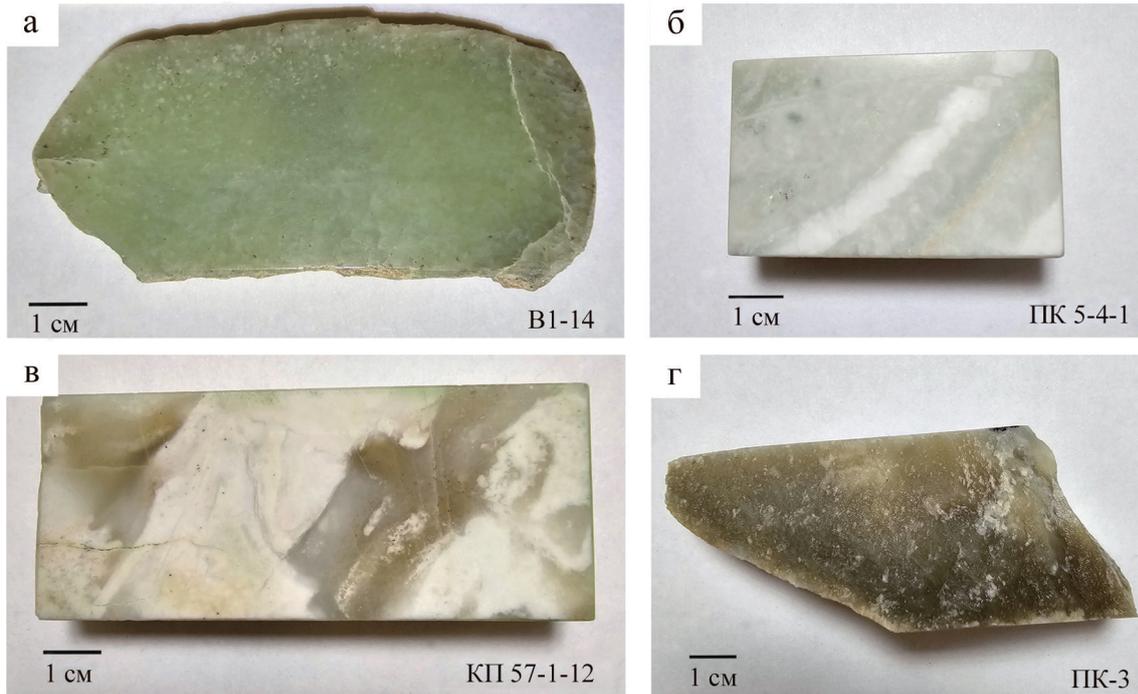


Рис. 3. Цветовые вариации нефрита Воймаканского месторождения.

а – салатный, б – светло-салатный с обособлениями кальцит-тремолитового скарна, в – серо-салатный – пропластки в диопсидите, г – бурый (медовый).

Fig. 3. Color variations of the Voimakán deposit nephrite.

а – salad, б – light salad with calcite-tremolite scarn separations, в – gray-salad – interlayers in diopside, г – brown (honey).

Нефрит Воймаканского месторождения характеризуется массивной, реже сланцеватой текстурой и скрытокристаллической, спутанно-волокнистой (фибробластовой) структурой (рис. 4в). Большинство изученных образцов нефрита контактируют с эпидот-тремолитовым скарном. Приконтактная часть нефрита сложена лейстами и игольчатыми агрегатами тремолита. Ранние гипидиоморфные более крупные зерна тремолита замещаются скрытокристаллическим тремолитовым агрегатом. Наблюдается развитие более поздних гипидиоморфных крупных кристаллов тремолита (рис. 4б).

С нефритом ассоциируют своеобразные *диопсидиты* с прожилками и линзами нефрита (см. рис. 3в). Диопсид светло-бежевый, цвета слоновой кости, неравномерно-зернистый – иногда зерна достигают 2 см в сечении.

Состав минералов. *Тремолит* разнообразной морфологии (рис. 5) в пределах одного образца сходен по составу (табл. 1). В белых, серых, бурых нефритах, включая прожилки в диопсидите, содержание FeO в основном ниже пределов обнаружения, редко и не во всех образцах достигает до 0.53 мас. %. В салатных нефритах содержание FeO значительно варьируется, доходя до 1.30 мас. %. В образце неравномерного салатного цвета V1-14 со-

держание FeO в тремолите от 0.35 до 5.44 мас. %, в участке черного цвета одно зерно с 16.48 мас. % FeO, отвечающее актинолиту, находится среди тремолита с содержаниями FeO 5.27 и 6.47 мас. %. Содержание Al₂O₃ в тремолите нефрита доходит до 1.83, диопсидита – до 2.83, эпидот-тремолитового скарна – 4.65 мас. %. Часть тремолита нефрита содержит галогены: чаще фтор – до 1.86, реже хлор – до 0.28 мас. %. Тремолит эпидот-тремолитового скарна содержит 0.98–3.15 мас. % FeO, фтор не обнаружен. В тремолите диопсидита и железа, и фтор ниже предела обнаружения. В единичных зернах тремолита отмечаются примеси титана, марганца, натрия, калия, ванадия (см. табл. 1).

Диопсид образует призматические зерна, их реликты, при переходе к диопсидиту агрегаты зерен достигают 2 см в поперечнике, повсеместно корродируется тремолитом (см. рис. 5б, г). На контакте нефрита и диопсидита иногда отмечается мало-мощная до 2 мм диопсид-тремолитовая зона. Существует также диопсид-тремолитовый нефрит, например, РК-6-13. Состав диопсидита близок к стехиометрическому, редко примеси Al₂O₃ достигают 2.27, FeO – 0.15, Fe₂O₃ – 1.00, Na₂O – 0.44 мас. % (табл. 2). В эпидот-тремолитовом скарне единичные зерна диопсидита с примесями Al, Fe²⁺, Fe³⁺, Mn.

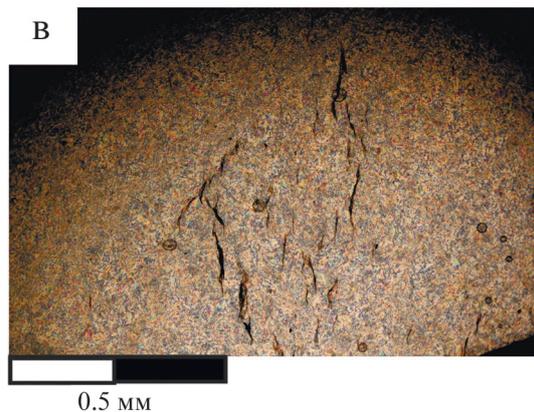
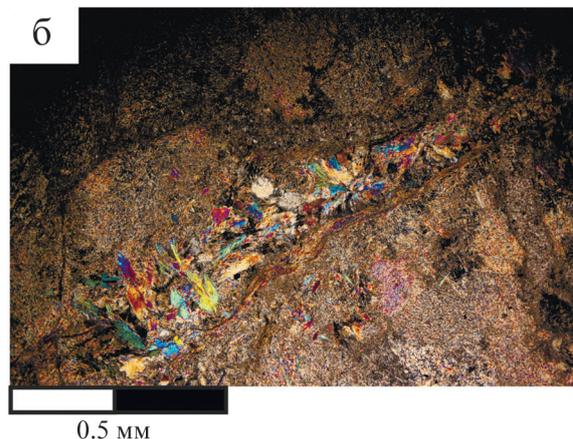
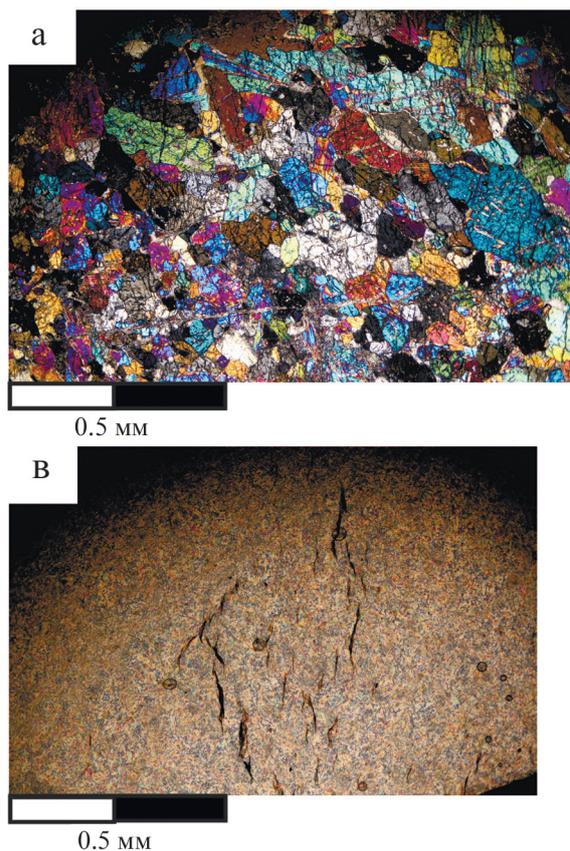


Рис. 4. Морфология тремолита.

а – гипидиоморфные изометричные призматические зерна тремолита эпидот-тремолитового скарна, б – прожилков изометричного, до игольчатого, позднего тремолита сечет скрытокристаллический спутанно-волоконистый агрегат тремолита нефрита, в – скрытокристаллический спутанно-волоконистый агрегат тремолита нефрита.

Fig. 4. Morphology of the tremolite.

а – hypidiomorphic isometric prismatic grains of epidote-tremolite skarn tremolite, б – veins of isometric to needle-like late tremolite are cut by a cryptocrystalline tangled fibrous nephrite tremolite aggregate, в – a cryptocrystalline tangled fibrous nephrite tremolite aggregate.

Доломит (22.07–26.37 мас. % MgO, 29.63–32.21 мас. % CaO) – преобладающий минерал одноименной породы. *Кальцит* (до 0.48 мас. % MgO) содержится в ней в подчиненном количестве. Мелкие ксеноморфные зерна кальцита в эпидот-тремолитовом скарне содержат больше магния – 0.46–1.14 мас. % MgO. Кальцит в нефрите присутствует в виде реликтов (см. рис. 5а), в агрегатах с тремолитом/талком либо диопсидом и кварцем, в виде поздних прожилков, часто содержит магний (до 6.96 мас. % MgO), реже – марганец (до 0.32 мас. % MnO). Реликтовые зерна доломита (см. рис. 5а) редки (31.29, 37.47 мас. % CaO; 21.69, 15.04 мас. % MgO; 0, 0.40 мас. % FeO).

Апатит образует в основном единичные зерна, обычно идиоморфные (см. рис. 5б), в нефрите также отмечены ксеноморфные очертания зерен. Анализы нормированы на 100 % в связи с завышением суммы из-за наложения О и F (табл. 3). Во всех породах апатит высокофтористый: в доломите 3.32–6.02 мас. % F, Cl не обнаружен; в эпидот-тремолитовом скарне – 5.63, 7.54 мас. % F, 0.21, 0.28 мас. % Cl; в нефрите – 3.19–6.08 мас. % F, в одном зерне – 0.43 мас. % Cl, а в другом – 0.19 мас. % Cl, F не обнаружен. В шести зернах апатита в двух образцах нефрита из скв. 16 зафиксировано 0.79–6.04 мас. % As₂O₅. Реже в апатите нефрита отмечаются 0.35–0.66 мас. % SO₃, 0.98, 1.07 мас. %

Se₂O₃ – обогащение периферии зерен, 0.69 мас. % MgO, 0.91 мас. % Na₂O.

Эпидот в эпидот-тремолитовом скарне образует крупные таблитчатые, до ксеноморфных, зерна, в нефрите – единичный изометричный сросток удлиненных кристаллов. Для эпидота характерны широкие вариации состава (табл. 4), в половине зерен фиксируются высокие содержания редкоземельных элементов.

Хлорит (см. рис. 5е) в доломите встречается в виде небольших агрегатов неправильной формы, в эпидот-тремолитовом скарне образует интерстициальные зерна, в нефрите – пятнообразные агрегаты, прожилки, встречается в ассоциации с преобладающим тальком и/или кальцитом. В доломите хлорит более магниезильный, но в целом содержание FeO от 0 до 3.32 мас. % (табл. 5). Характерны широкие вариации содержаний глинозема и небольшая примесь кальция.

Тальк встречен только в нефрите, где он замещает тремолит и диопсид, образует пятнообразные агрегаты, часто в ассоциации с кальцитом, реже – с хлоритом (см. рис. 5б, в, д, е, и). Тальк достаточно редко содержит небольшие примеси железа, алюминия и кальция (табл. 6).

Серпентин в эпидот-тремолитовом скарне содержит небольшое количество Al и Fe (табл. 7), заполняет интерстиции. Серпентин в нефрите

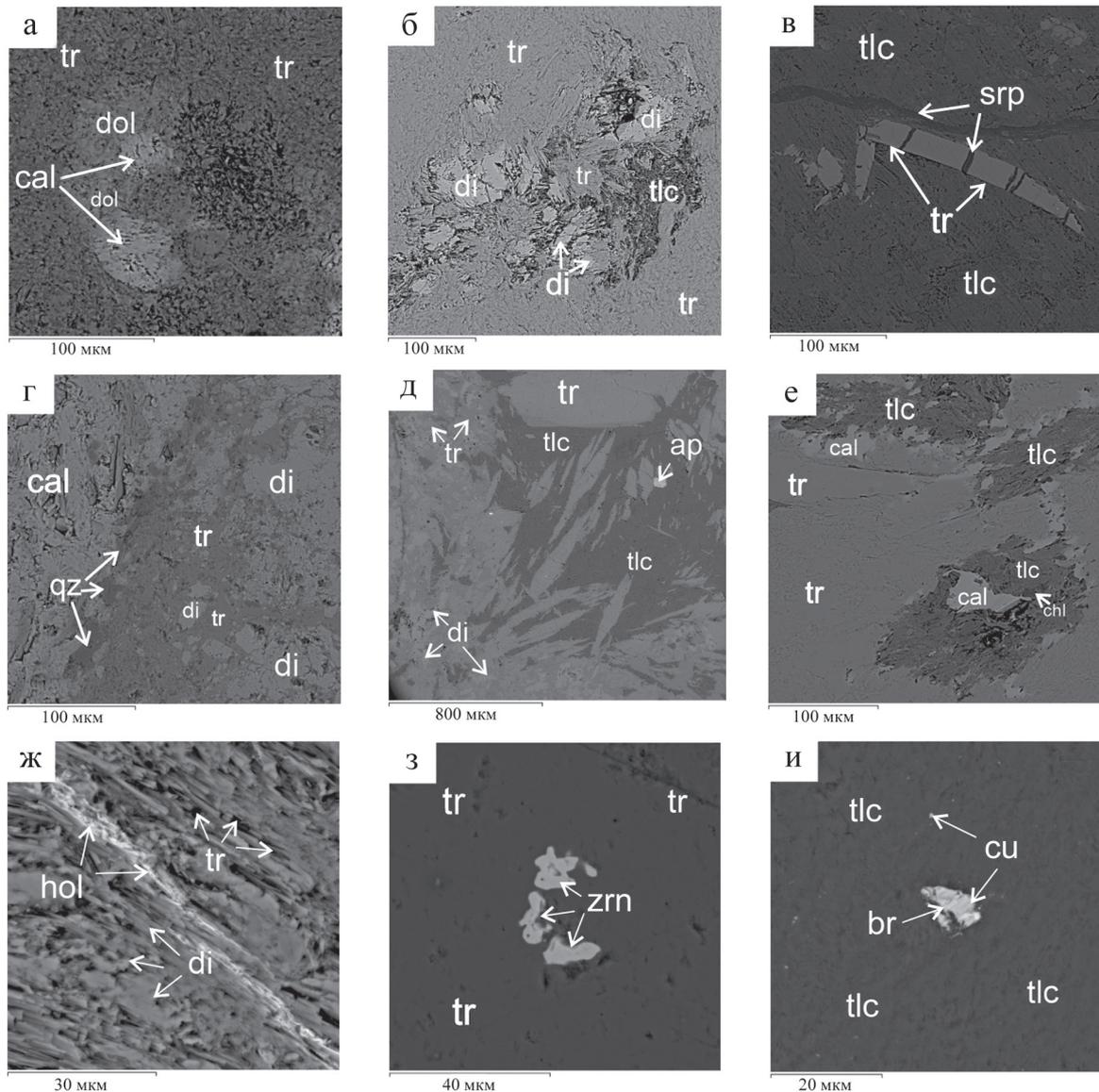


Рис. 5. Минеральный состав нефрита.

а – реликты кальцита и доломита в агрегате тремолита, V1-14; б – игольчатый кристалл и реликтовые зерна тремолита, прожилки серпентина в тальке, С-16 ПК-2; в – диопсид-кальцитовый агрегат с кварцем, замещается спутанно-волокнистым агрегатом тремолита, в зоне контакта развита талька, V1-14; г – контакт диопсидита и кальцит-тремолитового скарна, между ними мономинеральный спутанно-волокнистый агрегат тремолита, зерна кварца тяготеют к скарну, КР 6-2-13; д – игольчатые кристаллы и реликты тремолита, замещающиеся тальком, реликты диопсида, изометричный апатит, КР 5-3-7; е – агрегат тремолита замещается кальцит-тальковым парагенезисом с подчиненным хлоритом, кальцит как в центре агрегатов, так и в зальбанде, КР 5-3-4; ж – параллельно-волокнистый агрегат тремолита с реликтовыми зернами диопсида сечется прожилком голландита (?), КР 5-2-5; з – зерна циркона в тремолите, С-22 ПК-2; и – зерна самородных бронзы и меди в тальке, обр. С-2 ПК-16; *Ap* – апатит, *Br* – самородная бронза, *Cal* – кальцит, *Cu* – самородная медь, *Chl* – хлорит, *Di* – диопсид, *Dol* – доломит, *Hol* – голландит, *Qz* – кварц, *Srp* – серпентин, *Tlc* – тальк, *Tr* – тремолит, *Zrn* – циркон.

Fig. 5. Mineral composition of nephrite.

а – relics of calcite and dolomite in the tremolite aggregate, V1-14; б – needle crystal and relict grains of tremolite, serpentine veins in talc, C-16 PK-2; в – diopside-calcite aggregate with quartz, and is replaced by a tangled fibrous tremolite aggregate, talc development in the contact zone, V1-14; г – contact of diopside and calcite-tremolite skarn, between them a monomineral tangled fibrous tremolite aggregate, quartz grains related to skarn, КР 6-2-13; д – needle crystals and tremolite relicts, replaced by talc, diopside relicts, isometric apatite, КР 5-3-7; е – tremolite aggregate is replaced by calcite-talc paragenesis with subordinate chlorite, calcite both in the center of the aggregates and in the salband, КР 5-3-4; ж – parallel-fibrous tremolite aggregate with relict grains of diopside is sectioned with a vein of hollandite (?), КР 5-2-5; з – zircon grains in tremolite, C-22 PC-2; и – grains of native bronze and copper in talc, mod. C-2 PC-16; *Ap* – apatite, *Br* – native bronze, *Cal* – calcite, *Cu* – native copper, *Chl* – chlorite, *Di* – diopside, *Dol* – dolomite, *Hol* – hollandite, *Qz* – quartz, *Srp* – serpentine, *Tlc* – talc, *Tr* – tremolite, *Zrn* – zircon.

Таблица 1. Представительные анализы тремолита, мас. %

Table 1. Representative analyses of tremolites, wt %

Компонент	Нефрит									
	КР53-7		КР52-5					РК6-13		
SiO ₂	58.64	57.85	57.63	58.17	58.32	58.47	58.51	56.35	57.25	
Al ₂ O ₃	0	0.38	0.72	0	0.42	0.60	0.64	1.74	1.76	
FeO	0	0.35	0	0	0	0	0	0.67	0.85	
MgO	26.04	24.73	25.22	26.5	25.37	25.42	25.64	23.85	24.63	
CaO	12.94	13.35	13.01	13.59	12.97	12.94	12.98	13.39	13.64	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Σ	97.62	96.65	96.59	98.26	97.08	97.44	97.78	95.99	98.12	
Формульные коэффициенты										
Si	7.935	7.928	7.887	7.851	7.932	7.921	7.903	7.797	7.762	
Al	0	0.061	0.116	0	0.067	0.097	0.102	0.283	0.281	
Fe	0	0.040	0	0	0	0	0	0.077	0.096	
Mg	5.252	5.052	5.145	5.332	5.145	5.134	5.162	4.919	4.977	
Ca	1.877	1.960	1.908	1.965	1.890	1.879	1.879	1.985	1.982	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Компонент	Нефрит									
	V1-14					С-2-РК-16				
SiO ₂	56.84	58.40	57.87	54.70 ¹	58.79	58.06	59.02	58.02	58.34	
Al ₂ O ₃	0.60	0	0.62	0	0.53	0.74	0.47	1.81	0.62	
FeO	1.29	0.55	0.35	16.48	5.27	0.53	0.39	0.42	0.46	
MgO	25.24	25.75	25.37	14.94	22.67	24.74	25.47	24.73	24.71	
CaO	13.33	12.27	12.65	13.15	13.40	12.42	12.02	12.55	12.47	
F	1.86	0	1.43	0	0	1.24	1.59	0	0	
Σ	99.17	96.98	98.29	100.16	100.66	97.73	98.96	97.53	96.60	
Формульные коэффициенты										
Si	7.794	7.957	7.899	7.848	7.904	7.983	7.983	7.854	7.970	
Al	0.098	0	0.100	0	0.084	0.075	0.075	0.289	0.100	
Fe	0.148	0.063	0.040	1.977	0.593	0.044	0.044	0.048	0.053	
Mg	5.159	5.231	5.163	3.196	4.543	5.136	5.136	4.990	5.032	
Ca	1.959	1.791	1.850	2.022	1.931	1.742	1.742	1.820	1.825	
F	0.807	0	0.617	0	0	0.537	0.680	0	0	

Компонент	Нефрит									
	С-16-РК-1					V1-14B				
SiO ₂	58.66	58.58	58.70	59.15	58.08 ²	59.43	59.00	58.55	57.81	58.88
Al ₂ O ₃	0.59	0.45	0.83	0.40	0.40	0.59	0	1.04	0	0
FeO	0	0	0	0	0	0.44	0.33	0.55	0	0.39
MgO	24.28	24.54	24.61	24.71	24.99	24.34	24.87	24.33	24.05	26.1
CaO	12.83	13.36	12.52	14.09	13.17	13.26	13.88	13.19	14.16	14.03
F	0	0	0	0	0	0	0	0	1.18	0
Σ	96.36	96.93	96.67	98.35	96.92	98.06	98.09	97.67	97.19	99.40
Формульные коэффициенты										
Si	8.017	7.979	7.990	7.959	7.925	8.005	7.972	7.931	7.979	7.872
Al	0.094	0.073	0.133	0.063	0.064	0.093	0	0.166	0	0
Fe	0	0	0	0	0	0.049	0.038	0.063	0	0.043
Mg	4.946	4.984	4.993	4.956	5.083	4.888	5.010	4.912	4.948	5.203
Ca	1.879	1.950	1.826	2.031	1.925	1.914	2.009	1.915	2.094	2.010
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0.515	0

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

Компонент	Нефрит										
	С-16-ПК-2					КР-5-3-4					
SiO ₂	58.58	58.34	59.88	59.13	58.13	58.60 ³	58.92	58.38	58.38	59.09	58.88 ⁴
Al ₂ O ₃	0.51	0.51	0.79	0.49	0.87	0.59	0.62	0.85	0.55	0.55	0.98
FeO	0	0	0	0.36	0	0.75	0.51	0.35	0.53	0.68	0.57
MgO	25.9	25.82	24.51	25.22	24.1	23.75	24.58	24.11	24.84	24.71	24.01
CaO	11.95	11.57	13.08	14.68	14.43	13.78	13.01	13.35	12.72	13.39	12.91
F	0	1.33	0	0	0	0	1.14	0	0	0	0
Σ	96.94	97.57	98.27	99.88	97.52	97.78	98.78	97.04	97.02	98.42	97.65
Формульные коэффициенты											
Si	7.950	7.965	8.020	7.872	7.903	7.959	7.974	7.955	7.953	7.952	7.973
Al	0.082	0.082	0.125	0.077	0.139	0.094	0.099	0.137	0.088	0.087	0.157
Fe	0	0	0	0.04	0	0.085	0.058	0.040	0.060	0.077	0.064
Mg	5.241	5.255	4.894	5.006	4.884	4.808	4.958	4.898	5.045	4.957	4.848
Ca	1.738	1.693	1.877	2.094	2.101	2.006	1.887	1.826	1.949	1.931	1.874
F	0	1.330	0	0	0	0	0.488	0	0	0	0

Компонент	Нефрит										
	С-22-ПК-2					ПК-3					
SiO ₂	59.56	58.94	58.68	58.19 ⁵	57.89	58.62	58.47	57.44	57.40 ⁶	56.69	
Al ₂ O ₃	0	0	0	0.47	0.47	0	0.57	0.53	0.55	0.55	
FeO	0	0.32	0	0	0	0.51	0	0.32	0	0	
MgO	24.11	24.39	24.94	24.58	24.63	24.29	25.75	26.13	26.13	25.55	
CaO	14.31	13.64	13.87	13.04	13.98	13.89	12.76	12.03	12.1	12.19	
F	0	0	0	1.53	1.13	0	0	0	1.60	1.28	
Σ	97.99	97.3	97.49	98.11	98.1	97.32	97.55	96.46	98.00	96.26	
Формульные коэффициенты											
Si	8.039	8.015	7.967	7.953	7.911	8.019	7.910	7.867	7.866	7.878	
Al	0	0	0	0.076	0.076	0	0.090	0.085	0.089	0.090	
Fe	0	0.037	0	0	0	0	0	0.037	0	0	
Mg	4.852	4.945	5.048	5.008	5.017	4.934	5.194	5.336	5.339	5.294	
Ca	2.070	1.988	2.017	1.910	2.047	2.028	1.850	1.766	1.777	1.815	
F	0	0	0	0.661	0.488	0	0	0	0.038	0.563	

Компонент	Диопсидит					Эпидот-тремолитовый скарн					
	КР-6-2-13					ПК-1					
SiO ₂	58.55	57.89	57.70	59.07	58.51	58.66	52.93 ⁷	58.00	57.91	55.11	
Al ₂ O ₃	0.87	0.81	2.83	0.85	0.40	0.43	4.65	0.47	0.62	3.76	
FeO	0	0	0	0	0	2.03	3.15	0.98	1.83	3.34	
MgO	23.63	23.76	22.85	23.95	24.31	25.09	21.89	25.44	25.95	22.77	
CaO	14.27	13.95	13.68	14.26	13.98	13.19	13.26	13.29	12.72	13.84	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Σ	97.33	96.42	97.07	98.12	97.20	99.41	96.41	98.18	99.03	98.82	
Формульные коэффициенты											
Si	7.961	7.945	7.846	7.963	7.966	7.875	7.420	7.855	7.800	7.525	
Al	0.139	0.131	0.454	0.135	0.064	0.069	0.768	0.075	0.099	0.605	
Fe	0	0	0	0	0	0.228	0.370	0.111	0.206	0.382	
Mg	4.790	4.862	4.633	4.812	4.934	5.021	4.575	5.136	5.211	4.635	
Ca	2.079	2.051	1.994	2.059	2.039	1.898	1.992	1.929	1.835	2.025	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Примечание. ¹Актинолит, MnO – 0.89 мас. %, Mn – 0.108 ф.к.; ²V₂O₃ – 0.28 мас. %, V – 0.031 ф.к.; ³Na₂O – 0.32 мас. %, Na – 0.085 ф.к.; ⁴MnO – 0.30 мас. %, Mn – 0.034 ф.к.; ⁵TiO₂ – 0.33 мас. %, Ti – 0.031 ф.к.; ⁶K₂O – 0.22 мас. %, K – 0.038 ф.к.; ⁷Na₂O – 0.53 мас. %, Na – 0.143 ф.к.

Note. ¹Actinolite, MnO – 0.89 wt %, Mn – 0.108 apfu; ²V₂O₃ – 0.28 wt %, V – 0.031 apfu; ³Na₂O – 0.32 wt %, Na – 0.085 apfu; ⁴MnO – 0.30 wt %, Mn – 0.034 apfu; ⁵TiO₂ – 0.33 wt %, Ti – 0.031 apfu; ⁶K₂O – 0.22 wt %, K – 0.038 apfu; ⁷Na₂O – 0.53 wt %, Na – 0.143 apfu.

Таблица 2. Представительные анализы диопсида, мас. %

Table 2. Representative analyses of diopside, wt %

Компонент	Нефрит									
	KP52-5						V1-14	C-16-PK-3		
SiO ₂	55.92	54.25	55.19	54.83 ¹	56.31	56.39	53.29	56.76	56.78	
Al ₂ O ₃	0.93	2.08	0	2.27	1.19	1.78	0	1.15	1.10	
FeO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0.70	0	0	
MgO	19.93	18.64	19.65	18.44	19.02	18.72	22.95	19.87	19.73	
CaO	23.49	24.78	24.72	24.75	25.26	24.95	21.52	22.01	22.75	
Σ	100.27	99.75	99.57	100.74	101.77	101.84	98.46	99.79	100.36	
Формульные коэффициенты										
Si	1.993	1.955	1.993	1.957	1.986	1.984	1.942	2.018	2.012	
Al	0.039	0.088	0	0.095	0.049	0.074	0	0.048	0.046	
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0.019	0	0	
Mg	1.059	1.001	1.058	0.981	1.000	0.982	1.247	1.053	1.043	
Ca	0.897	0.957	0.956	0.947	0.954	0.940	0.840	0.838	0.864	
Компонент	Нефрит									
	C-22-PK-2						PK6-13			
SiO ₂	54.66	54.36	54.47	54.70	54.49	55.34	53.78	54.68	54.00	54.94 ²
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0.51	0	0.85	0
FeO	0	0	0	0	0	0.15	0	0.15	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.23	1.00	0.51	0.60	0.44
MgO	18.11	18.29	18.14	18.17	18.17	18.04	18.57	18.27	18.87	19.34
CaO	26.50	26.61	26.44	26.74	26.19	26.43	24.72	25.49	24.60	25.69
Σ	99.27	99.26	99.05	99.62	98.86	100.20	98.59	99.1	98.92	100.82
Формульные коэффициенты										
Si	1.991	1.983	1.989	1.987	1.992	1.997	1.970	1.993	1.968	1.972
Al	0	0	0	0	0	0	0.022	0	0.037	0
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0.005	0	0.005	0	0
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0.006	0.028	0.014	0.016	0.012
Mg	0.983	0.995	0.988	0.984	0.990	0.970	1.014	1.014	1.025	1.035
Ca	1.034	1.040	1.035	1.041	1.026	1.022	0.970	0.970	0.960	0.988
Компонент	Диопсидит									
	KP-6-2-13									
SiO ₂	54.62	55.73	54.92	55.13	54.51	54.94				
Al ₂ O ₃	1.04	0.77	0.81	0	2.78	2.47				
FeO	0	0	0	0	0	0				
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0.76	0	0				
MgO	17.58	17.44	17.81	18.04	16.65	17.18				
CaO	25.86	26.68	25.87	26.56	25.69	26.26				
Σ	99.09	100.63	99.41	100.49	99.63	100.86				
Формульные коэффициенты										
Si	1.986	1.997	1.990	1.987	1.967	1.962				
Al	0.045	0.033	0.035	0	0.118	0.104				
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0				
Fe ³⁺	0	0	0	0.021	0	0				
Mg	0.953	0.932	0.962	0.969	0.896	0.915				
Ca	1.008	1.025	1.005	1.026	0.993	1.005				

Примечание. ¹Na₂O – 0.44 мас. %, Na – 0.031 ф.к.; ²Na₂O – 0.42 мас. %, Na – 0.029 ф.к.

Note. ¹Na₂O – 0.44 wt %, Na – 0.031 apfu; ²Na₂O – 0.42 wt %, Na – 0.029 apfu.

Таблица 3. Представительные анализы апатита, мас. %

Table 3. Representative analyses of apatite, wt %

Компонент	Нефрит							
	С-22-ПК-2		С-2-ПК-16					
CaO	54.51		53.12 ¹	56.98	53.98 ²	54.60 ³	54.56	53.55
As ₂ O ₅	0		0	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	40.40		41.05	39.89	39.73	39.64	40.74	41.34
Cl	0		0	0	0	0	0	0
F	5.09		5.14	5.73	4.64	4.69	4.70	5.11
Формульные коэффициенты								
Ca	4.870		4.716	4.900	4.821	4.909	4.849	4.753
As	0		0	0	0	0	0	0
P	2.852		2.880	2.840	2.804	2.817	2.860	2.899
Cl	0		0	0	0	0	0	0
F	1.342		1.347	1.523	1.225	1.244	1.232	1.339

Компонент	Нефрит								
	С-16-ПК-1			С-16-ПК-2			КР-5-3-4		
CaO	52.73	52.46	53.04	52.10	51.85	54.09	56.56	54.78	53.56 ⁴
As ₂ O ₅	2.63	2.88	3.45	5.35	6.04	0.79	0	0	0
P ₂ O ₅	39.44	39.17	38.08	38.06	36.03	40.50	43.24	41.66	40.84
Cl	0	0	0	0	0	0	0.19	0	0
F	5.20	5.49	5.43	4.49	6.08	4.62	0	3.56	5.25
Формульные коэффициенты									
Ca	4.727	4.721	4.805	4.673	4.772	4.806	4.781	4.796	4.762
As	0.115	0.126	0.153	0.234	0.271	0.034	0	0	0
P	2.794	2.785	2.726	2.697	2.620	2.843	2.888	2.882	2.869
Cl	0	0	0	0	0	0	0.026	0	0
F	1.375	1.458	1.451	1.190	1.651	1.211	0	0.921	1.377

Компонент	Нефрит								
	КР52-5			V1-14В				КР53-7	
CaO	53.91	53.74	53.01	54.56	54.58	54.70	54.53	53.64	52.42 ⁵
As ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	40.51	40.27	41.38	41.34	40.63	42.11	41.61	42.08	40.93
Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0.43
F	5.59	5.99	5.61	4.10	4.79	3.19	3.86	4.28	5.31
Формульные коэффициенты									
Ca	4.830	4.838	4.721	4.806	4.857	4.760	4.786	4.707	4.691
As	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	2.868	2.865	2.911	2.877	2.857	2.896	2.885	2.917	2.894
Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0.061
F	1.477	1.591	1.474	1.066	1.257	0.818	1.000	1.109	1.402

Компонент	Нефрит				Диопсидит				
	V1-14		КР6-13		КР-6-2-13				
CaO	54.38	53.54	54.71	53.31	54.05	53.96	55.16	54.61	
As ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	
P ₂ O ₅	40.51	40.42	41.07	42.07	41.26	41.30	41.33	41.32	
Cl	0	0	0	0	0	0	0.17	0	
F	5.11	6.04	4.22	4.63	4.69	4.74	3.35	4.07	
Формульные коэффициенты									
Ca	4.855	4.816	4.833	4.690	4.785	4.777	4.838	4.810	
As	0	0	0	0	0	0	0	0	
P	2.858	2.873	2.867	2.924	2.886	2.889	2.865	2.876	
Cl	0	0	0	0	0	0	0.023	0	
F	1.346	1.605	1.101	1.202	1.225	1.239	0.867	1.057	

Таблица 3. Окончание

Table 3. Ending

Компонент	Эпидот-тремолитовый скарн		Доломит			
	PK-1		KP81 1 1		KP8 1 3	
CaO	51.36	53.88	53.16	53.51	55.09	53.28 ⁶
As ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	40.89	40.21	40.82	41.14	41.59	41.21
Cl	0.21	0.28	0	0	0	0
F	7.54	5.63	6.02	5.35	3.32	5.12
Формульные коэффициенты						
Ca	4.467	4.850	4.768	4.764	4.817	4.718
As	0	0	0	0	0	0
P	2.934	2.860	2.893	2.824	2.873	2.883
Cl	0.03	0.04	0	0	0	0
F	2.022	1.495	1.593	1.405	0.856	1.338

Примечание. Анализы нормированы на 100% в связи с завышением суммы из-за наложения О и F. ¹MgO – 0.69 мас. %, 0.085 ф.к.; ²Ce₂O₃ – 0.98 мас. %, Ce – 0.03 ф.к., SO₃ – 0.66 мас. %, S – 0.042 ф.к.; ³Ce₂O₃ – 1.07 мас. %, 0.033 ф.к.; ⁴SO₃ – 0.35 мас. %, S – 0.022 ф.к.; ⁵Na₂O – 0.91 мас. %, Na – 0.147 ф.к.; ⁶SO₃ – 0.39 мас. %, S – 0.024 ф.к.

Note. The analyses are normalized by 100% due to an overestimation of the amount due to the overlap of O and F. ¹MgO – 0.69 wt %, 0.085 apfu; ²Ce₂O₃ – 0.98 wt %, Ce – 0.03 apfu, SO₃ – 0.66 wt %, S – 0.042 apfu; ³Ce₂O₃ – 1.07 wt %, 0.033 apfu; ⁴SO₃ – 0.35 wt %, S – 0.022 apfu; ⁵Na₂O – 0.91 wt %, Na – 0.147 apfu; ⁶SO₃ – 0.39 wt %, S – 0.024 apfu.

Таблица 4. Представительные анализы эпидота, мас. %

Table 4. Representative epidote analyses, wt %

Компонент	Нефрит		Эпидот-тремолитовый скарн					
	C-2-PK-16		PK-1					
SiO ₂	34.55	34.38	39.71	35.42	37.03	34.49	39.03	38.27
Al ₂ O ₃	23.84	24.24	24.39	20.54	24.18	15.51	30.68	23.86
FeO	0.60	0	0	7.73	0	12.04	0.45	0.85
Fe ₂ O ₃	5.38	7.35	10.68	0.35	12.55	0.50	5.86	12.48
MnO	0.58	0.46	0	0	0	0	0.28	0
MgO	2.62	1.62	2.04	0	0	0	0	0
CaO	16.62	18.76	22.41	17.10	23.48	10.33	24.00	23.23
Ce ₂ O ₃	8.74	6.07	0	8.51	0	14.83	0	0
La ₂ O ₃	3.26	2.61	0	4.28	0	6.25	0	0
Pr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	1.80	0	0
Nd ₂ O ₃	2.57	2.16	0	2.80	0	4.41	0	0
Σ	98.76	97.66	99.23	96.72	97.25	100.15	100.32	98.69
Формульные коэффициенты								
Si	5.836	5.777	6.141	6.201	5.929	6.360	6.022	6.040
Al	4.747	4.801	4.446	4.492	4.564	3.372	5.308	4.439
Fe ²⁺	0.085	0	0	1.199	0	2.320	0.055	0.113
Fe ³⁺	0.684	0.929	1.243	0.048	1.512	0.069	0.647	1.482
Mn	0.083	0.066	0	0	0	0	0.035	0
Mg	0.660	0.407	0.470	0	0	0	0	0
Ca	3.008	3.378	3.714	3.002	4.028	2.040	3.932	3.927
Ce	0.540	0.373	0	0.579	0	1.001	0	0
La	0.203	0.162	0	0.293	0	0.425	0	0
Pr	0	0	0	0	0	0.121	0	0
Nd	0.155	0.130	0	0.186	0	0.290	0	0

Таблица 5. Представительные анализы хлорита, мас. %

Table 5. Representative analyses of chlorite, wt %

Компонент	Нефрит									
	PK6-13		C-22-PK-2				C-16-PK-2		KP-5-3-4	
SiO ₂	32.07	39.78	38.53	31.94	59.22	56.65	34.19	33.12	56.52	59.15
Al ₂ O ₃	19.76	10.23	12.62	12.45	0.62	1.23	15.36	16.76	0.62	0.42
FeO	1.34	2.36	0.41	0.45	0	0	0	0	0.36	0.33
MgO	36.32	31.69	34.66	35.09	29.62	28.37	35.95	35.94	26.53	28.89
CaO	0.20	0.44	1.82	8.45	0.25	1.12	0.24	0	1.55	0.92
Σ	89.68	84.49	88.04	88.38	89.71	87.37	85.74	85.81	85.59	89.71
Формульные коэффициенты										
Si	2.905	2.991	3.518	3.029	5.056	4.989	3.204	3.103	5.083	5.069
Al	2.110	2.168	1.358	1.392	0.063	0.127	1.697	1.851	0.066	0.042
Fe	0.101	0.080	0.031	0.036	0	0	0	0	0.027	0.024
Mg	4.904	4.663	4.717	4.961	3.770	3.725	5.023	5.019	3.557	3.690
Ca	0.019	0.022	0.178	0.859	0.023	0.106	0.024	0	0.150	0.085

Компонент	Нефрит				1	Доломит				
	V1-14B		V1-14	PK-3	PK-1	KP81-1-1		KP8-1-3		
SiO ₂	30.79	31.64	32.56	39.41	31.66	39.15	32.15	32.09	46.04	
Al ₂ O ₃	23.13	19.93	15.78	8.63	15.87	13.17	19.35	22.22	5.67	
FeO	1.61	1.14	3.32	0.31	2.50	0.68	0	0	0.66	
MgO	33.75	30.08	34.51	37.18	33.98	40.45	37.98	37.20	28.36	
CaO	0	1.20	0	0.66	0	0.20	0	0	1.08	
Σ	89.27	84.01	86.17	86.19	84.01	93.64	89.48	91.51	81.80	
Формульные коэффициенты										
Si	2.797	3.042	3.096	3.667	3.076	3.106	2.902	2.827	4.412	
Al	2.476	2.259	1.768	0.947	1.817	2.072	2.058	2.307	0.640	
Fe	0.122	0.092	0.264	0.024	0.203	0.043	0	0	0.053	
Mg	4.570	4.312	4.892	5.157	4.920	4.574	5.109	4.885	4.052	
Ca	0	0.124	0	0.066	0	0.063	0	0	0.111	

Примечание. 1 – эпидот-тремолитовый скарн.

Note. 1 – epidote-tremolite skarn.

содержит небольшое количество Al и Ca, слагает мономинеральные прожилки (см. рис. 5в) и залы банды прожилков кальцита.

В доломите, помимо упомянутых минералов, отмечены зерна *барита* с 1.28, 1.43 мас. % MgO, 2.03, 2.48 мас. % CaO, 14.62, 6.13 мас. % SrO; *рутила* с содержанием до 0.72 мас. % Al₂O₃, до 1.22 мас. % V₂O₅, до 3.29 мас. % Nb₂O₅; *бадделеита* с 0.91 мас. % HfO₂; сросток *галенита* с *халькопиритом*, зерно *англезита*.

В эпидот-тремолитовом скарне проанализированы зерна *циркона* с включениями бадделеита, кальцита, диопсида, фторапатита, хлорита и содержанием до 1.65 мас. % HfO₂. В интерстициях отмечаются зерна *титанита* с содержанием до 8.03 мас. % Al₂O₃, до 1.72 мас. % FeO, до 4.26 мас. % F.

В кальцит-тремолитовом скарне зафиксированы зерна *кварца* на контакте с диопсидом (см. рис. 5г).

Кварц в нефрите встречается довольно часто (9 анализов в 5 образцах), чаще всего образует ксеноморфные выделения в интерстициях зерен диопсида, реже изометричные зерна и прожилки в тре-

молите, оторочки зерен апатита. *Магнетит* (до 0.39 мас. % Cr₂O₃) образует угловатые зерна неправильной формы среди наиболее железистого тремолита. *Циркон* наблюдается в виде неправильно-округлых разобщенных зерен в тремолите (см. рис. 5з). *Оливин* – форстерит 1.69 мас. % FeO – образует включения в апатите. Удлиненные зерна *окерманита* находятся в тремолите. Зерно *уранинита* состава U_{16.7}Th_{6.8}Pb_{0.8}O_{24.4} присутствует в тремолите, тут же в тремолите встречены изометричные до удлиненных зерна *уранофана*. В агрегатах талька найдены зерна *самородной меди* и *самородной бронзы* с содержанием 7.30–53.65 мас. % Sn (см. рис. 5и). Зерно *самородного серебра* обнаружено в диопсиде. *Вульфенит*, *ванадинит* и *англезит* встречены в одном образце: вульфенит – в хлорите и на контакте талька и кальцита, ванадинит – в тремолите с небольшими тальк-кальцитовыми агрегатами. *Сильвин* образует единичное зерно в тремолите. Минералы марганца формируют пленки по трещинам, анализ показал существенные содержания бария и свинца, что приблизительно соответствует *голландиту* и *коронадиту* (см. рис. 5ж).

Таблица 6. Представительные анализы талька, мас. %

Table 6. Representative analyses of talc, wt %

Компонент	Нефрит							
	С-2-ПК-16						КР-5-3-4	КР53-7
SiO ₂	62.75	63.62	63.80	62.34	62.75	62.90	63.65	64.69
Al ₂ O ₃	0	0.91	0	0	0	1.62	0	0
FeO	0	0	0	0	0	0.30	0	0
MgO	31.19	31.36	31.38	31.14	30.6	31.11	31.29	32.02
CaO	0	0	0.24	0	0.18	0	0.70	0.25
Σ	93.94	95.89	95.41	93.48	93.52	95.93	95.64	96.97
Формульные коэффициенты								
Si	4.013	3.986	4.019	4.008	4.029	3.947	4.008	4.012
Al	0	0.067	0	0	0	0.120	0	0
Fe	0	0	0	0	0	0.016	0	0
Mg	2.974	2.928	2.946	2.985	2.929	2.910	2.937	2.960
Ca	0	0	0.016	0	0.013	0	0.047	0.017

Компонент	Нефрит							
	КР52-5	V1-14	С-16-ПК-2					
SiO ₂	54.40	62.47	63.13	62.02	61.81	60.05	61.98	63.26
Al ₂ O ₃	4.10	0	0	0	0.74	1.21	0.98	0
FeO	0	1.02	0	0	0	0	0	0
MgO	30.30	31.19	31.82	32.1	31.26	27.35	31.47	31.71
CaO	4.58	0	0	0	0	6.42	0	0
Σ	93.38	94.68	94.96	94.12	93.80	95.03	94.43	94.97
Формульные коэффициенты								
Si	3.602	3.988	3.998	3.969	3.964	3.888	3.950	4.004
Al	0.320	0	0	0	0.056	0.092	0.074	0
Fe	0	0.054	0	0	0	0	0	0
Mg	2.991	2.969	3.004	3.063	2.989	2.640	2.990	2.992
Ca	0.325	0	0	0	0	0.446	0	0

Таблица 7. Представительные анализы серпентина, мас. %

Table 7. Representative analyses of serpentine, wt %

Компонент	Нефрит						Эпидот-тремолитовый скарн					
	С-22-ПК-2		С-16-ПК-2				ПК-1					
SiO ₂	42.47	40.90	43.45	40.28	44.35	44.97	42.02	41.27	39.11	41.95	41.50	42.79
Al ₂ O ₃	1.89	2.32	1.00	0	0	0.38	0.45	1.93	6.29	1.36	0.74	0
FeO	0	0	0	0	0	0	3.36	4.44	1.92	2.65	2.93	0.68
MgO	39.58	36.73	40.68	36.5	40.1	42.24	40.53	40.88	39.02	39.62	40.68	42.42
CaO	0	0.32	0.35	0.18	0.36	0.18	0	0	0	0.29	0	0
Σ	83.94	80.28	85.48	76.97	84.81	87.77	86.36	88.52	86.34	85.87	85.85	85.89
Формульные коэффициенты												
Si	4.037	4.061	4.064	4.172	4.171	4.094	3.973	3.878	3.672	3.971	3.942	4.010
Al	0.212	0.272	0.110	0	0	0.041	0.051	0.208	0.696	0.152	0.082	0
Fe	0	0	0	0	0	0	0.266	0.341	0.151	0.210	0.233	0.053
Mg	5.609	5.436	5.672	5.635	5.622	5.733	5.713	5.591	5.462	5.590	5.760	5.927
Ca	0	0.034	0.035	0.020	0.037	0.018	0	0	0	0.030	0	0

ОБСУЖДЕНИЕ

Качественные характеристики нефрита Воймаканского месторождения показывают, что он соответствует действующим требованиям по качеству и возможности применения как камнесамоцветного сырья в соответствии с “Техническими условиями ТУ 41-07-052-90. Камни цветные природные в сырье” (1990). 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 (Сутурин и др., 2015; Гомбоев и др., 2017; Кислов и др., 2023). Спецификой Воймаканского месторождения можно считать широкое развитие в нефритоносных телах диопсидита. Порода обладает декоративностью: диопсидит цвета слоновой кости содержит линзочки, затейливые прослои нефрита серого, салатного, светло-бурого цвета, принимает зеркальную полировку. Такой диопсидит может использоваться как камнесамоцветное сырье для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций.

Минералы нефрита по морфологии и взаимоотношениям между собой разделяются по парагенезисам:

- реликтовый (минералы доломита, амфиболита, скарнов): доломит, магнетит, уранинит, фторпатит, циркон, эпидот I;
- метасоматический донефритовый: диопсид, кварц I, окерманит, оливин;
- метасоматический нефритовый: кальцит I, тремолит;
- регрессивный метасоматический: кварц II, серпентин, тальк, хлорит, эпидот II;
- вторичный: англезит, ванадинит, вульфенит, голландит (?), сильвин, уранофан, самородные бронза, медь, серебро.

Обращает на себя внимание повышенное содержание мышьяка в апатите нефрита из скв. 16 – 0.79–6.04 мас. % As_2O_5 . Это объясняется смесимостью с свабитом $Ca_5(AsO_4)_3F$ – минералом, встречающимся в метаморфических и метасоматических породах (Biagioni et al., 2016), к которым и относится нефрит.

Необычно выглядит набор таких минералов, как англезит, ванадинит, вульфенит, самородные медь и серебро, более характерных для зон гипергенеза рудных залежей. Предположительно, они заместили образовавшиеся в более раннюю гидротермальную стадию сульфиды, отмечающиеся на других месторождениях аподоломитового нефрита. В агрегатах талька найдены зерна самородной меди и самородной бронзы с содержанием Sn

7.30–53.65 мас. %, другие элементы не выявлены (см. рис. 5и).

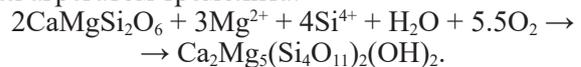
Упоминания о природной бронзе гидротермально-метасоматического происхождения имеются в монографии М.И. Новгородовой (1983); появление самородной бронзы в ореолах кимберлитовых трубок Архангельской алмазонасной провинции приписывается мантийным восстановительным газам (Макеев и др., 2002); интерметаллические соединения Cu–Sn глубинного происхождения описаны в редкоземельных месторождениях Китая (Xie et al., 2006); самородная бронза встречается в составе железо-марганцевых конкреций (Богданова и др., 2008); раннемагматическая бронза обнаружена в лунном реголите (Мохов и др., 2008); бронза Sn–Pb–Zn–Cu, также связанная с мантийными восстановительными флюидами, описана в Бобруйской кольцевой структуре в Беларуси (Левицкий и др., 2018); природная бронза Cu_4Sn_1 гидротермально-метасоматического происхождения установлена в графитсодержащих породах Ханкайского массива Приморья (Сафронов, 2018); самородная бронза зафиксирована в современных отложениях из расколов Людмилинской скважины в Соликамске Пермского края (Чайковский и др., 2019); интерметаллические соединения Cu–Sn, связанные с серпентинизацией или метасоматозом, обнаружены в ультраосновных породах Станового подвижного пояса на Дальнем Востоке (Kerezhinskas et al., 2020); природная бронза, сформированная в магматическую и метаморфогенную стадии, обнаружена в дацитах шатакского комплекса на западном склоне Южного Урала (Ковалев и др., 2022).

Самородная бронза в нефрите Воймаканского месторождения также имеет природное, а не техногенное происхождение: найдена непосредственно в аншлифах, обладает переменным составом, образует сростки с самородной медью в агрегатах позднего талька. Находится в ассоциации с другими минералами вторичного парагенезиса. Появление в составе минерала олова может быть связано с расположенными поблизости гранитами.

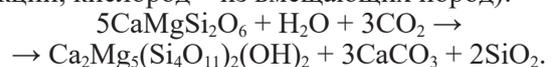
Формирование нефрита, судя по взаимоотношениям минералов, проходит в несколько стадий. На прогрессивной стадии метасоматоза доломит замещается диопсидом, кремнезем поступает из амфиболитов:



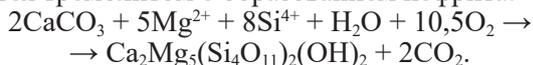
На регрессивном этапе уже диопсид при участии магнезия и кремнезема из амфиболитов замещается агрегатом тремолита:



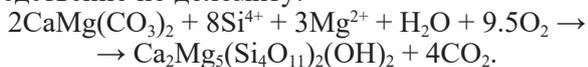
В другом варианте диопсид замещается кальцит-тремолитовым скарном (углекислота – из первой реакции, кислород – из вмещающих пород):



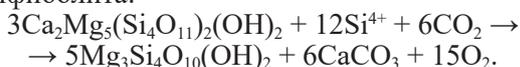
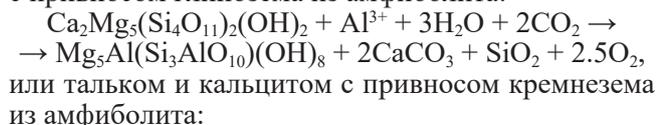
При этом кальцит скарна также может замещаться тремолитом с образованием нефрита:



В некоторых образцах диопсид не установлен, он весь заместился либо тремолит образуется непосредственно по доломиту:



Ранний призматический тремолит замещается спутанно-волокнистым скрытокристаллическим тремолитом. При продолжении регрессивного процесса тремолит замещается хлоритом и кальцитом с привнесом глинозема из амфиболита:



Замещение хлоритом значительно ухудшает качество нефрита. Еще более существенно сказывается замещение более мягким тальком, вплоть до полного оталькования.

Таким образом, в формировании и преобразовании нефрита сочетаются метасоматические и метаморфические процессы. Тектонические подвижки облегчают перемещение флюидов, метаморфический стресс приводит к формированию спутанно-волокнистой структуры, но затем к замещению нефрита хлоритом и тальком.

ВЫВОДЫ

Нефрит имеет светло-салатный, салатный, серо-салатный и бурый (медовый) цвет. Образует обособления в телах кальцит-тремолитового скарна на контакте доломитовых мрамора и амфиболита, преобразованного в эпидот-тремолитовый скарн. Нефрит соответствует действующим требованиям по качеству и возможности применения как камне-самоцветного сырья. Развито интенсивное замещение хлоритом и, особенно, тальком, что значительно ухудшает качество сырья. Диопсидит с линзочками, затайливыми прослоями нефрита серого, салатного, светло-бурого цвета может использоваться как камнесамоцветное сырье для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций.

Минералы нефрита отнесены к следующим парагенезисам: реликтовый (доломит, магнетит, уранинит, фторопатит, циркон, эпидот I); метасоматический донефритовый (диопсид, кварц I, окерманит, оливин); метасоматический нефритовый (кальцит I, тремолит); регрессивный метасоматический (кварц II, серпентин, тальк, хлорит, эпидот II); вторичный (англезит, ванадинит, вульфенит, голландит (?), сильвин, уранофан, самородные бронза, медь, серебро).

Представлена модель формирования нефрита с первоначальным образованием по доломиту диопсида, его замещением тремолитом или кальцит-тремолитовым агрегатом, далее ранний призматический тремолит замещается спутанно-волокнистым скрытокристаллическим тремолитом. Кальцит скарна также может замещаться тремолитом с образованием нефрита. При продолжении регрессивного процесса тремолит замещается хлоритом или тальком в ассоциации с кальцитом.

Благодарности

Авторы признательны за предоставленные материалы и информацию ООО "ВВС" и лично С.И. Москве и В.С. Кодочигову, за выполнение анализов – Е.В. Ходыревой. Замечания и предложения редактора С.Л. Вотякова и двух рецензентов редакции способствовали значительному улучшению рукописи. Использовано оборудование ЦКП "Геоспектр" ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богданова О.Ю., Горшков А.И., Новиков Г.В., Богданов Ю.А. (2008) Минеральный состав морфогенетических типов железо-марганцевых рудных образований Мирового океана. *Геол. руд. месторождений*, **50**(6), 526-534.
- Бурцева М.В., Рипп Г.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е. (2015) Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса. *Геология и геофизика*, **56**(3), 516-527. <https://doi.org/10.15372/GiG20150303>
- Гомбоев Д.М., Андросов П.В., Кислов Е.В. (2017) Кавоктинское месторождение светлоокрашенного нефрита: условия залегания и особенности вещественного состава. *Разведка и охрана недр*, (9), 44-50.
- Кислов Е.В., Худякова Л.И., Николаев А.Г. (2023) Отходы переработки аподоломитового нефрита и направление их использования. *Горн. науки и технологии*, **8**(2), 195-206. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>
- Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Пучков В.Н. (2022) Интерметаллиды Cu-Sn, Cu-Zn-Ni, Cu-Sn-Ti в магматических породах шатакского комплекса (западный склон Южного Урала). *Геол. вестник*, (3), 3-15. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2022-3-1>
- Кодочигов В.С., Курбатов С.Л. (2014) 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. (Не опубликовано.)
- Кочнев А.П., Краснов Д.А. (2017) Факторы нефритоносности Голубинско-Олламинского нефритоносного поля (Республика Бурятия). *Изв. Сибирск. отд-я Секции наук о Земле Рос. академии естеств. наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезн. ископаемых*, **40**(1), 52-65.
- Кочнев А.П., Краснов Д.А., Иванова Р.Н. (2018) Опыт многофакторного локального прогнозирования на примере Голубинско-Олламинского нефритоносного поля (Республика Бурятия). *Изв. Сибирск. отд-я*

- Секции наук о Земле Рос. академии естеств. наук. *Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*, **41**(4), 50-66. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-50-66>
- Левицкий В.И., Солодилова В.В., Завадич Н.С., Павлова Л.А., Левицкий И.В. (2018) Генетическая природа минерализации с самородными и интерметаллическими соединениями в Бобруйской кольцевой структуре (Республика Беларусь). *Докл. АН*, **481**(2), 174-178. <https://doi.org/10.31857/S086956520001198-0>
- Макеев А.Б., Кисель С.И., Соболев В.К., Филиппов В.Н., Брянчанинова Н.И. (2002) Самородные металлы в ореолах кимберлитовых трубок Архангельской алмазодобывающей провинции. *Докл. АН*, **385**(5), 677-681.
- Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А., Магазина Л.О., Ашихмина Н.А., Копорулина Е.В. (2008) Находка необычных сложных оксидов и η-бронзы в лунном реголите. *Докл. АН*, **421**(3), 387-390.
- Новгородова М.И. (1983) Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 288 с.
- Сафронов П.П. (2018) Рудная минерализация в графитосодержащих породах Ханкайского массива Приморья по данным растровой электронной микроскопии. *Вестн. Кольск. НЦ РАН*, **4**(10), 78-96. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.4.78-96>
- Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. (2015) Месторождения нефритов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 377 с.
- Технические условия ТУ 41-07-052-90. Камни цветные природные в сырье. (1990) М.: Кварцсамоцветы, 28 с.
- Филиппова А.А., Мехоношин А.С., Бычинский В.А., Чудненко К.В. (2021) Физико-химические особенности флюидов, сформировавших апогипербазитовые и апокарбонатные нефриты. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **332**(3), 168-178. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/03/3112>
- Чайковский И.И., Коротченкова О.В., Федоров Т.В. (2019) Современное минералообразование в месте разгрузки рассолов Людмилинской скважины (г. Соликамск, Пермский край). *Вестн. Пермск. ун-та. Геол.*, **18**(4), 347-354. <https://doi.org/10.17072/psu-geol.18.4.347>
- Adamo I., Bocchio R. (2013) Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and Update. *Gems Gemol.*, **49**(2), 98-106. <https://doi.org/10.5741/GEMS.49.2.98>
- Biagioni C., Bosi F., Hålenius U., Pasero M. (2016) The crystal structure of svabite, Ca₅(AsO₄)₃F, an arsenate member of the apatite supergroup. *Amer. Miner.*, **101**(8), 1750-1755. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5636>
- Feng Y., He X., Jing Y. (2022) A new model for the formation of nephrite deposits: A case study of the Chuncheon nephrite deposit, South Korea. *Ore Geol. Rev.*, **141**, 104655. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104655>
- Gil G., Bagiński B., Gunia P., Madej S., Sachanbiński M., Jokubauskas P., Belka Z. (2020) 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.*, **118**, 103335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103335>
- Gil G., Barnes J.D., Boschi C. (2015) Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): Petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin. *Canad. Miner.*, **53**, 533-556. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500018>
- Kepezhinskas P.K., Kepezhinskas N.P., Berdnikov N.V., Krutikova V.O. (2020) Native metals and intermetallic compounds in subduction-related ultramafic rocks from the Stanovoy mobile belt (Russian Far East): Implications for redox heterogeneity in subduction zones. *Ore Geol. Rev.*, **127**, 103800. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103800>
- Korybska-Sadło I., Gil G., Gunia P., Horszowski M., Sitarz M. (2018) Raman and FTIR spectra of nephrites from the Złoty Stok and Jordanów Śląski (the Sudetes and Fore-Sudetic Block, SW Poland). *J. Mol. Struct.*, **1166**, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.020>
- Li N., Bai F., Peng Q., Liu M. (2023) Geochemical Characteristics of Nephrite from Chuncheon, South Korea: Implications for Geographic Origin Determination of Nephrite from Dolomite-Related Deposits. *Crystals*, **13**, 1468. <https://doi.org/10.3390/cryst13101468>
- Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L., Gose J., Wu R.-Y., Wang S.-Q., Liu Y., Tang G.-C., Li X.-H. (2015) 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*, **220-223**, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.019>
- Nichol D. (2000) Two contrasting nephrite jade types. *J. Gemmol.*, **27**(4), 193-200.
- Tan T.L., Ng N.N., Lim N.C. (2013) Studies on nephrite and jadeite jades by Fourier transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopic techniques. *Cosmos*, **9**(1), 47-56. <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
- Xie Y., Hou Z., Xu J., Yuan Z., Bai G., Li X. (2006) Discovery of Cu-Zn, Cu-Sn intermetallic minerals and its significance for genesis of the Mianning-Dechang REE Metallogenic Belt, Sichuan Province, China. *Sci. China, Ser. D Earth Sci.*, **49**(6), 597-603. <https://doi.org/10.1007/s11430-006-0597-9>
- Yui T.-F., Kwon S.-T. (2002) Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea. *Econom. Geol.*, **97**(3), 593-601. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.593>
- Zhang C., Yu X., Jiang T. (2019) Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, north-east China: Implications for metamorphic conditions and ore genesis. *Geosci. Front.*, **10**(2), 425-437. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.009>
- Zhang C., Yang F., Yu X., Liu J., Carranza E.J.M., Chi J., Zhang P. (2023) Spatial-temporal distribution, metallogenic mechanisms and genetic types of nephrite jade deposits in China. *Front. Earth Sci.*, **11**, 1047707. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1047707>
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh. (2019) Black nephrite jade from Guangxi, Southern China. *Gems Gemol.*, **55**(2), 198-215. <https://doi.org/10.5741/GEMS.55.2.198>

REFERENCES

- Adamo I., Bocchio R. (2013) Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and Update. *Gems Gemol.*, **49**(2), 98-106. <https://doi.org/10.5741/GEMS.49.2.98>
- Biagioni C., Bosi F., Hålenius U., Pasero M. (2016) The crystal structure of svabite, Ca₅(AsO₄)₃F, an arsenate member of the apatite supergroup. *Amer. Miner.*, **101**(8),

- 1750-1755. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5636>
- Bogdanova O.Yu., Gorshkov A.I., Novikov G.V., Bogdanov Yu.A. (2008) Mineralogy of Morphogenetic Types of Ferromanganese Deposits in the World Ocean. *Geol. Ore Depos.*, **50**(6) (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **50**(6), 526-534), 462-469.
- Burtseva M.V., Ripp G.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. (2015) Nephrites of East Siberia: Geochemical features and problems of genesis. *Russ. Geol. Geophys.*, **56**, 402-410 (translated from *Geol. Geofiz.*, **56**(3), 516-527). <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2015.02.003>
- Chaikovskii I.I., Korotchenkova O.V., Fedorov T.V. (2019) Modern minerals formation at the site of brine discharge from the Lyudmilinskaya well (Solikamsk, Perm region). *Vestn. Permskogo Universiteta. Geol.*, **18**(4), 347-354. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.4.347>
- Feng Y., He X., Jing Y. (2022) A new model for the formation of nephrite deposits: A case study of the Chuncheon nephrite deposit, South Korea. *Ore Geol. Rev.*, **141**, 104655. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104655>
- Filippova A.A., Mekhonoshin A.S., Bychinskii V.A., Chudnenko K.V. (2021) Physico-chemical features of fluides, which formed apohyperbasite, and apocarbonate jades. *Izvestiya Tomskogo Politekh. Universiteta. Inzhiniring Georesursov*, **332**(3), 168-178. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/03/3112>
- Gil G., Bągiński B., Gunia P., Madej S., Sachanbiński M., Jokubauskas P., Belka Z. (2020) 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.*, **118**, 103335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103335>
- Gil G., Barnes J.D., Boschi C. (2015) Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): Petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin. *Canad. Miner.*, **53**, 533-556. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500018>
- Gomboev D.M., Androsov V.P., Kislov E.V. (2017) Kavokta deposit of light-colored nephrite: occurrence and characteristics of the composition. *Razvedka i Okhrana Nedr.* (9), 44-50. (In Russ.)
- Kepezhinskas P.K., Kepezhinskas N.P., Berdnikov N.V., Krutikova V.O. (2020) Native metals and intermetallic compounds in subduction-related ultramafic rocks from the Stanovoy mobile belt (Russian Far East): Implications for redox heterogeneity in subduction zones. *Ore Geol. Rev.*, **127**, 103800. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103800>
- Kislov E.V., Khudyakova L.I., Nikolaev A.G. (2023) Dolomite type nephrite processing wastes and their application. *Gornye Nauki i Tekhnologii*, **8**(2), 195-206. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>
- Kochnev A.P., Krasnov D.A. (2017) Factors of nephrite content of the Golyube-Ollami nephrite field (Republic of Buryatia). *Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya Sektzii Nauk o Zemle Ros. Akademii Estestv. Nauk. Geologiya, Razvedka i Razrabotka mestorozhdenii Polezn. Iskopaemykh*, **40**(1), 52-65. (In Russ.)
- Kochnev A.P., Krasnov D.A., Ivanova R.N. (2018) Experience of multifactor local forecasting on example of the Golubinsko-Ollaminskoe nephrite field (Republic of Buryatia). *Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya Sektzii Nauk o Zemle Ros. Akademii Estestv. Nauk. Geologiya, Razvedka i Razrabotka mestorozhdenii Polezn. Iskopaemykh*, **41**(4), 50-66. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-50-66>
- Kodochigov V.S., Kurbatov S.L. (2014) Report on prospecting and evaluation work on the Voimakán occurrence of carbonate type nephrite for 2011-2014, with reserves calculated as of 1.02.2014. Ulan-Ude. (In Russ. Unpubl.)
- Korybska-Sadło I., Gil G., Gunia P., Horszowski M., Sitarz M. (2018) Raman and FTIR spectra of nephrites from the Złoty Stok and Jordanów Śląski (the Sudetes and Fore-Sudetic Block, SW Poland). *J. Mol. Struct.*, **1166**, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.020>
- Kovalev S.G., Kovalev S.S., Puchkov V.N. (2022) Intermetallics Cu-Sn, Cu-Zn-Ni, Cu-Sn-Ti in igneous rocks of the Shatak complex. *Geol. Vestn.*, (3), 3-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2022-3-1>
- Levitskiy V.I., Solodilova V.V., Zavadich N.S., Pavlova L.A., Levitskiy I.V. (2018) Genetic Nature of Mineralization with Native and Intermetallic Compounds in the Bobruisk Ring Structure (Republic of Belarus). *Dokl. Earth Sci.*, **481**(1), 859-863 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **481**(2), 174-178). <https://doi.org/10.1134/S1028334X18070140>
- Li N., Bai F., Peng Q., Liu M. (2023) Geochemical Characteristics of Nephrite from Chuncheon, South Korea: Implications for Geographic Origin Determination of Nephrite from Dolomite-Related Deposits. *Crystals*, **13**, 1468. <https://doi.org/10.3390/cryst13101468>
- Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L., Gose J., Wu R.-Y., Wang S.-Q., Liu Y., Tang G.-C., Li X.-H. (2015) 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*, **220-223**, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.019>
- Makeev A.B., Kisel S.I., Sobolev V.K., Filippov V.N., Bryanchaninova N.I. (2002) Native Metals in Kimberlite Pipe Aureoles of the Arkhangelsk Diamondiferous Province. *Dokl. Earth Sci.*, **385A**(6), 714-717 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **385**(5), 677-681).
- Mokhov A.V., Kartashov P.M., Bogatkov O.A., Magazina L.O., Ashikhmina N.A., Koporulina E.V. (2008) Find of unusual complex oxides and η-bronze in lunar regolith. *Dokl. Earth Sci.*, **421A**(6), 923-925 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **421**(3), 387-390). <https://doi.org/10.1134/S1028334X08060135>
- Novgorodova M.I. (1983) Native metals in hydrothermal ores. Moscow, Nauka Publ., 288 p. (In Russ.)
- Nichol D. (2000) Two contrasting nephrite jade types. *J. Gemmol.*, **27**(4), 193-200.
- Safronov P.P. (2018). Ore mineralization in graphite-bearing rocks of the Khanka massif of Primorye according to scanning electron microscopy. *Vestnik Kol'skogo NTs RAN*, **4**(10), 78-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.4.78-96>
- Specifications TU 41-07-052-90. Colored natural stones in raw materials. (1990) Moscow, Quartssamotsvety Publ., 28 p. (In Russ.)
- Suturin A.N., Zamaletdinov R.S., Sekerina N.V. (2015) Deposits of nephrite. Irkutsk, Publishing house of the ISU, 377 p. (In Russ.)
- Tan T.L., Ng N.N., Lim N.C. (2013) Studies on nephrite and jadeite jades by Fourier transform infrared (FTIR) and

- Raman spectroscopic techniques. *Cosmos*, **9**(1), 47-56. <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
- Xie Y., Hou Z., Xu J., Yuan Z., Bai G., Li X. (2006) Discovery of Cu–Zn, Cu–Sn intermetallic minerals and its significance for genesis of the Mianning-Dechang REE Metallogenic Belt, Sichuan Province, China. *Sci. China, Ser. D Earth Sci.*, **49**(6), 597-603. <https://doi.org/10.1007/s11430-006-0597-9>
- Yui T.-F., Kwon S.-T. (2002) Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea. *Econom. Geol.*, **97**(3), 593-601. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.593>
- Zhang C., Yu X., Jiang T. (2019) Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, north-east China: Implications for metamorphic conditions and ore genesis. *Geosci. Front.*, **10**(2), 425-437. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.009>
- Zhang C., Yang F., Yu X., Liu J., Carranza E.J.M., Chi J., Zhang P. (2023) Spatial-temporal distribution, metallogenic mechanisms and genetic types of nephrite jade deposits in China. *Front. Earth Sci.*, **11**, 1047707. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1047707>
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh. (2019) Black nephrite jade from Guangxi, Southern China. *Gems Gemol.*, **55**(2), 198-215. <https://doi.org/10.5741/GEMS.55.2.198>