

Научная статья

УДК 553.89

doi: 10.17223/25421379/34/6

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ АПОДОЛОМИТОВОГО НЕФРИТА КАВОКТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СРЕДНЕ-ВИТИМСКАЯ ГОРНАЯ СТРАНА: ЗАЛЕЖЬ № 1 УЧАСТКА ПРОЗРАЧНЫЙ



Евгений Владимирович Кислов

Геологический институт им. Н.Л. Добрецово СО РАН, Улан-Удэ, Россия, evg-kislov@ya.ru

Аннотация. На оптическом и электронном микроскопах изучены 16 образцов керна. Диагностированы 25 реликтовых, метасоматических донефритовой и нефритовой стадий, гидротермальных и вторичных минералов. Образование и изменение нефрита: доломит замещается диопсидом, диопсид – тремолитом, призматический тремолит – спутанно-волокнистым, тремолит – хлоритом. Граниты – источник тепла. Тектоническое дробление облегчает проникновение флюида, стресс обеспечивает спутанно-волокнистую скрытокристаллическую текстуру.

Ключевые слова: нефрит, минеральный состав, тремолит, метаморфизм, метасоматоз

Благодарности: автор признателен за предоставленные материалы АО «Забайкальское горнорудное предприятие», персонально А.П. Суздальницкому, Д.Б. Шаракшиновой и Е.В. Раевской, выполнение анализов – Е.А. Хромовой и Е.В. Ходыревой, подготовку иллюстраций – В.В. Вантееву и А.В. Трофимову. Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А21-121011390003-9 с использованием оборудования ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

Источник финансирования: анализы выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>.

Для цитирования: Кислов Е.В. Минеральный состав аподоломитового нефрита Кавоктинского месторождения, Средне-Витимская горная страна: залежь № 1 участка Прозрачный // Геосферные исследования. 2025. № 1. С. 79–94. doi: 10.17223/25421379/34/6

Original article

doi: 10.17223/25421379/34/6

MINERAL COMPOSITION AND GENESIS OF DOLOMITE TYPE NEPHRITE, KAVOKTA DEPOSIT, MIDDLE VITIM MOUNTAIN COUNTRY: VEIN 1 OF SITE PROZRACHNY

Evgeniy V. Kislov

N.L. Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia, evg-kislov@ya.ru

Abstract. Kavokta deposit of dolomite type nephrite is located at the Middle Vitim mountain country. The deposit area is composed of granite of the Late Paleozoic Vitimkan complex. The granite contain xenoliths of complex shape, remnants in the sagging roofs of Lower Proterozoic rocks. They are represented by metasandstone, crystalline schist, amphibolite, and dolomite marble. The deposit has 3 sites consisting of 6 nephrite-bearing zones, including nephrite lodes. The Prozrachny site in the north-west of the deposit includes nephrite-bearing zones 1 and 2. Nephrite-bearing zone 1 of sublatitudinal strike is located on the southern flank of the site and unites veins 1, 4, 9. Vein 1 is a nephrite body with tectonic contacts of complex morphology with constrictions, bulges in the area of contact between dolomite marble and epidotized amphibolite. The calcite-tremolite and epidote-tremolite skarns are wall rocks. The vein is 15 m long, 0.2–2.8 m thick, steeply dipping to the southwest at an angle of 60–70°. It's opened to a depth of 15 m. At depth, a complex propeller-shaped morphology is revealed due to changes in incidence angles from 20 to 65°.

16 nephrite samples from the drill core of this vein were studied by optical and electron microscopes. Nephrite is characterized by a variety of structures and textures. 25 minerals have been identified and classified as relic, metasomatic pre-nephrite and nephrite stages, hydrothermal and secondary.

The high content of F in dolomite type nephrite is explained by the wide development of fluorapatite and fluorophlogopite. The intensity of the green color of nephrite is explained by the admixture of Fe in tremolite, and the black color is explained by its transition to actinolite in the areas of contact with epidote-tremolite skarn after amphibolite.

A model of nephrite formation is presented: development of diopside after dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2\text{CO}_2$, replacement of diopside by tremolite $2\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{MgO} + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$ or calcite-tremolite skarn

$5\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2 + 3\text{CaCO}_3 + 6\text{SiO}_2$, and replacement of calcite by tremolite $2\text{CaCO}_3 + 5\text{MgO} + 8\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2 + 2\text{CO}_2$, replacement of prismatic tremolite by entangled fibrous one. In some cases, tremolite can develop directly over dolomite $4\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 8\text{SiO}_2 + 6\text{MgO} + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2 + 8\text{CO}_2$. Another option: the formation of tremolite through the forsterite stage: $2\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CaCO}_3 + 2\text{CO}_2$; $5\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\text{CaCO}_3 + 11\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2 + 2\text{CO}_2$. Tremolite is subsequently replaced by chlorite and calcite $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{Mg}_5\text{Al}[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH})_8 + 2\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + 4\text{O}_2$.

Granite provide heat for metasomatism. Participation in the nephrite formation amphibolite determines the variety of nephrite colors. The role of metamorphism is reduced to tectonic fragmentation, which facilitates the penetration of fluids, and stress, which provides a nephrite tangled-fibrous cryptocrystalline texture.

Keywords: *nephrite, mineral composition, tremolite, metamorphism, metasomatism*

Acknowledgments: The author is grateful for the materials provided by JSC "Transbaikal Mining Enterprise", personally by A.P. Suzdalnitsky, D.B. Sharakhshinova and E.V. Raevskaya, analysts E.A. Khromova and E.V. Khodyreva, preparation of illustrations – to V.V. Vanteev and A.V. Trofimov. The work was carried out within the framework of the topic of the research work Project № AAAA-A21-121011390003-9. The study was conducted using facilities of Analytical Center «Geospectr» of GIN SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

Source of financing: The analysis were supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>.

For citation: Kislov E.V. (2025) Mineral composition and genesis of dolomite type nephrite, Kavokta deposit, Middle Vitim mountain country: vein 1 of site Prozhachny. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. 79–94. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/34/6

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. Наиболее ценятся белый просвечивающий нефрит, черный, ярко-зеленый с минимальным количеством рудных минералов, а также с эффектом «кошачьего глаза», аллювиальные гальки с каемками прокрашивания.

Месторождения нефрита относятся к двум эндогенным геолого-промышленным типам: апоультрамафитовым метасоматитам офиолитов (апосерпентинитовому) и апокарбонатным тремолит-кальцитовым магнезиальным скарнам (аподоломитовому). Ко второму типу близки месторождения Дахуа [Zhong et al., 2019] и Лодянь [Zhang et al., 2015], образовавшиеся на контакте диабазы и известняка, или Луаньчуань [Ling et al., 2015] – в доломите вне контакта с метагаббро. Месторождения первого типа – источник нефрита преимущественно зеленого, до коричневого (табачного, болотного), черного цвета, месторождения второго типа дают в основном светлоокрашенный нефрит – от белого до светло-зеленого (салатного), коричневого (медового), реже черного. Экзогенный геолого-промышленный тип представлен россыпями, из которых наиболее продуктивны аллювиальные.

По состоянию на 01.01.2022 Государственным балансом запасов в России учитываются 26 месторождений нефрита. В 2021 г. разрабатывалось 7 месторождений в Бурятии, включая Кавоктинское, Нижне-

Олломинское, Сергеевскую залежь, Хайтинское аподоломитового нефрита. Из других месторождений аподоломитового нефрита Воймаканское в Бурятии подготавливалось к отработке, Удоканское в Забайкальском крае и Буромское в Бурятии разведывались. В нераспределенном фонде месторождений аподоломитового нефрита нет. Все месторождения аподоломитового нефрита России находятся в Витимском нефритоносном районе.

За рубежом большинство месторождений аподоломитового нефрита находятся в Китае. Наиболее крупные известные месторождения в Северо-Западном Китае. В Синцзян-Уйгурском автономном районе находится отрабатываемый уже 6 тысячелетий нефритоносный пояс Хотан как с коренными месторождениями [Liu et al., 2015; Zhang et al., 2022; Nangeelil et al., 2023], среди которых наиболее известен и изучен Аламас [Liu et al., 2010, 2011a], так и знаменитыми россыпными месторождения Юрункаш – «река белого нефрита» и Каракаш – «река черного нефрита» [Liu et al., 2011b, 2016; Jing, Liu, 2022]. К поясу Хотан с востока примыкают нефритоносные районы Алтынтаг [Jiang et al., 2020; Liang et al., 2022] и Южный Алтынтаг [Gao et al., 2019b; Liu et al., 2021]. Еще восточнее находятся Голмуд и другие месторождения провинции Цинхай [Yu et al., 2016a, 2016b; Gong et al., 2023].

Ряд месторождений находится в Северо-Восточном Китае: Тели в провинции Хэйлунцзян [Gao et al., 2019a; Xu et al., 2021; Xu, Bai, 2022], Паньши в провинции Гиринь (Цзилинь) [Bai et al., 2019], Сюань и Санпийю в провинции Ляонин [Zhang et al., 2019; Zheng et al., 2019]. В Восточном Китае известно месторождение Сяомэйлин в провинции Цзянсу [Li et

al., 2021, 2022]. В Южном Китае находятся месторождения Луаньчуань в провинции Хэнань [Ling et al., 2015; Chen et al., 2022] и Дахуа в Гуанси-Джуанском автономном районе [Yin et al., 2014; Zhong et al., 2019; Bai et al., 2020]. В Юго-Западном Китае – месторождения Лунси в провинции Сычуань [Wang et al., 2022] и Лодянь в провинции Гуйжоу [Zhang et al., 2015; Wang et al., 2020; Li et al., 2023].

В других странах следует отметить месторождения Чунчон в Южной Корее [Yui, Kwon, 2002; Feng et al., 2022], Коуэлл на полуострове Эйр в Южной Австралии [Nichol, 2000; Tan et al., 2013], Альпе Мастабия (Вал Маленко) в Ломбардии, Италия [Adamo, Vocchio, 2013], Злоты Сток в Нижней Силезии, Польша [Gil et al., 2015, 2020; Korybska-Sadło et al., 2018].

При этом российские месторождения светлоокрашенного нефрита изучены недостаточно. Особенно это касается вещественного состава, без исследования которого затруднительно понимание условий формирования и выработки поисковых критериев нефрита.

Эта работа посвящена геологической обстановке, минеральному составу и особенностям формирования нефрита Кавоктинского месторождения на примере залежи № 1 участка Прозрачный.

Кавоктинское месторождение

Геологическое изучение Средне-Витимской горной страны началось в середине XIX в. в связи с поисками золота и изысканием путей снабжения приисков. Тем не менее нефрит в этом районе долго оставался неизвестным. В 1944 г. Ю.К. Дзевановским в нижнем течении р. Калар (правый приток Витима) в 24 км от устья, в урочище Топор, найден валун фиштакково-зеленого нефрита размером 7×20×35 см, а два года спустя о подобной находке в нижнем течении р. Ципы (левый приток Витима) сообщил В.П. Селиванов. В 1975 г. М.И. Грудинин (Институт земной коры, г. Иркутск) при проведении научно-исследовательских работ в среднем течении р. Витим обнаружил многочисленные валуны и гальки светло-зеленого нефрита в аллювиальных отложениях. В 1976 г. для проверки заявки М.И. Грудинина экспедицией «Байкалкварцсамоцветы» была создана Шаманская (позднее Витимская) поисковая партия. В 1976–1978 гг. геологами этой партии был охватуен ореол распространения валунов нефрита по рекам Витим, Бамбуйка и Ципа, начаты поиски коренных месторождений галечно-валунным методом.

Светлоокрашенный нефрит в бассейне р. Кавокта обнаружен в 1983 г. при проведении экспедицией «Байкалкварцсамоцветы» поисковых работ на

нефрит в районе нижнего течения р. Ципа. Первый аллювиальный валун нефрита нашел Ю.С. Вепрев. В.И. Стругов и В.Я. Беляев выявили и оконтурили ореол распространения валунов нефрита в русловых отложениях р. Кавокта. В 1984 г. В.И. Струговым и Н.В. Секериной найдены коренные выходы. В 1984–1993 гг. в бассейне верхнего течения р. Кавокта было разведано Кавоктинское коренное месторождение с Прозрачным и Медвежьим участками, переданное для отработки в 1994 г. С 2007 г. семейно-родовой эвенкийской общиной «Дылача» проводились добыча с эксплуатационной разведкой. С 2014 г. геологоразведочные работы и эксплуатацию ведет АО «Забайкальское горнорудное предприятие». В 2021 г. поставлены на баланс запасы Левобережного участка.

Кавоктинское – это наиболее крупное месторождение аподолмитового нефрита России: на 01.01.2022 запасы сортового нефрита по С₂ 346,81 т. В 2021 г. добыто 70,36 т или 28,58 % добычи сортового нефрита в России. Месторождение выделяется высоким качеством нефрита – повышенной блочностью, интенсивной просвечиваемостью, белой, светло-зеленой окраской, коричневыми каемками прокрашивания, позволяющими вырезать многоцветные изделия.

Район месторождения сложен гранитами, диоритами 1-й фазы позднепалеозойского витимканского комплекса (рис. 1). В меньшей степени проявлены небольшие тела лейкократовых гранитов 2-й фазы витимканского комплекса. В гранитах залегают ксенолиты сложной формы, останцы в провисах кровли пород талалинской толщи (ранее – суванихинской свиты), как сейчас считается, нижнего протерозоя. Они представлены метапесчаниками, кристаллическими сланцами, амфиболитами, доломитовыми мраморами (рис. 1). Степень метаморфизма отвечает амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фациям.

Полная метасоматическая зональность: доломитовый мрамор – кальцифир – кальцит-тремолитовый скарн с нефритом – эпидот-тремолитовый скарн – амфиболит или диорит. Чаше наблюдаются сокращенные варианты зональности.

Методы исследования

Минеральный состав 16 образцов керна, полученных при геологоразведочных работах АО «Забайкальское геологоразведочное предприятие» в пределах залежи № 1, изучен в шлифах с помощью петрографического микроскопа Olympus Vx-51 (Япония) и в аншлифах на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энергодис-

персионного микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments, Великобритания, в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ), аналитики Е.А. Хромова и Е.В. Ходырева. Условия измерения: ускоряющее напряжение –

20 кВ, ток зонда – 0,3–0,4 нА, размер зонда – < 0,1 мкм, время измерения – 50 с (время жизни), погрешность анализа достигает 2–4 мас. % в зависимости от качества поверхности образца и особенностей его состава.

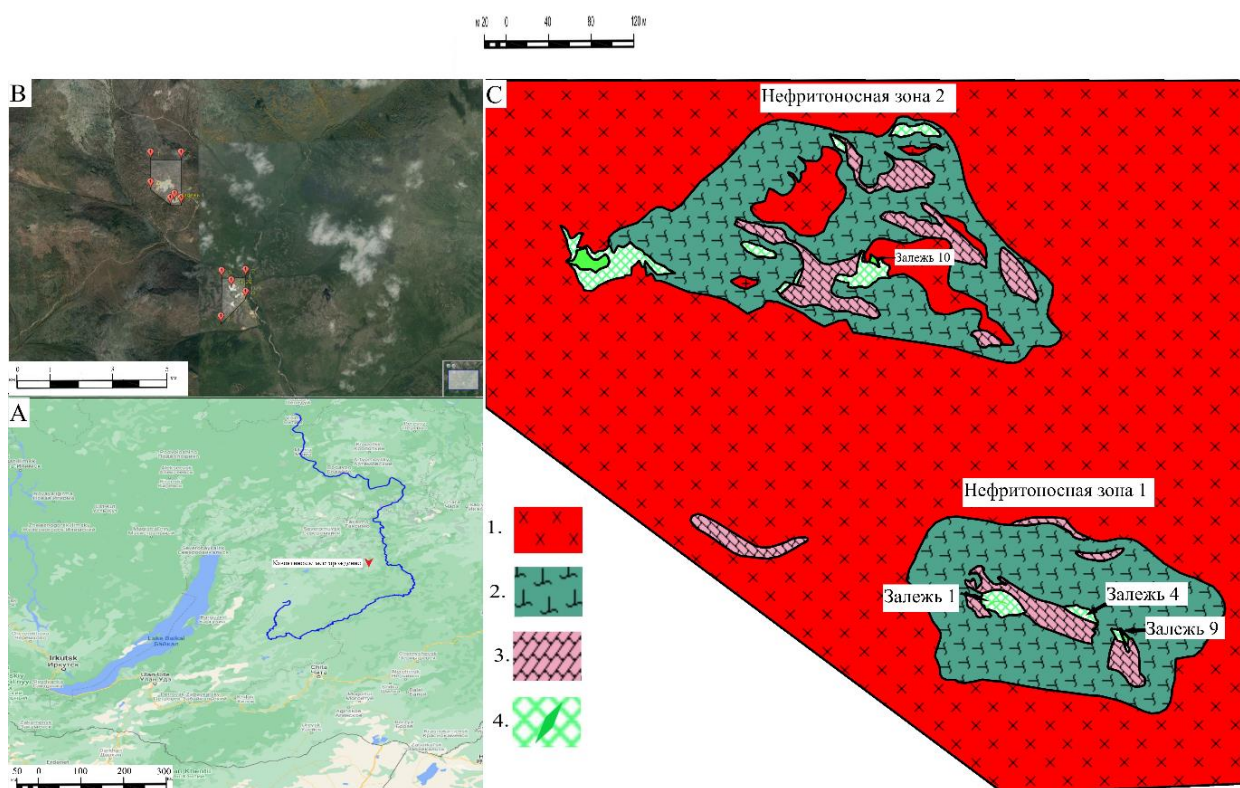


Рис. 1. Схема геологического строения участка Прозрачный Кавоктинского месторождения (по материалам АО «ЗГРП»)

А – расположение Кавоктинского месторождения. В – участки Кавоктинского месторождения – рамками обозначены выше Прозрачный участок, ниже – Медвежий, восточнее к нему примыкает Левобережный участок. С – участок Прозрачный: 1 – гранит, 2 – амфиболит, 3 – доломит, 4 – кальцит-тремолитовый скарн с нефритом

Fig. 1. Scheme of the Prozrachny site geological structure, Kavokta deposit (based on the materials of JSC "Transbaikal Mining Enterprise")

А – location of the Kavokta deposit. В – sites of the Kavokta deposit – the frames indicate a Prozrachny site above, a Medvezhy one below, the Levoberezhny section adjoins it to the east. С – Prozrachny site: 1 – granite, 2 – amphibolite, 3 – dolomite, 4 – calcite-tremolite rock with nephrite

Используется разработанный в ГИН СО РАН интерактивный программный комплекс для обработки результатов исследования. В программе реализован оригинальный метод идентификации минеральных фаз, основанный на стехиометрии минералов. Результат работы программы – отчет о результатах исследования в виде набора таблиц Excel, содержащий концентрации элементов и компонентов, атомные проценты, формулы, рассчитанные с учетом идентификации минералов. Для ряда минералов (хромит, эпидот, гранат, магнетит, мусковит, пироксен, шпинель, ильменит) содержание 2- и 3-валентного железа рассчитывается методом итеративной подгонки к стехиометрии с использованием поиска золотого сечения.

Залежь № 1

На месторождении выделено три участка, состоящих из шести нефритоносных зон, включающих в себя залежи нефрита (см. рис. 1). Участок Прозрачный на северо-западе месторождения включает нефритоносные зоны 1 и 2. Нефритоносная зона 1 субширотного простирания находится на южном фланге участка и объединяет залежи № 1, 4, 9 (рис. 2).

Залежь № 1 – нефритовое тело с тектоническими контактами сложной морфологии с пережимами, раздувами в районе контакта доломитовых мраморов с эпидотизированными амфиболитами (рис. 2). Длина залежи 15 м, мощность 0,2–2,8 м, падение крутое на

юго-запад под углом 60–70°. Вскрыта на глубину 15 м. На глубине выявляется сложная пропеллерообразная морфология за счет изменения углов падения от 20 до 65° [Гомбоев и др., 2017]. Эрозией была

вскрыта небольшая часть залежи (рис. 2). В основном она была прослежена буровыми скважинами (рис. 2), керн которых и был использован в данной работе, а затем вскрыта карьером.

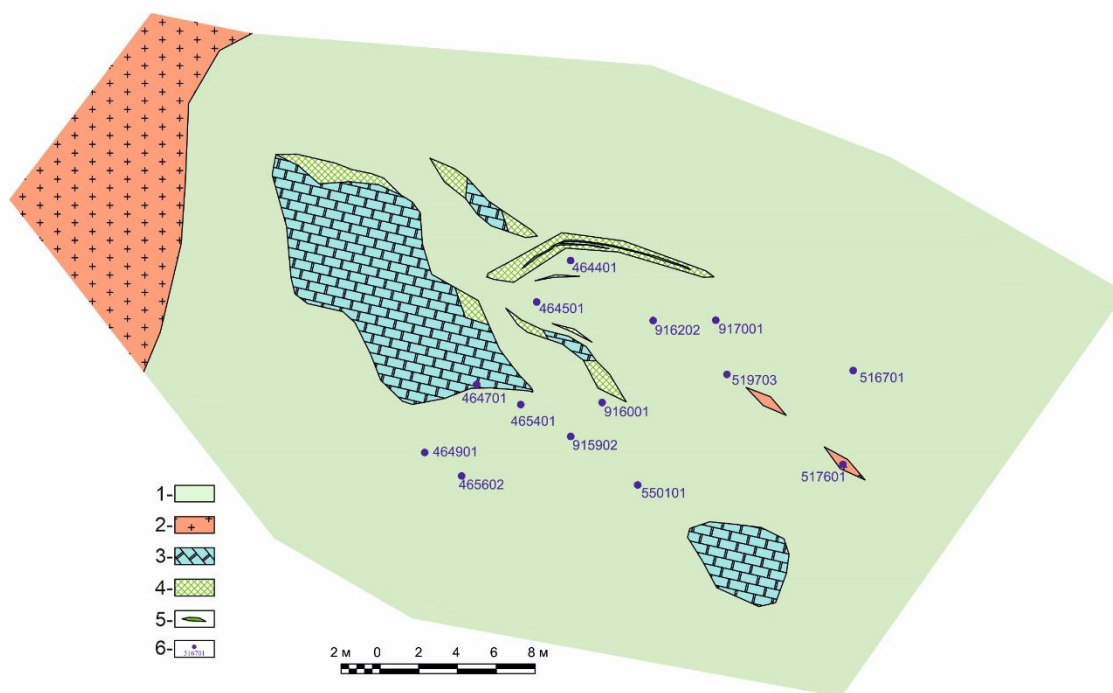


Рис. 2. Геологический план залежи № 1 участка Прозрачный (по материалам АО «ЗГРП»)

1 – амфиболит, 2 – гранит, 3 – доломит, 4 – кальцит-тремолитовый скарн, 5 – нефрит, 6 – точки отбора образцов

Fig 2. Geological plan of the vein 1, Prozhachny site (based on the materials of JSC "Transbaikal Mining Enterprise")

1 – amphibolite, 2 – granite, 3 – dolomite, 4 – calcite-tremolite skarn, 5 – nephrite, 6 – sampling points

Доломитовые мраморы составляют относительно небольшие тела удлиненной и неправильной формы. Это белые, светло-серые, средне-крупнозернистые породы массивной, участками полосчатой текстуры. Состоят они из доломита (50–60 %) и кальцита. В скарнированных мраморах отмечается до 5 % форстерита, диопсида, тремолита, серпентина.

Амфиболиты пространственно тяготеют к телам доломитовых мраморов. Внешне они представляют полосчатые и пятнистые породы зеленоватых тонов, сложены крупными призматическими зернами роговой обманки и неправильно-таблитчатыми – плагиоклаза. В незначительных количествах присутствует магнетит, микроклин, хлорит, титанит. Вторичные изменения выражаются в замещении амфибола эпидот-клиноцоизитовым агрегатом, хлоритизацией, актинолитизацией, сосюритизацией.

Вмещающие ксеноблок граниты витимканского комплекса представлены порфировидными и крупнозернистыми слабо гнейсовидными разностями.

Кальцит-тремолитовые скарны, продуктивные на нефрит, представлены узкими зонами мощностью до 3–4 м. Распространены относительно простые линзо- и жиллообразные формы тел различной протяженности и мощности, как правило, с четкими, достаточно прямолинейными контактами и выдержанным падением на глубину.

Кальцит-тремолитовые скарны – белые массивные, полосчатые, пятнистые скрытокристаллические породы. Они сложены агрегатом тонкозернистого, тонколучистого кальцита и микроволокнистого тремолита.

Распределение нефрита в телах скарнов крайне неравномерное. Наиболее характерна прожилковая и линзовидная форма обособлений нефрита мощностью от первых миллиметров до первых сантиметров с постепенными переходами к кальцит-тремолитовым скарнам. Более крупные обособления нефрита обычно имеют тектонические контакты с кальцит-тремолитовыми скарнами, часто с зеркалами

скольжения, вдоль которых развивается длиноволокнистый тремолит. Две системы крутопадающих трещин субширотного и северо-западного простирания разбивают нефрит и вмещающие породы на плоскопараллельные блоки толщиной 5–15 см и длиной 70–80 см.

Строение и состав нефрита

Окраска нефрита серовато-белая, светло-зеленая, серовато-зеленая до зеленой и серовато-коричневой

(рис. 3), редко до черной (рис. 4). Просвечиваемость от 1 до 5 см. Структура нефрита в шлифах разнообразная, часто с участками разных структур в одном шлифе: фибробластовая до гранонематобластовой, микроволокнистая до спутанно-микроволокнистой, радиально-лучистая (рис. 5), метельчатая, реликтовая до псевдоморфной.

Текстура пятнистая, неоднородная, беспорядочная, реже массивная, сланцеватая, реликтовая решётчатая.

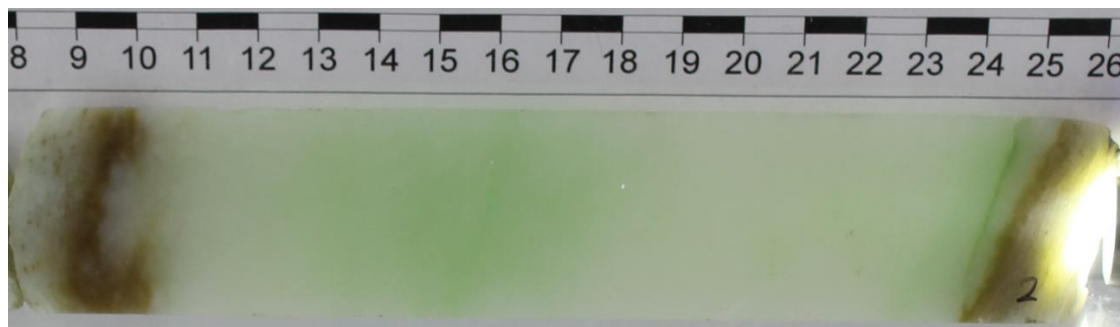


Рис. 3. Разнообразие окраски нефрита, образец 464501

Fig. 3. Variety of nephrite colors, sample 464501

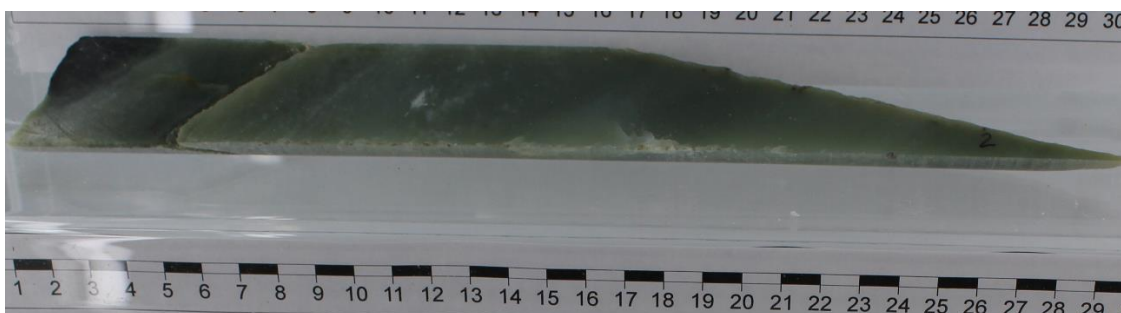


Рис. 4. Грязно-зеленый до черного нефрит, образец 916202

Fig. 4. Dirty green to black nephrite, sample 916202

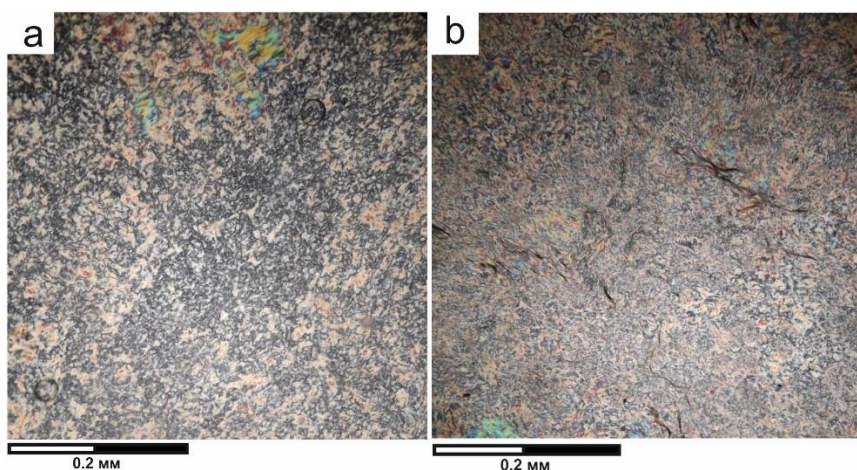


Рис. 5. Разновеликие радиально-лучистые агрегаты тремолита, скрещенные николи

Образцы 464901 (a) и 550101 (b)

Fig. 5. Various-sized radial tremolite aggregates, crossed nicols

Samples 464901 (a) and 550101 (b)

Таблица 1

Представительные анализы тремолита (по горизонтали № обр., по вертикали – компоненты), мас. %

Table 1

Representative analyzes of tremolite (horizontal number of the sample, vertical components), wt %

	464401			464501		464701		464901		465401			
SiO ₂	58,90	58,47	60,54	60,59	57,53	58,19	57,46	58,36	59,05	59,17	59,24	58,32	58,68
Al ₂ O ₃	н. о.	1,30	н. о.	н. о.	н. о.	1,10	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
FeO	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
MgO	26,37	25,26	26,28	24,66	25,22	24,23	24,54	26,22	24,63	25,79	24,53	23,85	23,76
CaO	12,01	12,35	11,98	13,32	13,77	13,21	13,91	13,10	13,17	13,04	13,39	13,73	13,54
Σ	97,27	97,38	98,81	98,57	96,52	96,72	95,91	97,68	96,84	98,00	97,16	95,89	95,99
	Формульные коэффициенты												
Si	7,970	7,904	8,044	8,092	7,904	7,939	7,898	7,903	8,040	7,970	8,044	8,037	8,067
Al	—	0,208	—	—	—	0,176	—	—	—	—	—	—	—
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	5,319	5,090	5,206	4,910	5,166	4,928	5,119	5,293	4,999	5,178	4,965	4,899	4,870
Ca	1,741	1,790	1,705	1,906	2,027	1,931	2,085	1,900	1,921	1,882	1,948	2,027	1,995

Продолжение таблицы 1

Continuation of table 1

№	465602		516701		517601			519703						
SiO ₂	58,40	57,93	57,16	59,67	57,68	57,70	57,44	58,38	58,68	58,98	59,37	55,54	56,76	
Al ₂ O ₃	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	1,02	1,10	
FeO	н. о.	н. о.	1,47	1,26	н. о.	н. о.	н. о.	0,90	1,13	н. о.	н. о.	3,91	0,89	
MgO	24,71	25,07	24,51	24,31	24,82	27,06	26,00	24,58	25,69	24,56	26,42	21,96	24,78	
CaO	12,97	13,98	15,25	12,69	13,36	13,43	13,08	13,14	13,05	13,03	14,05	14,09	12,28	
Σ	96,08	96,99	98,39	97,93	95,86	98,19	96,53	97,00	98,56	96,57	99,83	96,51	95,80	
Формульные коэффициенты														
Si	8,018	7,921	7,806	8,062	7,959	7,800	7,880	7,982	7,912	8,049	7,885	7,790	7,850	
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,169	0,179	
Fe	—	—	0,167	0,142	—	—	—	0,103	0,128	—	—	0,459	0,103	
Mg	5,057	5,111	4,989	4,897	5,107	5,454	5,318	5,009	5,163	4,997	5,231	4,591	5,108	
Ca	1,908	2,048	2,231	1,837	1,976	1,946	1,923	1,925	1,886	1,905	1,999	2,117	1,821	

Продолжение таблицы 1

Continuation of table 1

№	550101		560101		915902		916001		916002		917001		
SiO ₂	59,05	58,98	58,64	59,35	58,43	56,36	59,77	60,29	56,65	59,22	59,26	56,48	58,96
Al ₂ O ₃	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	1,49	н. о.	н. о.	0,91	н. о.
FeO	н. о.	0,77	н. о.	н. о.	0,84	0,78	н. о.	н. о.	3,92	1,7	н. о.	н. о.	н. о.
MgO	25,17	25,84	25,41	27	25,07	25,75	24,53	24,79	21,82	22,9	24,91	24,89	26,53
CaO	11,59	12,19	12,98	12,97	12,7	13,26	13,49	13,92	13,63	13,46	13,15	14,01	13,22
Σ	95,8	97,78	97,03	99,31	97,04	96,16	97,79	99	97,52	97,28	97,32	96,28	98,72
Формульные коэффициенты													
Si	8,082	7,971	7,977	7,975	7,973	7,787	8,06	8,041	7,832	8,087	8,03	7,794	7,901
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	0,243	—	—	0,148	—
Fe	—	0,087	—	—	0,095	0,091	—	—	0,454	0,194	—	—	—
Mg	5,205	4,997	5,152	5,234	5,101	5,352	4,93	4,929	4,498	4,662	5,031	5,121	5,3
Ca	1,765	1,883	1,893	1,817	1,858	1,981	1,949	1,989	2,019	1,97	1,909	2,071	1,898

Примечание. Н. о. – не обнаружено, * – актинолит в ассоциации с тремолитом – предыдущий анализ. Анализы выполнены на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ), аналитики Е.А. Хромова и Е.В. Ходырева.

Note. Н. о. – not detected, * – actinolite in association with tremolite – previous analysis. The analyses were performed on a LEO-1430VP scanning electron microscope with the INCA Energy 350 energy dispersive microanalysis system at the Analytical Center «Geospectr» of GIN SB RAS (Ulan-Ude), analysts E.A. Khromova and E.V. Khodyreva.

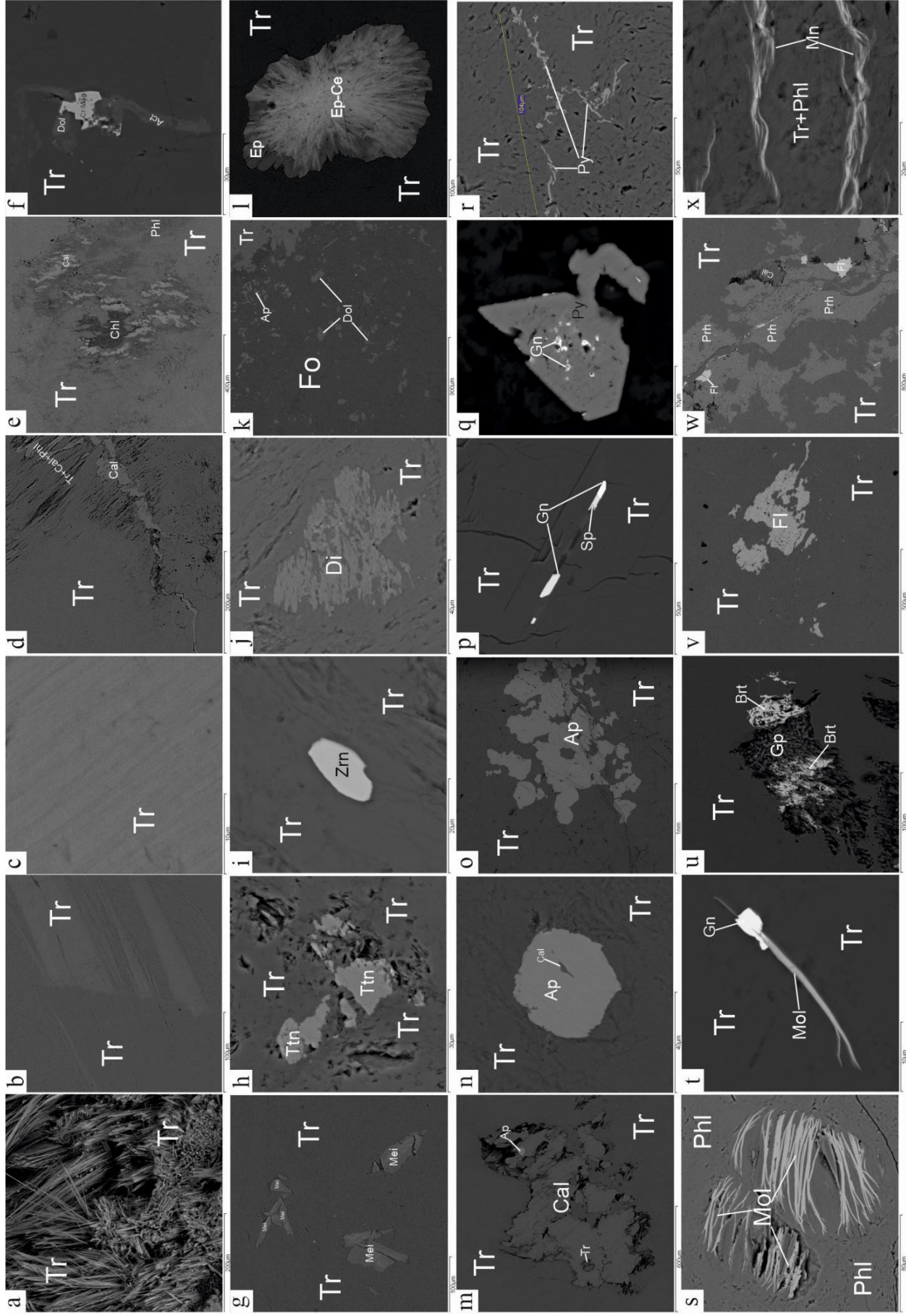


Рис. 6. Минеральный состав нефрита. Снимки выполнены на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ), операторы Е.А. Хромова и Е.В. Ходырева

a – пучки тремолита, 917001; b – параллельно-волокнистый агрегат тремолита с разным содержанием Fe, 519703; c – светлые и темные полосы тремолита одного состава, 465401; d – вторичный кальцит сечет тремолит и переслаивание флогопита, кальцита и тремолита, 519703; e – в тремолите с 0 мас. % Fe агрегат тремолита с 1,13 мас. % FeO, флогопита, кальцита, хлорита, 519703/1; f – в тремолите хроммагнетит, зерна и прожилки актинолита, доломит, 916202; g – в тремолите мейонит, 464901; h – в тремолите зерна титаниита, 916202; i – в тремолите зерно циркона, 917001; j – корродированное зерно диопсида в тремолите, 517601; k – агрегат форстерита с зернами доломита, тремолита, апатита, 464501; l – в тремолите агрегат – в центре эпидот-Ce, по периферии эпидот, 516701; m – в тремолите крупное обособление кальцита с включениями тремолита и фторапатита, 917001; n – в тремолите кристалл апатита с удлиненным включением кальцита, 917001; o – агрегат фторапатита, 464501; p – удлиненные зерна галенита и сфалерита в тремолите, по трещине серпентина, 464501; q – зерно пирита с включениями галенита, 464501; r – пирит в тремолите, 915902; s – во фторфлогопите пластинчатые зерна молибденита, 915902; t – в тремолите срастание молибденита и галенита, 916001; u – сросток гипса и барита, 917001; v – агрегат флюорита в тремолите, 465401; w – в тремолите прослой пренит, флюорит и хлорит, 465401; x – тремолит с флогопитом сечется романешитом?, 464401. Act – актинолит, Ap – апатит, Brt – барит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Cr-Mag – хроммагнетит, Di – диопсид, Dol – доломит, Ep – эпидот, Fl – флюорит, Fo – форстерит, Gp – галенит, Gr – гипс, Mei – мейонит, Mn – минералы марганца, Mol – молибденит, Phl – флогопит, Prh – пренит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Srp – серпентин, Tr – тремолит, Ttn – титанит, Znn – циркон

Fig. 6. The mineral composition of nephrite. The images were taken using a LEO-1430VP scanning electron microscope at the Analytical Center Geospectrof the GIN SB RAS (Ulan-Ude), operators E.A. Khromova and E.V. Khodyreva

a – tremolite bundles, 917001; b – parallel-fibrous tremolite aggregate with different Fe content, 519703; c – light and dark tremolite strips of the same composition, 465401; d – secondary calcite cuts tremolite and interlayering of phlogopite, calcite and tremolite, 519703; e – tremolite with 0 wt. % Fe with aggregate of tremolite with 1.13 wt. % FeO, phlogopite, calcite, chlorite, 519703/1; f – chromium magnetite, actinolite grains and veinlets, dolomite at tremolite, 916202; g – meionite at tremolite, 464901; h – titanite grains at tremolite, 916202; i – zircon grain at tremolite, 917001; j – corroded diopside grain at tremolite, 517601; k – forsterite aggregate with grains of dolomite, tremolite, apatite, 464501; l – epidote aggregate – in the center the epidote-Ce, along the periphery of epidote at tremolite, 516701; m – large segregation of calcite with inclusions of tremolite and fluorapatite at tremolite, 917001; n – apatite crystal with an elongated inclusion of calcite at tremolite, 917001; o – fluorapatite aggregate, 464501; p – elongated grains of galena and sphalerite at tremolite, serpentine along a crack, 464501; q – pyrite grain with galena inclusions, 464501; r – pyrite at tremolite, 915902; s – molybdenite plate like grains at fluorophlogopite, 915902; t – intergrowths of molybdenite and galena at tremolite, 916001; u – gypsum and barite intergrowth, 917001; v – fluorite aggregate at tremolite, 465401; w – interlayers of prehnite, fluorite and chlorite at tremolite, 465401; x – tremolite with phlogopite cut by romaneshite?, 464401. Act – actinolite, Ap – apatite, Brt – barite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Cr-Mag – Cr-rich magnetite, Di – diopside, Dol – dolomite, Ep – epidote, Fl – fluorite, Fo – forsterite, Gp – galena, Gr – gypsum, Mei – meionite, Mn – Mn minerals, Mol – molybdenite, Phl – phlogopite, Prh – prehnite, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Srp – serpentine, Tr – tremolite, Ttn – titanite, Znn – zircon

Таблица 2

Представительные анализы аксессуарных минералов нефрита
(по горизонтали название минерала и № обр., по вертикали – компоненты), мас. %

Table 2

Representative analyzes of accessory minerals of nephrite
(horizontal mineral name and number of the sample, vertical components), wt %

	Скаполит		Титанит	Диопсид								
№ обр.	464901		916202	464701				465401		517601	916202	
SiO ₂	36,93	36,75	30,61	54,80	55,65	54,97	55,93	55,13	56,18	56,18	52,69	54,29
TiO ₂	н. о.	н. о.	37,01	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Al ₂ O ₃	24,54	27,22	2,17	0,87	1,11	1,19	0	1,59	1,89	1,89	н. о.	н. о.
FeO	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Fe ₂ O ₃	—	—	—	1,07	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	1,23	н. о.
Cr ₂ O ₃	5,12	0,85	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
MgO	4,91	5,67	н. о.	19,50	18,49	17,58	17,66	19,14	18,74	18,74	21,01	18,52
CaO	22,82	24,6	28,10	22,54	23,68	24,96	24,51	24,95	23,56	23,56	25,65	26,00
Σ	94,31	95,09	97,90	98,78	98,94	98,70	98,10	100,80	100,37	100,37	100,58	98,85
<i>Формульные коэффициенты</i>												
Si	6,164	6,110	1,015	1,996	1,961	1,998	1,974	2,004	1,965	1,922	1,909	1,960
Ti	—	—	0,923	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	4,238	4,550	0,085	0,079	0,038	0,049	0,052	—	0,067	0,058	—	—
Fe ²⁺	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe ³⁺	—	—	—	0,030	—	—	—	—	—	—	0,034	—
Cr	0,675	0,111	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	1,222	1,406	—	0,992	1,080	1,026	0,977	0,997	1,017	0,952	1,135	1,035
Ca	4,082	4,382	0,998	0,897	0,897	0,905	0,997	0,995	0,953	1,119	0,996	1,046

Продолжение таблицы 2

Continuation of table 2

Continuation of Table 2										
	Эпидот					Флогопит				
№	516701			517601		464401			464901	550101
SiO ₂	35,17	36,33	40,80	33,91	34,02	44,21	46,6	44,39	45,46	46,89
TiO ₂	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Al ₂ O ₃	25,43	22,13	25,96	23,30	21,86	10,64	9,88	10,32	10,09	8,80
FeO	н. о.	2,77	1,81	1,86	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Fe ₂ O ₃	7,09	3,53	5,74	1,46	4,42	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
MgO	н. о.	1,99	н. о.	2,14	2,62	29,67	29,15	27,78	26,91	27,36
CaO	23,25	18,11	24,58	16,85	17,78	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
K ₂ O	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	10,59	10,41	11,84	9,62	9,97
Ce ₂ O ₃	н. о.	5,89	н. о.	7,04	9,40	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
La ₂ O ₃	н. о.	3,46	н. о.	2,86	5,73	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
F	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	4,66	3,77	4,45	4,17	3,42
Σ	90,95	94,20	98,89	89,42	95,84	99,76	99,81	98,78	96,26	96,46

Продолжение таблицы 2

Continuation of table 2

	Флогопит				Пренит	Хлорит				
№	915902				465401	465401	519703	915902	916202	
SiO ₂	45,12	44,10	43,62	43,09	43,27	45,65	34,23	30,70	34,12	
TiO ₂	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	
Al ₂ O ₃	10,64	10,24	11,15	11,17	24,64	6,75	13,91	20,05	15,10	
FeO	2,37	2,61	1,49	2,21	н. о.	н. о.	1,29	н. о.	4,35	
Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Cr ₂ O ₃	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
MgO	27,79	27,25	26,72	28,92	н. о.	28,29	31,01	31,52	29,35
CaO	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	27,83	5,08	1,83	н. о.	1,05
K ₂ O	11,26	9,89	10,82	10,7	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
F	н. о.	5,27	4,80	3,76	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Σ	97,18	99,36	98,59	99,84	95,73	85,77	82,27	82,28	83,97
Формульные коэффициенты									
Si	3,109	3,181	3,097	3,005	3,022	4,237	3,367	2,814	3,330
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	0,864	0,833	0,933	0,918	1,953	0,738	1,612	2,400	1,736
Fe ²⁺	0,136	0,151	0,089	0,129	—	—	0,106	—	0,355
Fe ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	2,855	2,803	2,828	3,007	—	3,914	4,548	4,773	4,270
Ca	—	—	—	—	2,026	0,505	0,193	—	0,110
K	0,990	0,871	0,980	0,952	—	—	—	—	—
F	—	1,150	1,078	0,829	—	—	—	—	—

Примечание. Н. о. – не обнаружено. Анализы выполнены на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ), аналитики Е.А. Хромова и Е.В. Ходырева.

Note. Н. о. – not detected. The analyses were performed on a LEO-1430VP scanning electron microscope with the INCA Energy 350 energy dispersive microanalysis system at the Analytical Center «Geospectr» of GIN SB RAS (Ulan-Ude), analysts E.A. Khromova and E.V. Khodyreva.

С помощью растровой электронной микроскопии зафиксировано 25 минералов. Значительно преобладает тремолит (см. табл. 1, рис. 6, а–е). Отмечается неоднородность – полосы и пятна разной окраски под электронным микроскопом, при этом отмечаются как различия в содержании железа (рис. 6, b), так и их отсутствие (рис. 6, c). В нефрите черного цвета встречается актинолит в ассоциации с тремолитом (табл. 1). Встречаются переслаивание тремолита и кальцита, реже флогопита (рис. 6, d), агрегаты тремолита с флогопитом, кальцитом, хлоритом (рис. 6, e).

Среди тремолита отмечаются редкие резорбированные зерна минералов, характерных для доломитов и амфиболитов: доломит (рис. 6, f, k) с содержанием MgO 20,75–22,54 и CaO 29,21–29,31 мас. % по результатам анализа четырех зерен в двух образцах; скаполит – зональный мейонит, центральная часть зерен содержит больше Cr, табл. 2, рис. 6, g); титанит (см. табл. 2, рис. 6, h), хроммагнетит с 4,87 и 10,64 мас. % Cr₂O₃ (рис. 6, f); циркон (рис. 6, i), не содержащий примесей по результатам пяти анализов из пяти образцов.

Помимо этого, в нефрите зафиксированы редкие реликты метасоматических минералов: корродированные зерна диопсида (табл. 2, рис. 6, j); агрегат форстерита (рис. 6, k) с содержанием 0,96–1,02 мас. % FeO по результатам трех анализов в одном образце; угловатые, резорбированные зерна эпидота, включая цериевый, чье наличие отмечено в том числе в центре агрегатов эпидота (табл. 2, рис. 6, l).

В большинстве образцов апатит образует относительно крупные и изометричные зерна (рис. 6, g, m, n),

иногда с включениями кальцита. По результатам семи анализов в четырех образцах примеси не зафиксированы, содержания F до 6,19 мас. %, но в основном 4–5 мас. %. В крупном и распространенном кальците первой генерации (рис. 6, d, e, k, m, n) отмечены включения тремолита и фторопатита, содержания MgO до 6,68 мас. %. Также характерен фторфлогопит, реже флогопит (табл. 2, рис. 6, d, e, s, x).

Редкие мелкие преимущественно идиоморфные зерна образуют сульфиды: галенит (рис. 6, p, q, t; 10 анализов в восьми образцах), молибденит (рис. 6, s, t; два анализа в двух образцах), пирит (рис. 6, q, r, четыре анализа в трех образцах), сфалерит (рис. 6, p, десять анализов в пяти образцах, в одном случае 1,46 мас. % Fe). В сульфидах за единственным исключением не фиксируются изоморфные примеси. Другие гидротермальные минералы: барит (рис. 6, u, по четырем анализам в трех образцах до 14,65 мас. % SrO); флюорит (рис. 6, v, w, два анализа в одном образце без примесей); шеелит (единичное зерно без примесей).

Минералы вторичных изменений: прожилки, агрегаты кальцита второй генерации, в основном без примесей, редко с небольшой примесью магния (рис. 6, d, e); волнистые прослои пренита (табл. 2, рис. 6, w); пленки по трещинам минералов марганца и бария, близких по составу к романешиту (Ba,H₂O)₂(Mn⁴⁺,Mn³⁺)₅O₁₀ (рис. 6, w); серпентин, выполняющий трещины (рис. 6, p, из пяти анализов в двух образцах в одном 1,38 мас. % FeO); гипс (рис. 6, u, 1,74 мас. % MgO); пятнообразные агрегаты хлорита (табл. 2, рис. 6, e, w).

Обсуждение

На основании пространственно-временных взаимоотношений минералы могут быть отнесены к пяти парагенезисам:

– реликтовые минералы доломитов и амфиболитов: доломит, хроммагнетит, титанит, скаполит (мейонит), циркон;

– метасоматические минералы донефритовой стадии: диопсид, форстерит, эпидот;

– метасоматические минералы нефритовой стадии: апатит, кальцит I, тремолит, флогопит;

– минералы гидротермальной стадии: барит, галенит, молибденит, пирит, сфалерит, флюорит, шеелит. Отсутствие изоморфных примесей в сульфидах может свидетельствовать об их низкотемпературном происхождении;

– минералы вторичных изменений: гипс, кальцит II, пренит, романешит (?), серпентин, хлорит.

Широкое развитие фторфлогопита и фторапатита объясняет отмечавшиеся ранее [Сутурин и др., 2015] высокие содержания F в аподоломитовом нефрите. Редкие мелкие зерна флюорита не могут обеспечить этот феномен. А.Н. Сутурин с соавторами [2015] объясняли повышенное до 1 мас. % содержание фтора в аподоломитовом нефрите участием флюидов гранитного происхождения, но не показали, в какие минералы нефрита входит фтор. Ими отмечено наличие фтортремолита, но в изученных нами образцах такой минерал не встречен.

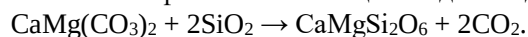
В тремолите 12 образцов различной окраски FeO не обнаружено (см. табл. 1). В остальных содержание FeO: в серовато-светло-зеленых 550101 – 0–1,45 %, 519703 – 0–4,64 %, серовато-зеленых 915902 – 0,78–1,24 %, 916202 – 0,82–3,91 %, в черной части этого образца до 14,23 % (см. рис. 5). Зеленая окраска определяется примесью Fe в тремолите: по мере увеличения содержания Fe тон становится насыщеннее, что отмечалось и ранее, в том числе на Кавоктинском месторождении [Гомбоев и др., 2017]. Черная окраска нефрита в образце 916202 объясняется высоким содержанием Fe из-за близкого контакта с эпидот-тремолитовым скарном по амфиболиту – только этот образец содержит титанит и хроммагнетит. Черный участок сложен тремолитом и актинолитом с крайне неравномерным распределением Fe (табл. 1).

Ранее была опубликована информация об аномально низких изотопных отношениях кислорода аподоломитового нефрита Витимской провинции [Бурцева и др., 2015]. Было высказано предположение, что нефритообразующий флюид имел метеорное происхождение. В этом случае гранит – не источник флюида, тем более что он не контактирует с нефрито-

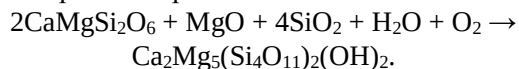
выми телами непосредственно. Гранит лишь обеспечивает региональный разогрев, активизирующий метеорные флюиды, аномально обедненные изотопом ^{18}O . В результате инфильтрационного переноса разогретого флюида и начинаются метасоматические реакции на контакте амфиболитов и доломитов, приводящие к формированию скарнов – эпидот-тремолитовых и кальцит-тремолитовых с телами нефрита.

Формирование нефрита, судя по взаимоотношениям минералов, проходит в несколько стадий.

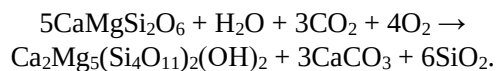
1. Первоначально доломит на прогрессивной стадии при инфильтрационном переносе флюидом кремнезема из амфиболитов замещается диопсидом:



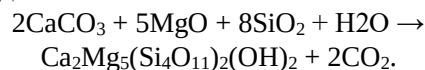
На регрессивном этапе уже диопсид при переносе флюидом магния и кремнезема из амфиболитов замещается агрегатом тремолита:



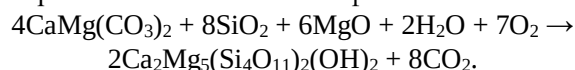
В другом варианте диопсид замещается кальцит-тремолитовым скарном – углекислота из первой реакции:



При этом кальцит скарна также может замещаться тремолитом с образованием нефрита – кремнезем из амфиболита, магний может быть как из амфиболита, так и из доломита:



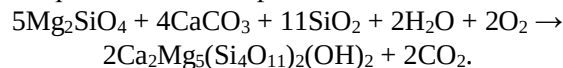
2. В некоторых образцах не устанавливаются реликты диопсида или псевдоморфозы по нему. В этом случае предполагается, что замещение диопсида произошло полностью либо тремолит образовался непосредственно из доломита с инфильтрационным привнесом кремнезема и магния из амфиболита:



3. В одном образце отмечен агрегат форстерита – он мог образовываться по доломиту с инфильтрационным привнесом кремнезема из амфиболита:

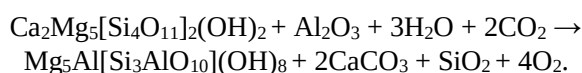


А затем форстерит мог замещаться тремолитом, взаимодействуя с кальцитом при дальнейшем привнесом кремнезема из амфиболита:



4. Исходный призматический тремолит замещается в дальнейшем спутанно-волокнистым – образуется нефрит.

5. При продолжении регрессивного процесса тремолит замещается с тинфильтрационным привнесом глинозема из амфиболита хлоритом и кальцитом.



При этом роль гранитов сводится к региональному повышению температуры, обеспечивающему метасоматические реакции. Непосредственное участие в метасоматозе не гранита, а амфиболита, содержащего больше Fe, определяет разнообразие цветовой гаммы нефрита. Роль метаморфизма сводится к тектоническому дроблению, облегчающему проникновение флюидов, и стрессу, обеспечивающему спутанно-волоконистую скрытокристаллическую текстуру нефрита.

Заключение

Изучены 16 образцов нефрита из керна залежи № 1 участка Прозрачный Кавоктинского месторождения аподоломитового нефрита в Средне-Витимской горной стране. Диагностированы 25 минералов. На основании пространственно-временных взаимоотношений минералы отнесены к пяти парагенезисам: реликтовому, метасоматическим донефритовой и

нефритовой стадий, гидротермальному и вторичному. Высокие содержания F в аподоломитовом нефрите объяснены широким развитием фторапатита и фторфлогопита. Интенсивность зеленой окраски нефрита объяснена примесью Fe в тремолите, а черная окраска – развитием актинолита в участках контакта с амфиболитом. Приведена модель формирования нефрита: развитие по доломиту диопсида, замещение диопсида тремолитом, замещение призматического тремолита спутанно-волоконистым. В отдельных случаях тремолит может развиваться непосредственно по доломиту либо замещать форстерит. В дальнейшем тремолит замещается хлоритом. Гранит не участвует в формировании нефрита непосредственно, а разогревает метеорный флюид, необходимый для метасоматических реакций. Участие в образовании нефрита амфиболита определяет разнообразие цветовой гаммы нефрита. Метаморфизм вызывает тектоническое дробление, облегчающее проникновение флюидов, и стресс, обеспечивающий спутанно-волоконистую скрытокристаллическую текстуру нефрита.

Список источников

- Бурцева М.В., Рипп Г.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е. Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса // Геология и геофизика. 2015. Т. 56 (3). С. 516–527. doi: 10.15372/GiG20150303
- 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.
- Кислов Е.В., Худякова Л.И., Николаев А.Г. Отходы переработки аподоломитового нефрита и направление их использования // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8 (3). С. 195–206. doi: 10.17073/2500-0632-2023-01-75
- Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. Месторождение нефритов. Иркутск : Изд-во Иркутского государственного университета, 2015. 377 с.
- Adamo I., Bocchio R. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and Update // Gems and Gemology. 2013. V. 49 (2). P. 98–106. doi: 10.5741/GEMS.49.2.98
- Bai F., Li G., Lei J., Sun J. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, Northeast China // Ore Geology Reviews. 2019. V. 115. 103171. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103171
- Bai B., Du J., Li J., Jiang B. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of green nephrite from Dahua, Guangxi, Southern China // Ore Geology Reviews. 2020. V. 118. 103362. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103362
- Chen D., Yang Y., Qiao B. et al. Integrated interpretation of pXRF data on ancient nephrite artifacts excavated from Tomb No. 1 in Yuehe Town, Henan Province, China // Heritage Science. 2022. V. 10. 1. doi: 10.1186/s40494-021-00642-w
- 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. V. 141. 104655. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104655
- Gao S., Bai F., Heide G. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tiel, China // Ore Geology Reviews. 2019a. V. 107. P. 155–171. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.016
- Gao K., Shi G., Wang M. et al. The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, northwest China // Geoscience Frontiers. 2019b. V. 10 (4). P. 1597–1612. doi: 10.1016/j.gsf.2018.10.008
- Gil G., Barnes J.D., Boschi C. Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin // The Canadian Mineralogist. 2015. V. 53. P. 533–556. doi: 10.3749/canmin.1500018
- Gil G., Bagiński B., Gunia P. et al. 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. V. 118. 103335. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103335
- Gong N., Wang C., Xu S. Color Origin of Greyish-Purple Tremolite Jade from Sanchahe in Qinghai Province, NW China // Minerals. 2023. V. 13. 1049. doi: 10.3390/min13081049
- Jiang Y., Shi G., Xu L., Li X. Mineralogy and geochemistry of nephrite jade from Yinggelike deposit, Altyn Tagh (Xinjiang, NW China) // Minerals. 2020. V. 10 (5). 418. doi: 10.3390/min10050418
- 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. V. 149. 105087. doi: 10.1016/j.oregeorev.2022.105087

- Korybska-Sadlo I., Gil G., Gunia P. et al.** 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. V. 1166. P. 40–47. doi: 10.1016/j.molstruc.2018.04.020
- 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. V. 160. 105604. doi: 10.1016/j.oregeorev.2023.105604
- 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. V. 261. 120012. doi: 10.1016/j.saa.2021.120012
- Li P., Liao Z., Zhou Zh.** The residual geological information in Liangzhu jades: Implications for their provenance // *Proceedings of the Geologists' Association*. 2022. V. 133 (3). P. 256–268. doi: 10.1016/j.pgeola.2022.04.003
- Liang H., Shi G., Yuan Y. et al.** Polysynthetic twinning of diopsides in the Niewang and Tatliksu nephrite deposits, Xinjiang, China // *Minerals*. 2022. V. 12(12). 1575. doi: 10.3390/min12121575
- Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L. et al.** 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. V. 220–223. P. 289–299. doi: 10.1016/j.lithos.2015.02.019
- Liu Y., Deng J., Shi G.H. et al.** Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China // *Resource Geology*. 2010. V. 60 (3). P. 249–259. doi: 10.1111/j.1751-3928.2010.00135.x
- Liu Y., Deng J., Shi G. et al.** Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011a. V. 42 (3). P. 440–451. doi: 10.1016/j.jseas.2011.05.012
- Liu Y., Deng J., Shi G., Sun X., Yang L.** Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China // *Ore Geology Reviews*. 2011b. V. 41 (1). P. 122–132. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.07.004
- Liu Y., Zhang R., Zhang Zh. et al.** 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. V. 212–215. P. 128–144. doi: 10.1016/j.lithos.2014.11.002
- Liu Y., Zhang R.-Q., Maituohuti A. et al.** 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. V. 72 (1). P. 699–727. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.08.023
- Liu X., Gil G., Liu Y.** Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China // *Ore Geology Reviews*. 2021. V. 131. 103972. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103972
- Nangeelil K., Dimpfl P., Mamtimin M. et al.** Preliminary study on forgery identification of Hetian Jade with Instrumental Neutron Activation Analysis. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. V. 191. 110535. doi: 10.1016/j.apradiso.2022.110535
- Nichol D.** Two contrasting nephrite jade types // *The Journal of Gemmology*. 2000. V. 27(4). P. 193–200.
- 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. V. 9 (1). P. 47–56. doi: 10.1142/S0219607713500031
- Wang L., Lin J.H., Ye T.P. et al.** Discussing the coloration mechanism of Luodian Jade from Guizhou // *Open Access Library Journal*. 2020. V. 7. e6364. doi: 10.4236/oalib.1106364
- Wang W., Liao Z., Zhou Z. et al.** Gemmological and mineralogical characteristics of nephrite from Longxi, Sichuan Province // *Journal of Gems & Gemmology*. 2022. V. 24 (1). P. 20–27. (In Chinese). doi: 10.15964/j.cnki.027jgg.2022.01.003
- 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. V. 142. 104702. doi: 10.1016/j.oregeorev.2022.10470
- 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. V. 14. 204. doi: 10.1007/s12517-021-06578-6
- Yin Z., Jiang C., Santosh M. et al.** Nephrite jade from Guangxi province, China // *Gems and Gemology*. 2014. V. 50 (3). P. 228–235. doi: 10.5741/GEMS.50.3.228
- Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C. et al.** Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: Insights from spectroscopic and compositional analyses // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2016a. V. 111 (5). P. 313–325. doi: 10.2465/jmps.151103
- Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C. et al.** Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China // *Science China Earth Sciences*. 2016b. V. 59. P. 1597–1609. doi: 10.1007/s11430-015-0231-8
- Yui T.-F., Kwon S.-T.** Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea // *Economic Geology*. 2002. V. 97 (3). P. 593–601. doi: 10.2113/gsecongeo.97.3.593
- Zhang Y.-D., Yang R.-D., Gao J.-B., Chen J., Liu Y.-N., Zhou Z.-R.** Geochemical characteristics of nephrite from Luodian County, Guizhou Province, China // *Acta Mineralogica Sinica*. 2015. V. 35 (1). P. 56–64. (In Chinese with English abstract). doi: 10.16461/j.
- 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. V. 10 (2). P. 425–437. doi: 10.1016/j.gsf.2018.02.009
- 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. V. 63 (11). gac117. doi: 10.1093/petrology/egac117
- 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. V. 38 (4). P. 438–448. (In Chinese). doi: 10.15898/j.cnki.l1-2131/td.201807310089
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh.** Black nephrite jade from Guangxi, Southern China // *Gems and Gemology*. 2019. V. 55 (2). P. 198–215. doi: 10.5741/GEMS.55.2.198

References

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. V. 56(3). pp. 516–527. doi: 10.15372/GIG20150303

- Gomboev D.M., Androsov P.V., Kislov E.V. *Kavoktinskoye mestorozhdeniye svetlookrashennogo nefrita: usloviya zaleganiya i osobennosti veshchestvennogo sostava* [Kavokta deposit of light-colored jade: occurrence conditions and features of the material composition]. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil]. 2017. V. (9). pp. 44–50. In Russian
- Kislov E.B., Khudyakova L.I., Nikolaev A.G. Dolomite type nephrite processing wastes and their application. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023. V. 8 (3). pp. 195–206. doi: 10.17073/2500-0632-2023-01-75
- Suturin A.N., Zamaletdinov R.S., Sekerina N.V. *Mestorozhdeniya nefritov* [Nephrite deposit]. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House. 2015. 377 p. In Russian
- Adamo I., Bocchio R. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and Update. *Gems and Gemology*. 2013. V. 49 (2). pp. 98–106. doi: 10.5741/GEMS.49.2.98
- Bai F., Li G., Lei J., Sun J. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, Northeast China. *Ore Geology Reviews*. 2019. V. 115. 103171. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103171
- Bai B., Du J., Li J., Jiang B. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of green nephrite from Dahua, Guangxi, Southern China. *Ore Geology Reviews*. 2020. V. 118. 103362. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103362
- Chen D., Yang Y., Qiao B., et al. Integrated interpretation of pXRF data on ancient nephrite artifacts excavated from Tomb No. 1 in Yuehe Town, Henan Province, China. *Heritage Science*. 2022. V. 10. 1. doi: 10.1186/s40494-021-00642-w
- 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. V. 141. 104655. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104655
- Gao S., Bai F., Heide G. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tieli, China. *Ore Geology Reviews*. 2019a. V. 107. pp. 155–171. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.016
- Gao K., Shi G., Wang M., et al. The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, northwest China. *Geoscience Frontiers*. 2019b. V. 10 (4). pp. 1597–1612. doi: 10.1016/j.gsf.2018.10.008
- Gil G., Barnes J. D., Boschi C. Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin. *The Canadian Mineralogist*. 2015. V. 53. pp. 533–556. doi: 10.3749/canmin.1500018
- Gil G., Bagiński B., Gunia P., et al. 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. V. 118. 103335. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103335
- Gong N., Wang C., Xu S. Color Origin of Greyish-Purple Tremolite Jade from Sanchahe in Qinghai Province, NW China. *Minerals*. 2023. V. 13. 1049. doi: 10.3390/min13081049
- Jiang Y., Shi G., Xu L., Li X. Mineralogy and geochemistry of nephrite jade from Yinggelike deposit, Altyn Tagh (Xinjiang, NW China). *Minerals*. 2020. V. 10 (5). 418. doi: 10.3390/min10050418
- 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. V. 149. 105087. doi: 10.1016/j.oregeorev.2022.105087
- Korybska-Sadło I., Gil G., Gunia P., et al. 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. V. 1166. pp. 40–47. doi: 10.1016/j.molstruc.2018.04.020
- 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. V. 160. 105604. doi: 10.1016/j.oregeorev.2023.105604
- 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. V. 261. 120012. doi: 10.1016/j.saa.2021.120012
- Li P., Liao Z., Zhou Zh. The residual geological information in Liangzhu jades: Implications for their provenance. *Proceedings of the Geologists' Association*. 2022. V. 133 (3). pp. 256–268. doi: 10.1016/j.pgeola.2022.04.003
- Liang H., Shi G., Yuan Y., et al. Polysynthetic twinning of diopsides in the Niewang and Tatliksu nephrite deposits, Xinjiang, China. *Minerals*. 2022. V. 12 (12). 1575. doi: 10.3390/min12121575
- Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L., et al. 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. V. 220–223. pp. 289–299. doi: 10.1016/j.lithos.2015.02.019
- Liu Y., Deng J., Shi G.H., et al. Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China. *Resource Geology*. 2010. V. 60 (3). pp. 249–259. doi: 10.1111/j.1751-3928.2010.00135.x
- Liu Y., Deng J., Shi G., et al. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011a. V. 42 (3). pp. 440–451. doi: 10.1016/j.jseaes.2011.05.012
- Liu Y., Deng J., Shi G., Sun X., Yang L. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China. *Ore Geology Reviews*. 2011b. V. 41 (1). pp. 122–132. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.07.004
- Liu Y., Zhang R., Zhang Zh., et al. 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. V. 212–215. pp. 128–144. doi: 10.1016/j.lithos.2014.11.002
- Liu Y., Zhang R.-Q., Maituohuti A., et al. 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. V. 72 (1). pp. 699–727. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.08.023
- Liu X., Gil G., Liu Y. Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China. *Ore Geology Reviews*. 2021. V. 131. 103972. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103972
- Nangeelil K., Dimpfl P., Mamtimin M., et al. Preliminary study on forgery identification of Hetian Jade with Instrumental Neutron Activation Analysis. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. V. 191. 110535. doi: 10.1016/j.apradiso.2022.110535
- Nichol D. (2000) Two contrasting nephrite jade types. *The Journal of Gemmology*. V. 27 (4). pp. 193–200.
- 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. V. 9 (1). pp. 47–56. doi: 10.1142/S0219607713500031
- Wang L., Lin J. H., Ye T. P., et al. Discussing the coloration mechanism of Luodian Jade from Guizhou. *Open Access Library Journal*. 2020. V. 7. e6364. doi: 10.4236/oalib.1106364
- Wang W., Liao Z., Zhou Z., et al. Gemmological and mineralogical characteristics of nephrite from Longxi, Sichuan Province. *Journal of Gems & Gemmology*. 2022. V. 24 (1). pp. 20–27. (In Chinese). doi: 10.15964/j.cnki.027jgg. 2022.01.003

- 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. V. 142. 104702. doi: 10.1016/j.oregeorev.2022.104702
- 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. V. 14. 204. doi: 10.1007/s12517-021-06578-6
- Yin Z., Jiang C., Santosh M. et al. Nephrite jade from Guangxi province, China. *Gems and Gemology*. 2014. V. 50 (3). pp. 228–235. doi: 10.5741/GEMS.50.3.228
- Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C. et al. Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: Insights from spectroscopic and compositional analyses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2016a. V. 111 (5). pp. 313–325. doi: 10.2465/jmps.151103
- Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C. et al. Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China. *Science China Earth Sciences*. 2016b. V. 59. pp. 1597–1609. doi: 10.1007/s11430-015-0231-8
- Yui T.-F., Kwon S.-T. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea. *Economic Geology*. 2002. V. 97(3). pp. 593–601. doi: 10.2113/gsecongeo.97.3.593
- Zhang Y.-D., Yang R.-D., Gao J.-B., Chen J., Liu Y.-N., Zhou Z.-R. Geochemical characteristics of nephrite from Luodian County, Guizhou Province, China. *Acta Minerologica Sinica*. 2015. 35(1). pp. 56–64. (In Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1646/j.1527-0949.2015.35.001>
- 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. V. 10 (2). pp. 425–437. doi: 10.1016/j.gsf.2018.02.009
- 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. V. 63(11). gac117. doi: 10.1093/petrology/egac117
- 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. V. 38(4). pp. 438–448. (In Chinese). doi: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201807310089
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China. *Gems and Gemology*. 2019. V. 55(2). pp. 198–215. doi: 10.5741/GEMS.55.2.198

Информация об авторе:

Кислов Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория металлогении и рудообразования, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.
E-mail: evg-kislov@ya.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Kislov E.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Metallogeny and Ore Formation, N.L. Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.
E-mail: evg-kislov@ya.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 23.05.2024; принята к публикации 03.03.2025

The article was submitted 12.10.2023; approved after reviewing 23.05.2024; accepted for publication 03.03.2025