

УДК 553.89

ВОЙМАКАНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ АПОДОЛОМИТОВОГО НЕФРИТА, СРЕДНЕ-ВИТИМСКАЯ ГОРНАЯ СТРАНА: УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

© 2024 г. Е. В. Кислов^{1, *}, И. С. Гончарук^{1, 2, **}, В. В. Вантеев^{1, ***}, В. Ф. Посохов^{1, ****}

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, ул. Сахьяновой, 6а, Улан-Удэ, 670047 Россия

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

*E-mail: evg-kislov@ya.ru

**E-mail: goncarukirina993@gmail.com

***E-mail: vanteev997@mail.ru

****E-mail: vitaf1@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.02.2024 г.

После доработки 16.07.2024 г.

Принята к печати 23.07.2024 г.

Исследовано Воймаканское месторождение аподоломитового нефрита с целью выяснения особенностей его формирования. Изучены 12 образцов нефрита и 5 образцов вмещающих пород. Применены бинокулярный стереомикроскоп, геммологический фонарик и поляризационный микроскоп. Определены содержания макро- и микрокомпонентов, изотопный состав кислорода. 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. Значение $\delta^{18}\text{O}$ нефрита составляет $-18.5 \div -18.8\text{‰}$; кальцит-тремолитового скарна -17.4‰ ; эпидот-тремолитового скарна $-4.4, +2.6\text{‰}$; доломита $+26.1\text{‰}$. Нефрит соответствует требованиям к камнесамоцветному сырью. Диопсидит с линзочками и прослоями нефрита может использоваться для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций. Аподоломитовая природа нефрита подтверждена по соотношению Mg и Fe, пониженному содержанию Cr, Ni, Co, повышенному содержанию F и отношению Sr к Ba, характеру распределения РЗЭ. Спектр РЗЭ нефрита, в основном, наследуется от исходных доломитов, но содержит признаки влияния процессов скарнирования основных пород. Источник аномально изотопно легкого кислорода нефрита – поровый флюид, вероятно метеорного происхождения, обедненный ^{18}O в результате декарбонатизации доломита. Гранит лишь обеспечивает региональный разогрев, активизирующий поровый флюид. В формировании и преобразовании нефрита принимали участие как метасоматические, так и метаморфические процессы. Формирование нефрита связано с процессами скарнирования. Тектонические напряжения вызывали дробление пород, облегчающее проникновение флюида, обеспечили формирование скрытокристаллической спутанно-волокнистой структуры нефрита. Дальнейший регрессивный метаморфизм привел к развитию хлорита и талька, ухудшивших качество нефрита.

Ключевые слова: нефрит, Воймаканское месторождение, вещественный состав, условия формирования

DOI: 10.31857/S0016777024060044, EDN: wdwqgs

ВВЕДЕНИЕ

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

Месторождения нефрита подразделяются на два эндогенных геолого-промышленных типа. Первый тип – апосерпентинитовый в офиолитах. Второй тип – аподоломитовый в тремолит-кальцитовых магнезиальных скарнах. Для апосерпентинитового нефрита характерны различные оттенки зеленого цвета до бурого (табачного, болотного) и черного. Для аподоломитового нефрита характерен широкий диапазон

преимущественно светлых 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 01.01.2023 Государственным балансом запасов в России учтены 27 месторождений (Государственный..., 2023) апосерпентинитового и аподоломитового нефрита (фиг. 1). В 2022 г. в Бурятии разрабатывались Кавоктинское, Нижне-Олломинское, Сергеевская залежь, Хайтинское, Голюбинское месторождения аподоломитового нефрита. Воймаканское месторождение в Бурятии подготавливалось к отработке. Удоканское в Забайкальском крае и Буромское в Бурятии разведывались. Все российские месторождения аподоломитового нефрита лицензированы и находятся в Витимской нефритоносной провинции (фиг. 1).

За рубежом большинство месторождений аподоломитового нефрита находятся в Китае (фиг. 1). Наиболее крупные известные месторождения расположены в Северо-Западном Китае. В Синцзян-Уйгурском автономном районе находится отрабатываемый уже 6 тысяч лет нефритоносный пояс Хотан как с коренными месторождениями (Liu et al., 2015; Liu et al., 2017; Zhang et al., 2022; Nangeelil et al., 2023), среди которых наиболее известен и изучен Аламас (Liu et al., 2010, 2011₁), так и со знаменитыми россыпными месторождениями Юрункаш — “река белого нефрита” и Каракаш — “река черного нефрита” (Liu et al., 2011₂, 2016; Jing, Liu, 2022; Zheng et al., 2023). К поясу Хотан с востока примыкает нефритоносный район Алтынтаг (Gao et al., 2019; Jiang et al., 2020; Liu et al., 2021; Liang et al., 2022; Zhang et al., 2022; Jiang et al., 2023). Еще восточнее в провинции Цинхай находятся месторождения Голмуд и другие (Yu et al., 2016_{1, 2}; Gong et al., 2023). Ряд месторождений находится в Северо-Восточном Китае: Тели в провинции Хэйлунцзян (Gao et al., 2019; Xu et al., 2022; Xu, Bai, 2022), Паньши в провинции Гирин (Bai et al., 2019), Сюань и Санпийюй 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 Центральном 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 Южном Западном Китае — месторождения Лунси

в провинции Сычуань (Wang et al., 2022; Fu et al., 2023) и Лодянь в провинции Гуйжоу (Zhang et al., 2015; Wang et al., 2020; Li et al., 2023₁).

В других странах следует отметить (фиг. 1) месторождение Чхунчхон в Южной Корее (Yui, Kwon, 2002; Feng et al., 2022; Li et al., 2023₂), район Коуэлл на полуострове Эйр в Южной Австралии (Nichol, 2000; Tan et al., 2013), месторождение Альпе Мастабия (Вал Маленко) в Ломбардии, Италия (Adamo, Vocchio, 2013), месторождение Злоты Сток в Нижней Силезии, Польша (Korybska-Sadło et al., 2018; Gil et al., 2015, 2020).

До сих пор остается дискуссионной роль метаморфических и метасоматических процессов в формировании нефрита. На большинстве изученных аподоломитовых месторождений тела нефрита локализируются на контакте доломита и гранита. Есть исключения, например месторождения Дахуа (Zhong et al., 2019), образовавшееся на контакте диабаз и известняка, Лодянь (Zhang et al., 2015) — в известняках вблизи тел диабаз, Луаньчуань (Ling et al., 2015) — в доломите на удалении от контакта с метагаббро. Для месторождений Витимской нефритоносной провинции более характерно образование нефрита на контакте доломита и амфиболита, слагающих ксеноблоки в граните Ангаро-Витимского батолита. Уникальные особенности ассоциации нефрита со скарнированными амфиболитами определяют необходимость их изучения.

Однако научно-исследовательские работы на российских месторождениях нефрита проводились в основном в 1980-х годах. В какой-то мере исследования нефрита Витимской нефритоносной провинции возобновлены лишь в последние годы (Бурцева и др., 2015_{1, 2}; Сутурин и др., 2015; Гомбоев и др., 2017; Филиппова и др., 2021; Кислов и др., 2023). В данной работе приведены результаты исследования Воймаканского месторождения, находящегося на западном фланге Витимской нефритоносной провинции. Научно-исследовательские работы на этом месторождении ранее не проводились, публикации в открытой печати отсутствуют.

ВОЙМАКАНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

Воймаканское месторождение аподоломитового нефрита находится в западной части Витимской нефритоносной провинции. В географическом отношении месторождение расположено на территории Баунтовского эвенкийского района Республики Бурятия в Средне-Витимской горной стране (фиг. 2).

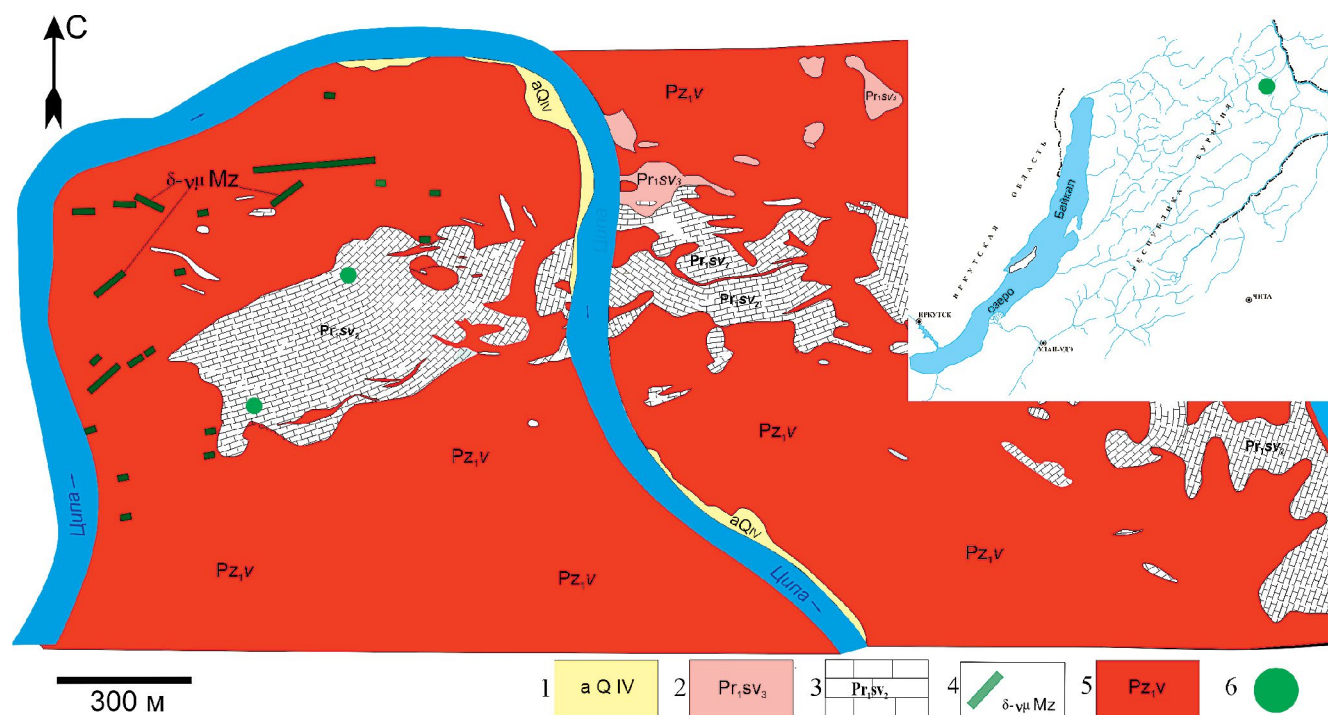


Воймаканское проявление апокарбонатного нефрита выявлено в 1981 г. А.П. Секериным при проведении рекогносцировочных маршрутов экспедицией “Байкалкварцсамоцветы” в среднем течении р. Ципа (Кодочигов, Курбатов, 2015ф¹). Среди развалов элювиально-делювиальных глыб гранитов и мраморов были обнаружены валуны кальцит-тремолитовых скарнов. Геологоразведочные работы на Воймаканском проявлении проводились до 1991 г. экспедицией “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, 2015ф).

Район расположения Воймаканского месторождения характеризуется развитием различных осадочных, метаморфических и интрузивных

пород, осложнен тектоникой (фиг. 2). Метаморфические и осадочные (за исключением современного аллювия) породы относятся к суванихинской свите нижнего протерозоя. Она подразделяется на три подсвиты, из которых на участке месторождения представлены две. К верхней подсвите относятся кварц-биотитовые, биотит-кордиеритовые, силлиманит-биотитовые, биотит-роговообманковые сланцы, гнейсы, амфиболиты, прослои и горизонты кристаллических известняков, кислых и основных метаморфизованных эффузивов. К средней подсвите отнесены кристаллические известняки, доломиты с прослоями биотитовых сланцев. Степень метаморфизма отвечает амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фациям.

Большая часть площади месторождения сложена выходами Витимканского интрузивного комплекса нижнего палеозоя. Первая фаза комплекса представлена порфировидными амфибол-биотитовыми гранитами, гранодиоритами, диоритами,



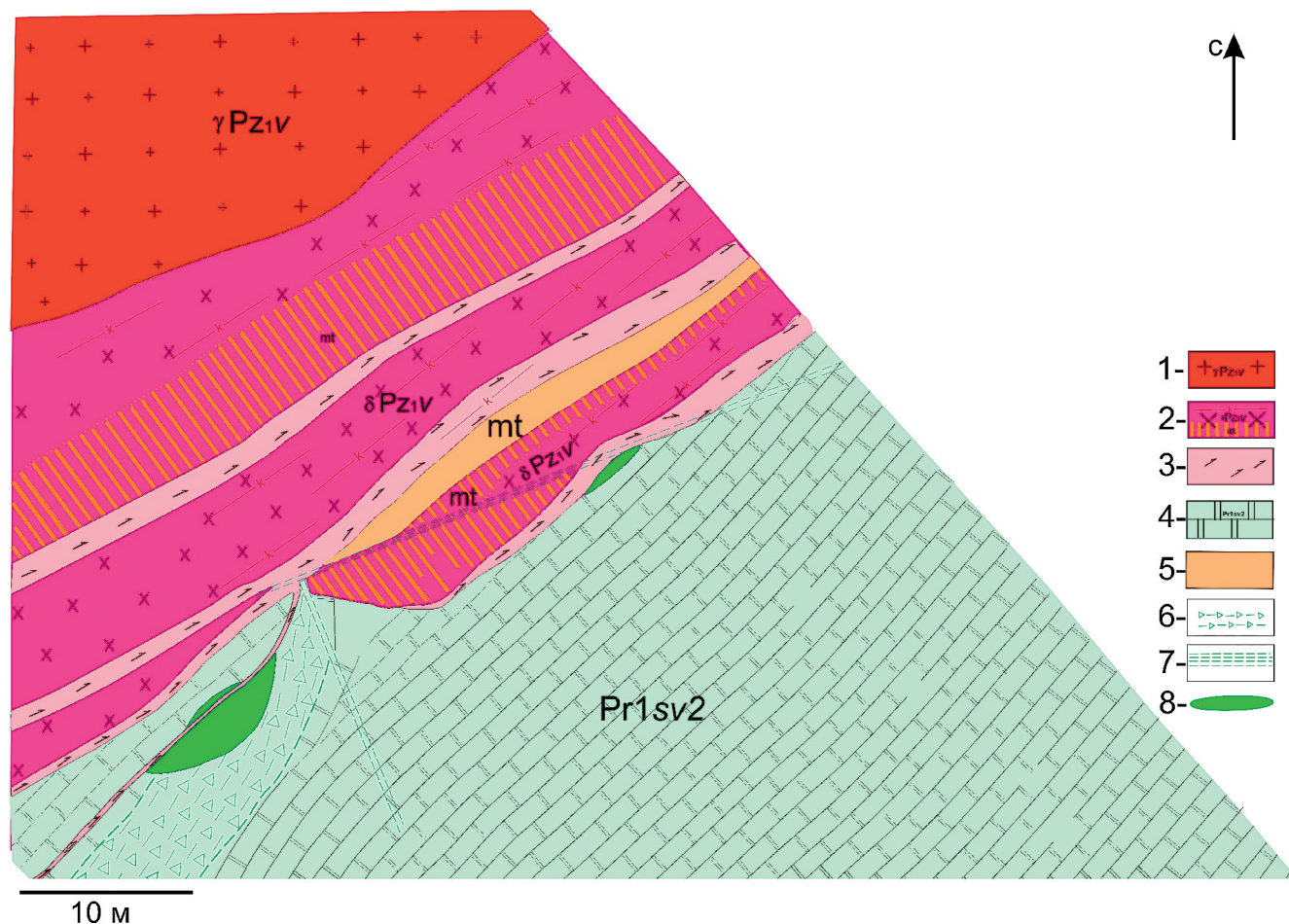
Фиг. 2. Геологическая карта Воймаканского месторождения по (Кодочигов, Курбатов, 2015ф) с дополнениями и исправлениями; 1 – аллювиальные отложения; 2 – верхняя подсвита суванихинской свиты: сланцы, гнейсы, амфиболиты, известняки, метаэффузивы; 3 – средняя подсвита суванихинской свиты: известняки, доломиты, сланцы; 4 – мезозойские интрузивы: габбро, диориты, габбро-диориты; 5 – Витимканский интрузивный комплекс: граниты, гранодиориты, диориты, аплиты, пегматиты; 6 – залежи нефрита вне масштаба.

¹ Кодочигов В.С., Курбатов С.Л. Отчет о поисково-оценочных работах на Воймаканском проявлении апокарбонатного нефрита за 2011–2014 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 1.02.2014 г. Улан-Удэ, 2014.

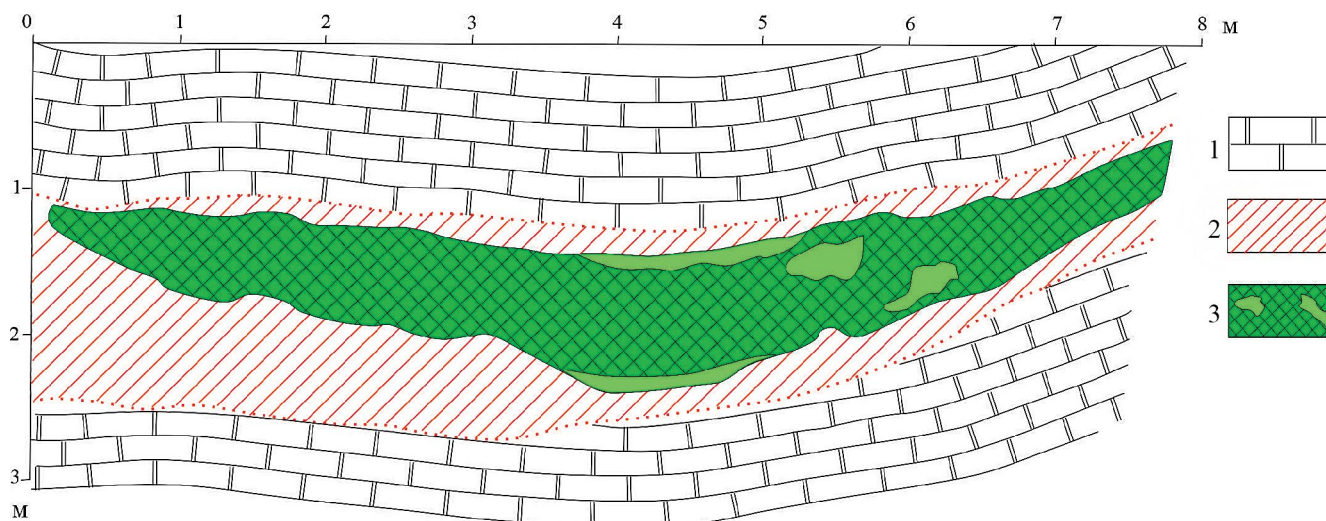
дайками аплитов, телами пегматитов. Вторая фаза — лейкократовыми биотитовыми равномернотернистыми, реже гнейсовидными гранитами, гранодиоритами. К мезозою отнесены дайки габбро, диоритов, габбро-диоритов.

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 габбро, диоритов, габбро-диоритов и тела метасоматических пород.

Метасоматические изменения с образованием нефритонесных зон развиты вблизи контактов мраморизованных доломитов и амфиболитов — метаморфических пород по основным эффузивам (фиг. 3). 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 (Кодочигов, Курбатов, 2015ф).



Фиг. 3. Геологическая схема залежи нефрита № 1 (первый и второй блоки) на контакте мраморизованных доломитов и амфиболитов по (Кодочигов, Курбатов, 2015ф) с дополнениями и исправлениями. Витимканский интрузивный комплекс: 1 — первая фаза, 2 — вторая фаза, 3 — верхняя подсвита суванихинской свиты, 4 — средняя подсвита суванихинской свиты, 5 — метасоматически измененные породы, 6 — тектонические брекчии, 7 — зоны разрывных нарушений, 8 — тела кальцит-тремолитовых скарнов с желваками и жилами нефрита.



Фиг. 4. Зарисовка разреза третьего блока 1 залежи – расчистка в западной стенке карьера (Кодочигов, Курбатов, 2015ф) с дополнениями и исправлениями: 1 – доломитовый мрамор эпидотизированный, 2 – эпидот-тремолитовый скарн, 3 – кальцит-тремолитовый скарн с желваками и прожилками нефрита.

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

Залежь №1 нефрита (фиг. 3, 4) находится в теле кальцит-тремолитового скарна в доломитовом мраморе на расстоянии 1.5–2 м от контакта с гранитом. Отмечаются контакты с эпидот-тремолитовым скарном. Вдоль контактов залежь тектонизирована, по трещинам борозды и зеркала скольжения. Залежь №1 имеет крутое падение на юго-запад, сложена тремя разрозненными телами (блоками), разделенными кальцит-тремолитовым скарном и находящимися на расстоянии 4.0–4.5 м друг от друга. Длина первого блока 12 м, мощность от 0.15 до 1.04 м, в среднем 0.58 м; длина второго блока 7 м, мощность 0.10–2.25 м, в среднем 1.74 м; длина третьего блока 7 метров, мощность 0.17–0.65, в среднем 0.41 м (фиг. 4).

Залежь №2 залегает в теле кальцит-тремолитового скарна среди доломитового мрамора на расстоянии 1.5–2 м от контакта с метасоматизированным гранитом, контакты кальцит-тремолитового скарна с доломитом катаклазированы и окварцованы. В плане залежь имеет форму крутопадающей линзы. По простиранию залежь прослежена на 15 м, мощность от 0.22 до 1.34 м, в среднем 0.59 м.

Полная метасоматическая зональность: доломитовый мрамор – кальцифир – кальцит-тремолитовый скарн с нефритом – эпидот-тремолитовый

скарн – амфиболит или диорит. Чаше наблюдают неполные варианты зональности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены штучные образцы из кернов скважин, в меньшей мере из валовых проб, полученных в ходе геологоразведочных работ, выполненных ООО “ВВС” на Воймаканском месторождении по заказу ЗАО “МС Холдинг”. 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 бинокля МБС-10 и геммологического фонарика. Шлифы изучены под поляризационным микроскопом “Olympus BX-51”.

Анализ макрокомпонентов выполнен в ЦКП “Геоспектр” ГИН СО РАН, Улан-Удэ: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 определялись фотометрическим методом; CaO , MgO , MnO , Fe_2O_3 , CO_2 – атомно-абсорбционным спектроскопическим; FeO , CO_2 – титриметрическим; ppp , S – гравиметрическим; Na_2O , K_2O – пламенно-фотометрическим; Cr , V , Co , Ni , Cu – атомно-эмиссионным спектральным методом. Аналитики Л.В. Митрофанова, Т.Г. Хумаева, О.В. Корсун, Е.Д. Утина, М.Г. Егорова.

Содержания микроэлементов определены в ЦКП “Геоаналитик” (ИГГ УрО РАН) на квадрупольном ИСП масс-спектрометре NexION300S (Perkin Elmer, США). Микроволновое разложение проб осуществлялось смесью кислот $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{HF}$ с использованием системы Berghof Speedwave MWS 3+. Операционные условия масс-спектрометра: мощность радиочастотного генератора — 1300 Вт, материал конусов — платина. Все измерения проводились в режиме количественного анализа с построением градуировочных кривых. Для построения градуировочных зависимостей использовались сертифицированные в соответствии ISO 9001 мультиэлементные стандартные растворы (Perkin Elmer Instruments). Для контроля использованы сертифицированные образцы базальта BCR-2 и андезита AGV-2 (USGS). В течение анализа серии проб измерение стандартного образца проводилось с периодичностью 1:5—1:10. Полученные концентрации редких, рассеянных и редкоземельных элементов удовлетворительно согласуются с аттестованными величинами с допустимым отклонением в пределах 15%. Погрешности определения элементов составили (отн. %): 24 (Cr, Ni, Co, Cu, V, Ba, Sr), 30 (Rb), 41 (PЗЭ), 50 (Zr), 60 (Y, Hf, Ta, Nb, Th, U). Аналитик Д.В. Киселева.

Измерения изотопного состава кислорода выполнялись на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 в ЦКП “Геоспектр” (ГИН СО РАН, Улан-Удэ) с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт — образец). Подготовка образцов проводилась с использованием метода лазерного фторирования (ЛФ) на опции “лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов” в присутствии реагента BrF_3 по методу (Sharp, 1990). Для калибровки использовались международные стандарты NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Правильность полученных значений контролировалась регулярными измерениями собственного внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного ИГЕМ РАН Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин $\delta^{18}\text{O}$ находилась на уровне $(1\text{с}) \pm 0.2\text{‰}$. Аналитик В.Ф. Посохов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Качественные характеристики нефрита

На Воймаканском месторождении нефрит имеет преимущественно светло-салатную, салатную, серо-салатную и бурую (медовую) окраску (фиг. 5). В некоторых образцах окраска

неоднородная из-за включений визуально различных призматических зерен тремолита, кальцита, диопсида, включений мелкозернистого кальцит-тремолитового агрегата. Просвечиваемость по краю штуфа от 1 до 5 см. Твердость 5—5.5 по шкале Мооса. Плотность 2.94—2.95 г/см³. Блеск матовый, излом раковистый или занозистый. Содержание сортового нефрита в штуфных пробах 5—50 об. %, среднее содержание в валовых пробах разных залежей — 3.1—5.2 об. %. Нефрит принимает совершенную полировку с зеркальным блеском. Дефекты: разноориентированные трещины, включения визуально различных минералов и их агрегатов, развитие хлорита и тальца, пленки кальцита, вторичных минералов железа и марганца на поверхностях и в трещинах.

Петрографическое описание

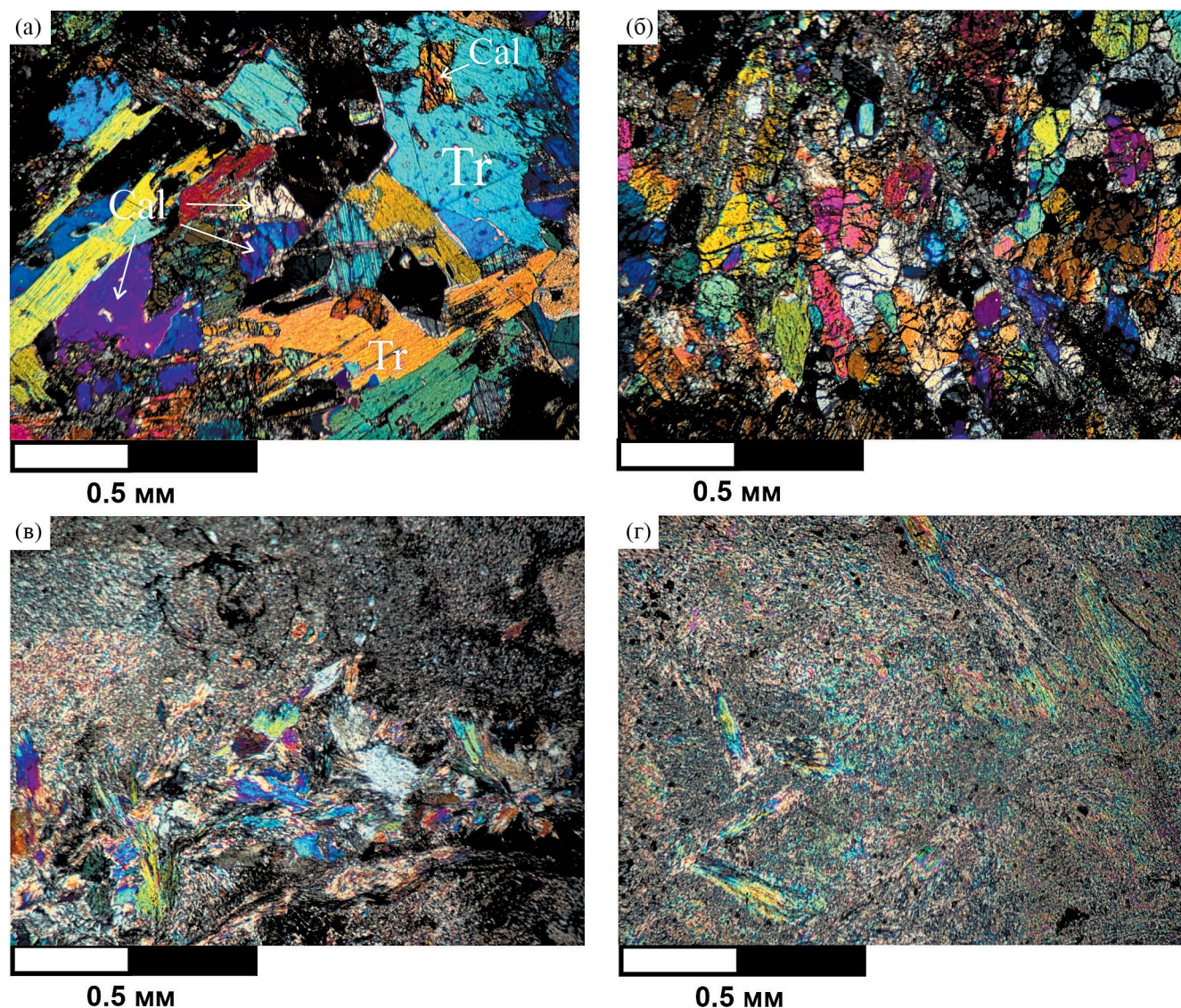
Нефрит образует желваки, жилы, гнезда, линзы в жильных телах кальцит-тремолитового скарна. *Кальцит-тремолитовый скарн* белый, матовый (фиг. 5ж), сложен удлиненно-призматическими кристаллами и радиально-лучистыми агрегатами тремолита, зернами и тонко-лучистыми агрегатами кальцита (фиг. 6а).

На контакте с кальцит-тремолитовым скарном обычно находятся *эпидот-тремолитовые до хлорит-эпидот-тремолитовых скарны*. Эпидот-тремолитовые скарны среднезернистые полосчатые (фиг. 5д, е). Их окраска варьирует от зеленой до темно-зеленой. Структура основной массы гранобластовая. Эпидот-тремолитовые скарны сложены крупными удлиненно-призматическими, реже игольчатыми кристаллами тремолита (фиг. 6б), интерстиции между которыми заполнены хлоритом и серпентином, в подчиненном количестве крупные кристаллы эпидота, иногда с включениями циркона.

Карбонатные породы в непосредственной близости залежей нефрита представлены кристаллическими *доломитами*. Внешне это светло-серые, кремовые разномзернистые полнокристаллические породы (фиг. 5з). Структура доломита гранобластовая, основные минералы — кальцит и доломит. Кальцит зачастую мелкозернистый, часто удлиненный, единичные зерна достигают 0.1 мм, составляет 20—25 об. % породы. Доломит в шлифах представлен гипидиоморфными зернами с ярко выраженными полисинтетическими двойниками, размеры зерен достигают 0.25 мм. Встречаются изометричные агрегаты хлорита и зерна фторапатита.



Фиг. 5. Цветовые вариации нефрита Воймаканского месторождения: а – салатный V1-14; б – светло-салатный (А) с обособлениями кальцит-тремолитового агрегата (Б) РК 5-4-1; в – диопсидит (В) с серо-салатным нефритом (А) КР 57-1-12; г – бурый (медовый) РК 3; д – контакт эпидот-тремолитового скарна (Г) со светло-зеленым нефритом (А) КР 5-3-1; е – контакт эпидот-тремолитового скарна (Г) с коричневым (медовым) нефритом (А) РК 3; ж – контакт кальцит-тремолитового скарна (Д) с коричневым (медовым) нефритом (А) РК 4; з – доломит КР 81-1-3.



Фиг. 6. Микрофотографии образцов: а – лейсты тремолита Tr и мелкие зерна кальцита Cal в кальцит-тремолитовом скарне КР 6-1-3; б – гипидиоморфные зерна тремолита в эпидот-тремолитовом скарне РК-3; в – прожилок изометричного до игольчатого позднего тремолита сетчатый скрытокристаллический спутанно-волоконистый агрегат тремолита нефрита КР 5-3-7; г – скрытокристаллический спутанно-волоконистый агрегат тремолита нефрита КР 5-3-7.

Нефрит Воймаканского месторождения характеризуется массивной, реже сланцеватой текстурой и скрытокристаллической, спутанно-волоконистой (фибробластовой) структурой (фиг. 6г). Приконтактовая 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 (фиг. 6в).

С нефритом ассоциируют своеобразные породы, состоящие в основном из диопсида

с прожилками и линзами нефрита (рис. 5в). Мы их назвали по составу *диопсидитами*, хотя классический диопсидит – это пироксенит, состоящий преимущественно из диопсида с незначительной примесью магнетита и иногда ортопироксена, оливина или основного плагиоклаза, образующий жилы в ультраосновных породах и ранние дифференциаты габброидных интрузивов. Преобладающий в описанной нами метасоматической породе диопсид светло-бежевый, цвета слоновой кости, неравномернозернистый – иногда зерна достигают 2 см в сечении.

Вещественный состав пород

Как показывает анализ макрокомпонентов (табл. 1), для нефрита разных оттенков характерны небольшие вариации Fe_2O_3 и FeO . Содержания остальных компонентов варьируют незначительно, за исключением никеля и кобальта. Отличается белый с салатным оттенком нефрит КР-5-3-7 с повышенным содержанием CaO , CO_2 и V – половину этого образца составляет тонкозернистый кальцит-тремолитовый агрегат. Доломит и эпидот-тремолитовый скарн значительно отличаются по составу от нефрита: повышенное содержание SiO_2 и Al_2O_3 в эпидот-тремолитовом скарне и пониженное в доломите, обе эти породы содержат меньше MgO и больше CaO , чем нефрит.

По микрокомпонентам (табл. 2) для нефритов вне зависимости от цвета также характерны

незначительные вариации, за исключением мышьяка, серебра, олова, редкоземельных элементов, тантала и урана. Эпидот-тремолитовый скарн отличается от нефрита повышенным содержанием скандия, титана, меди, цинка, галлия, селена, стронция, циркония, молибдена, кадмия, олова, теллура, редкоземельных элементов, гафния, тантала, висмута и тория. Для доломита характерно пониженное в той или иной степени содержание практически всех микрокомпонентов относительно нефрита.

На Воймаканском месторождении значение $\delta^{18}\text{O}$ нефрита относительно SMOW составляет $-18.5 \div -18.8\text{‰}$; кальцит-тремолитового скарна -17.4‰ ; эпидот-тремолитового скарна -4.4 , $+2.6\text{‰}$; доломита $+26.1\text{‰}$ (табл. 3).

Таблица 1. Содержание макрокомпонентов в породах, мас. %; Cr, V, Co, Ni, Cu в г/т

	KS-19	KS-18	V1-14	KP-5-3-7	PK-1 N	PK-3	KP-81-1-3	PK-1 S
SiO_2	56.30	56.20	56.50	51.60	56.10	57.60	0.90	43.40
TiO_2	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02
Al_2O_3	0.70	0.50	0.50	0.70	1.00	0.60	0.10	10.20
Fe_2O_3	0.34	<0.10	0.17	0.10	0.24	<0.10	0.10	1.54
FeO	0.92	0.44	0.44	0.28	<0.10	0.24	<0.10	1.20
MnO	0.08	0.06	0.06	0.08	0.03	0.04	0.04	0.11
MgO	24.00	24.64	23.60	20.09	25.70	25.30	21.34	13.97
CaO	12.48	13.02	13.68	18.17	12.76	13.02	31.30	21.31
Na_2O	0.11	0.12	0.11	0.13	0.12	0.12	0.05	0.12
K_2O	0.07	0.07	0.05	0.09	0.03	0.05	<0.01	0.04
P_2O_5	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.87	0.15
п.п.п	4.70	4.39	4.65	8.81	3.16	3.03	44.72	7.11
Σ	99.70	99.44	99.76	100.05	99.24	100.00	99.45	99.97
CO_2	—	—	1.98	6.60	0.66	0.44	44.66	3.52
S	—	—	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
F	0	0	0.20	0.10	0.27	0.34	0.06	0.07
Cr	9	10	<5	<5	7	5.5	5	6
V	—	—	6	36	9	11	4.5	60
Co	10	18	11	11	9	41	19	13
Ni	22	25	<3	4	3	<3	3.5	7.7
Cu	—	—	<3	<3	<3	<3	3.5	<3

Примечание. Здесь и далее – нефрит: KS-18, KS-19, V1-14 – светло-салатный, KP-5-3-7 – белый с салатным оттенком, PK-1 N – белый с желтоватым оттенком, PK-3 – бурый; KP-81-1-3 – доломит, PK-1 S – эпидот-тремолитовый скарн.

Таблица 2. Содержание микрокомпонентов в породах, г/т

	KS-18	KS-19	V1-14	PK-3	PK-5-3-7	PK-1 N	PK-1 S	KP-81-1-3
Li	6	2.6	4	5	10	7	16	1.3
Be	6.4	5	5.6	13	10	9	6.2	0.08
Sc	1.2	5	6	6	5	6	34	2.4
Ti	60	60	17	50	30	30	4200	90
V	14	6	9	11	40	10	70	2.5
Cr	8	9	2.8	7	3	9	6	7
Mn	320	400	300	190	380	160	500	180
Co	12	8	21	42	14	11	21	22
Ni	18	16	23	19	27	19	34	50
Cu	5	6	1.9	1.8	2.9	1.9	16.6	5
Zn	50	30	50	30	50	17	110	12
Ga	1.5	1.2	1.4	1	2.6	1.3	22	0.4
Ge	0.5	0.5	1.1	0.7	1.2	0.7	1.8	0.026
As	103	104	0.44	0.36	0.41	0.21	1.9	1.5
Se	0.21	0.29	0.22	0.21	0.29	0.3	2.5	0.5
Rb	2.6	2.9	3.1	2.7	8.0	0.9	2.0	0.13
Sr	60	80	9	8	18	3.4	210	50
Y	1	5	0.7	1.5	0.7	3	80	0.9
Zr	1.4	2.8	1.9	0.5	2.2	0.6	69	12
Nb	1.7	0.4	0.6	0.41	0.2	0.4	60	0.7
Mo	0.17	0.26	0.08	0.05	0.15	0.028	2.6	0.09
Ag	0.017	<0.0004	0.145	3.3	0.116	0.075	2.1	0.141
Cd	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.04	0.13	0.06
Sn	0.47	0.28	0.035	0.023	0.036	0.24	4	0.08
Sb	0.08	0.07	0.06	0.08	0.04	0.04	0.09	0.017
Te	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.013	<0.01
Cs	0.7	1	1.5	1	0.8	0.19	0.23	0.009
Ba	5.5	4	2.3	11	3.5	7	12	3.3
La	0.27	3	0.6	0.6	0.14	1.4	60	0.25
Ce	0.31	7	1.1	1.2	0.34	3.5	170	0.7
Pr	0.032	1.1	0.1	0.16	0.046	0.43	23	0.07
Nd	0.099	4.5	0.36	0.72	0.21	1.7	80	0.3
Sm	0.018	1.1	0.07	0.17	0.048	0.31	15	0.06
Eu	0.0052	0.24	0.011	0.026	0.019	0.051	2.7	0.017
Gd	0.021	1	0.068	0.16	0.055	0.32	14	0.074
Tb	0.004	0.14	0.012	0.028	0.01	0.05	1.8	0.011
Dy	0.038	0.8	0.07	0.16	0.07	0.28	10	0.07
Ho	0.014	0.15	0.017	0.033	0.014	0.06	2.2	0.018
Er	0.07	0.4	0.051	0.1	0.051	0.19	6	0.059
Tm	0.02	0.05	0.008	0.013	0.009	0.026	0.9	0.009
Yb	0.17	0.3	0.06	0.07	0.06	0.17	6	0.06
Lu	0.023	0.05	0.009	0.011	0.008	0.025	0.8	0.01
Hf	0.016	0.034	0.04	0.017	0.033	0.019	2.6	0.12
Ta	0.2	0.007	0.025	0.027	0.012	0.018	3.2	0.028
W	50	50	70	60	24	30	40	30
Tl	0.009	0.005	0.018	0.014	0.05	0.008	0.022	0.0031
Pb	2.8	4	2.4	2.4	3	2.1	4	4
Bi	<0.0005	<0.0005	0.0087	0.0013	0.0019	0.00104	0.094	0.037
Th	0.021	0.012	0.03	0.026	0.03	0.04	12.8	0.4
U	1.1	0.28	0.26	0.16	0.19	0.07	2.8	0.9

Примечание. Характеристику проб см. в примечании к табл. 1.

Таблица 3. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$)

Проба	$\delta^{18}\text{O},\text{‰}$ V-SMOW
V1-14	–18.5
V1-14	–4.4
KP-5-2-5	–17.4
PK-3	–18.8
PK-1	–18.8
PK-1	2.6
KP-81-1-3	26.1

Примечание. Характеристику проб см. в примечании к табл. 1.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности геологического строения 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. Еще одно отличие от других месторождений Витимской нефритоносной провинции — широкое развитие талька вплоть до полного замещения нефрита.

Аподоломитовая природа нефрита не вызывает сомнений, тем не менее для ее подтверждения был привлечен химический состав нефрита. Считается, что у апосерпентинитового нефрита значение $\text{Fe}^{2+}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ обычно более 0.06, тогда как у аподоломитового нефрита менее 0.06 (Siqin et al., 2012). Содержание FeO в нефрите Воймаканского месторождения не превышает 0.92 вес. %, а MgO составляет 20.09–27.70 вес. % (табл. 1), что соответствует аподоломитовому нефриту. Для сравнения: средние содержания в аподоломитовом нефрите Витимских россыпных проявлений 0.59 вес. % FeO, 24.46 вес. % MgO; Буромского месторождения — 1.09 вес. % FeO, 24.13 вес. % MgO; Голюбинского месторождения — 0.34 вес. % FeO, 23.07 вес. % MgO; Кавоктинского месторождения — 0.75 вес. % FeO, 23.14 вес. % MgO (Сутурин и др., 2015). Наши данные по нефриту Кавоктинского

месторождения несколько отличаются: 0.16–0.22 вес. % FeO, 24.98–25.77 вес. % MgO (Кислов и др., 2023).

Содержание Cr, Ni, Co также различается: в апосерпентинитовом нефрите относительно высокое — 900–2812 г/т Cr, 958.7–1898 г/т Ni и 42–207 г/т Co, тогда как в аподоломитовом нефрите относительно низкое: 2–179 г/т Cr, 0.05–471 г/т Ni и 0.5–10 г/т Co (Siqin et al., 2012). Нефрит Воймаканского месторождения соответствует аподоломитовому нефриту: до 10 г/т Cr, до 25 г/т Ni и 9–10 г/т Co за исключением 41 г/т Co в буром нефрите по данным атомно-эмиссионного спектрального анализа (табл. 1), 2.8–9 г/т Cr, 16–27 г/т Ni и 8–21 г/т Co за исключением 42 г/т Co в буром нефрите по данным ICP-MS анализа (табл. 2). Для сравнения: средние содержания в аподоломитовом нефрите Витимских россыпных проявлений 20 г/т Cr, 6 г/т Ni и 2 г/т Co; Буромского месторождения — 36 г/т Cr, 14 г/т Ni и 3 г/т Co; Голюбинского месторождения — 37 г/т Cr, 36 г/т Ni и 6 г/т Co (Сутурин и др., 2015). В нефрите Кавоктинского месторождения: до 9 г/т Cr, 8–9.5 г/т Ni и 6–9.8 г/т Co по данным силикатного анализа; 2.4–15 г/т Cr, 6–11 г/т Ni и 4–6 г/т Co по данным ICP-MS анализа (Кислов и др., 2023).

Аподоломитовый нефрит также отличается повышенным содержанием фтора. Среднее содержание фтора в апокарбонатных нефритах Витимских проявлений — 0.57 вес. % (Сутурин и др., 2015), Кавоктинского месторождения — 0.11 вес. % (Кислов и др., 2023). Содержания фтора в апосерпентинитовых нефритах значительно ниже, в среднем по месторождениям: Оспинскому — 0.04 вес. %, Уланходинскому — 0.04 вес. %, Нырдовоменшор — 0.01 вес. %, Хамархудиному — 0.07 вес. % (Сутурин и др., 2015). В нефрите Воймаканского месторождения содержание фтора до 0.34 вес. %, в среднем 0.15 вес. % (табл. 1), что отвечает аподоломитовому нефриту и объясняется нередким присутствием фтора в составе тремолита и широким развитием фторапатита.

К индикаторным элементам можно также отнести барий и стронций. В отличие от апокарбонатного нефрита с отношениями стронция к барию 1.7–2.0, в апосерпентинитовом нефрите стронций-бариевое отношение менее 1 или незначительно выше (Сутурин и др., 2015). В нефрите Воймаканского месторождения при больших вариациях среднее отношение стронция к барию 5.4, что также соответствует его аподоломитовой природе.

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в нефрите и вмещающих породах низкое, варьирует в пределах 0.008–7 г/т. Минералы-концентраторы РЗЭ в нефрите – фторапатит, реже эпидот, возможно изоморфное вхождение РЗЭ в диопсид и в тремолит в позицию кальция. Характер распределения РЗЭ плоский с небольшим правым наклоном, обогащением легкими РЗЭ (фиг. 7). У трех образцов нефрита из четырех отмечается слабоотрицательная Eu-аномалия, у двух – еще меньшая отрицательная Ce-аномалия.

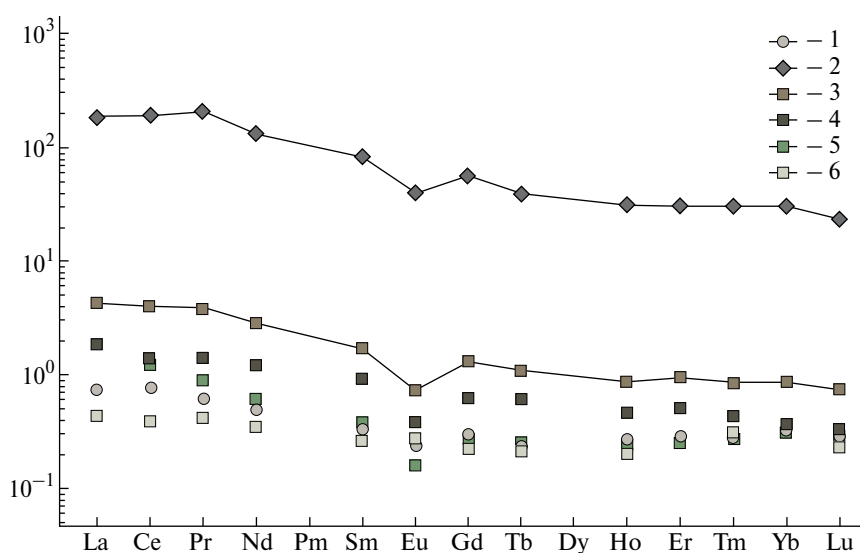
Распределение РЗЭ в доломите практически идентично распределению в нефрите при пониженных содержаниях с незначительными отрицательной Eu-аномалией и положительной Ce-аномалией. Это объясняется тем, что содержание РЗЭ в гидротермальных флюидах, будь то магматического, метаморфического или вадозного происхождения, как правило, низкое (Римская-Корсакова, Дубинин, 2003; Бортников и др., 2007; Горбачев и др., 2010). Следовательно, на содержание РЗЭ в нефрите в основном влияют окружающие породы, в данном случае доломит как основной субстрат формирования нефрита. Содержания РЗЭ в эпидот-тремолитовом скарне на полтора порядка выше благодаря широкому развитию эпидота, но характер распределения РЗЭ аналогичен таковому доломита и нефрита при отрицательной Eu-аномалии.

Аналогия распределения РЗЭ в доломите и эпидот-тремолитовом скарне подтверждает общность их происхождения,

а не формирование исходных для эпидот-тремолитовых скарнов амфиболитов по поздним основным интрузивам. Повышенное содержание РЗЭ в нефрите по сравнению с доломитом показывает вклад в формирование нефрита компонентов эпидот-тремолитового скарна по амфиболиту. Отрицательная Eu-аномалия может быть связана с формированием исходного для амфиболита основного эффузива либо восстановительным характером среды формирования нефрита (Jiang et al., 2021), чему соответствуют предположения об участии в его формировании глубинного водорода (Сутурин и др., 2015; Филиппова и др., 2021).

Ранее были проанализированы (Su, Yang, 2022) 15 образцов нефрита “Байкальского региона” без точной привязки. Результаты показали низкие содержания РЗЭ от 2.274 до 17.713 г/т, незначительное обогащение легкими РЗЭ, снижение тяжелых РЗЭ и умеренно отрицательные аномалии Eu (Su, Yang, 2022), что согласуется с нашими результатами.

Для аподолмитового нефрита нефритоносных провинций Хотан, Алтынтаг и Цинхай характерны схожие характеристики РЗЭ: низкое содержание 0.3–182 г/т (повышенное у зеленых разностей), обогащение легкими РЗЭ, почти плоское распределение средних и тяжелых РЗЭ, сильные и умеренные отрицательные аномалии Eu (Liu et al., 2011_{1, 2}; Siqin et al., 2014; Liu et al., 2016; Yu et al., 2016; Liu et al., 2017; Jiang et al., 2020; Su, Yang, 2022; Zhang et al., 2022_{1, 2}).



Фиг. 7. Распределение редкоземельных элементов. 1: KP-81-1-3; 2: PK-1 A; 3 – PK-1 N, 4 - PK-3, 5 - V-1-14, 6 - KP-5-3-7.

Характеристики РЗЭ аподоломитового нефрита других месторождений близки за небольшими исключениями (фиг. 4 в Zhang et al., 2023; Feng et al., 2022; Li et al., 2023₂) и могут использоваться для их отличия от апосерпентинитового нефрита. Для апосерпентинитового нефрита провинций Цинхай, Тайвань и месторождения Манас в Синцзян-уйгурском автономном округе характерны значительно повышенные содержания РЗЭ: 2200–3000 г/т, U-образное распределение РЗЭ, сильные положительные аномалии Eu, которые отражают их происхождение (Siqin et al., 2014). Таким образом, это еще одно подтверждение аподоломитового происхождения нефрита Воймаканского месторождения.

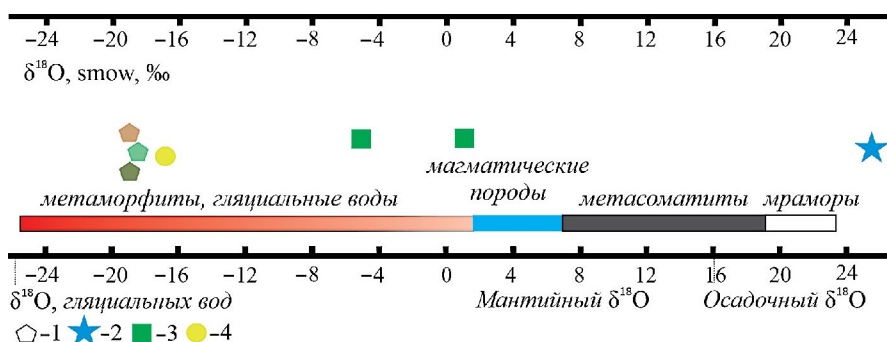
Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) – один из важных индикаторов процессов нефритообразования. На Воймаканском месторождении значение $\delta^{18}\text{O}$ нефрита относительно SMOW составляет -18.5 , -18.8‰ ; кальцит-тремолитового скарна -17.4‰ ; эпидот-тремолитового скарна -4.4 , $+2.6\text{‰}$; доломита $+26.1\text{‰}$ (фиг. 8, табл. 3).

Ранее была опубликована информация об аномально низких изотопных отношениях кислорода в нефрите Витимской нефритоносной провинции, полученная по музейным образцам без точных привязок (Бурцева, 2015_{1, 2}). Эти и наши данные резко отличаются от положительных значений изотопного состава кислорода нефрита всех зарубежных месторождений, по которым информация опубликована (Gao et al., 2020; Wang, Shi, 2022; Zhang et al., 2023).

Наиболее близки результаты, полученные на месторождении Чхунчхон в Южной Корее (Yui, Kwon, 2002). Месторождение залегает в докембрийских доломитовых мраморах и амфиболовых сланцах, прорванных постколлизийными гранитами. Карбонаты в доломитовом

мраморе и нефрите имеют изотопный состав кислорода $-0.1 \div +18.2\text{‰}$ и $-0.4 \div +3.5\text{‰}$ соответственно. Эти данные согласуются с процессами декарбонизации, обусловленными инфильтрацией флюидов, образующих залежи нефрита в доломитовых мраморах при температуре $330\text{--}430^\circ\text{C}$. Изотопные составы кислорода силикатов однородны и крайне обеднены ^{18}O : тремолит $-9.9 \div -7.9\text{‰}$; диопсид $-13.6 \div -11.5\text{‰}$;grossуляр $-4.4 \div +10.4$ и $+11.5\text{‰}$; клинохлор $-9.5 \div -9.0\text{‰}$; тальк -7.7 и -7.3‰ . Кварц и амфибол амфиболовых сланцев $-4.7 \div +0.5\text{‰}$ и $-8.4 \div -0.6\text{‰}$ соответственно. Предполагается, что образование этого месторождения нефрита произошло после метаморфизма вмещающих пород. Отчетливо отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ также указывают на то, что флюид имел в основном метеорное происхождение и его циркуляция, скорее всего, была связана с внедрением во вмещающую толщу пост-тектонических гранитов. Модельные расчеты показывают, что соотношение флюид/порода было высоким, что изотопный состав кислорода в нефрите в основном амортизировался флюидной фазой (Yui, Kwon, 2002).

В случае Воймаканского месторождения аномально изотопно легкий кислород фиксируется в нефрите, в меньшей мере в кальцит-тремолитовом скарне. Во вмещающем доломите он гораздо более тяжелый, хотя нефрит образовывался фактически по доломиту, то есть доломит не определял изотопный состав нефрита. Для эпидот-тремолитового скарна характерен также более тяжелый изотопный состав кислорода. Вряд ли такой состав может быть связан и с морской водой, содержавшейся в исходных для доломитов и амфиболитов осадках. Океанская вода имеет $\delta^{18}\text{O}$ около нуля. К тому же интенсивно метаморфизованный доломитовый мрамор



Фиг. 8. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) пород Воймаканского месторождения: 1 – нефрит различной окраски, 2 – доломит, 3 – эпидот-тремолитовый скарн, 4 – кальцит-тремолитовый скарн. Интервалы составов по (Vysotskiy et al., 2015).

вряд ли мог содержать морскую воду в достаточном количестве.

Аномально низкий изотопный состав кислорода нефрита также не связан и с гранитами, для которых такие низкие значения не характерны. Гранит — не источник флюида, он не контактирует с нефритовыми телами Воймаканского месторождения непосредственно, в отличие от большинства зарубежных месторождений. Гранит обеспечивает региональный разогрев, при котором были активизированы поровые флюиды, аномально обедненные изотопом ^{18}O .

Таким образом, источник флюида — не доломит, амфиболит, морская вода или гранит. Предположить иной ювенильный источник, кроме как интрузия гранита, затруднительно. В связи с этим высказанное ранее (Бурцева и др., 2015_{1, 2}) предположение, что нефритообразующий флюид имел метеорное происхождение, выглядит убедительно. Аномально легкий изотопный состав кислорода был объяснен (Бурцева и др., 2015_{1, 2}) участием талых поверхностных вод (Высоцкий и др., 2014). Резко отрицательные отношения изотопов кислорода в других случаях объясняются и другими механизмами: кинетическими эффектами (Дубинина и др., 2012) и термодиффузией (Акимова и др., 2017; Лохов и др., 2016).

В работе (Gao et al., 2020), используя ранее полученные данные по изотопному составу кислорода нефрита Витимской провинции (Бурцева и др., 2015_{1, 2}), были проведены расчеты изотопного состава кислорода во флюиде, равновесном при температуре 350°C по уравнению для тремолита. Для нефрита Витимской провинции получен изотопный состав флюида $-19\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$. Если считать основным источником флюида метеорные воды, то они, имеющие по современным измерениям состав $-16 \div -14\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$, явно не достигают значений гипотетического флюида.

Для выяснения причины аномально низкого изотопного состава кислорода нами был проведен эксперимент — разложение кальцита и доломита концентрированной соляной кислотой с последующим измерением изотопного состава воды, образовавшейся в результате реакции. При этом предположено, что изотопный состав воды в составе самой кислоты, который напрямую измерить невозможно, находится в пределах значений изотопного состава воды региона, в котором эта кислота производится: $-16 \div -10\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$ V-SMOW. В результате измерения изотопного состава кислорода воды после реакции как

с кальцитом, так и доломитом, получены значения $-28\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$ V-SMOW. Эти очень низкие значения объяснены нами тем, что при реакции соляной кислоты с карбонатом выделяется CO_2 , в результате изотопного обмена с водой обогащаясь более тяжелым кислородом и выносящаяся из раствора. На этом принципе работают установки по получению CO_2 с утяжеленным изотопным составом кислорода (Третьякова, 2012).

Аналогично происходит удаление углекислоты при метасоматической декарбонатизации доломита с образованием силикатных минералов — форстерита, диопсида, тремолита в процессе образования нефрита. Это и приводит к формированию аномально легкого изотопного состава кислорода нефрита.

Очевидно сочетание метасоматических и метаморфических процессов в формировании и преобразовании нефрита Воймаканского месторождения. Формирование кальцит-тремолитового и эпидот-тремолитового скарнов, а затем и нефрита — метасоматические процессы. Метаморфический стресс вызывал дробление пород, облегчающее проникновение флюида, обеспечил формирование скрытокристаллической спутанно-волокнутой структуры нефрита. Дальнейший регрессивный метаморфизм привел к развитию хлорита и талька, ухудшивших качество нефрита.

Качественные характеристики нефрита Воймаканского месторождения показывают, что он соответствует действующим требованиям по качеству и возможности применения в качестве камнесамоцветного сырья в соответствии с техническими условиями ТУ 41-07-052-90 “Камни цветные природные в сырье” (Технические..., 1990). Отличительная особенность нефрита Воймаканского месторождения — интенсивное замещение хлоритом и, особенно, тальком вплоть до полного оталькования, что значительно ухудшает качество сырья.

ВЫВОДЫ

Аподолмитовый нефрит Воймаканского месторождения образуется на контакте доломитовых мраморов и амфиболитов, образуя обособления в телах кальцит-тремолитовых скарнов. Нефрит соответствует действующим требованиям по качеству и возможности применения в качестве камнесамоцветного сырья. Развито интенсивное замещение хлоритом и, особенно, тальком, что значительно ухудшает качество

сырья. Диопсидит с линзочками, затейливыми прослоями нефрита серого, салатного, светло-бурого цвета может использоваться как камнесамоцветное сырье для резьбы многоцветных изделий или инкрустаций.

Аподоломитовая природа нефрита подтверждена по соотношению Mg и Fe, пониженному содержанию Cr, Ni, Co, повышенному содержанию F и отношению Sr к Ba, характеру распределения РЗЭ. Распределение РЗЭ в нефрите аналогично таковому в аподоломитовом нефрите месторождений Хотана, Алтынтага и Цинхая, определяется составом исходного доломита при заметном влиянии процессов скарнирования амфиболитов. Источник аномально изотопно легкого кислорода нефрита — поровый флюид, вероятно, метеорного происхождения, обедненный $\delta^{18}\text{O}$ в процессе декарбонатизации доломита. Гранит — не источник флюида, он обеспечивает региональный разогрев, активизирующий поровые флюиды, аномально обедненные изотопом ^{18}O .

Очевидно сочетание метасоматических и метаморфических процессов в формировании и преобразовании нефрита Воймаканского месторождения. В формировании и преобразовании нефрита принимали участие как метасоматические, так и метаморфические процессы. Формирование нефрита связано с процессами скарнирования. Тектонические напряжения вызывали дробление пород, облегчающее проникновение флюида, обеспечили формирование скрытокристаллической спутанно-волокнистой структуры нефрита. Дальнейший регрессивный метаморфизм привел к развитию хлорита и талька, ухудшивших качество нефрита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны за предоставленные материалы и информацию ООО “ВВС” и лично С.И. Москва и В.С. Кодочигову, за выполнение анализов Л.В. Митрофановой, Т.Г. Хумаевой, О.В. Корсун, Е.Д. Утиной, М.Г. Егоровой, Д.В. Киселевой, за помощь в оформлении В.Ф. Сотниковой. Замечания и предложения двух рецензентов редакции способствовали значительному улучшению рукописи. Использовано оборудование ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (Екатеринбург) и “Геоспектр” ГИН СО РАН (Улан-Удэ).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Сбор материалов и анализы выполнены за счет средств 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. AAAA-A21-121011390003-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Е.Ю., Козлов Е.Н., Лохов К.И. Происхождение корундовых пород Беломорского подвижного пояса по данным геохимии изотопов благородных газов // Геохимия. 2017. № 11. С. 1015–1026. <https://doi.org/10.7868/S0016752517110024>
- Бурцева М.В., Рупп Г.С., Посохов В.Ф., Зяблицев А.Ю., Мурзинцева А.Е. Источники флюидов, формировавших нефритовые породы южного складчатого обрамления Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 3. С. 324–328. <https://doi.org/10.7868/S0869565215030184>
- Бурцева М.В., Рупп 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. <https://doi.org/10.15372/GiG20150303>
- Высоцкий С.В., Игнатьев А.В., Левицкий В.И., Нечаев В.П., Веливецкая Т.А., Яковенко В.В. Геохимия стабильных изотопов кислорода и водорода корундоносных пород и минералов Северной Карелии как индикатор необычных условий формирования // Геохимия. 2014. № 9. С. 843–853. <https://doi.org/10.7868/S0016752514090106>
- 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.
- Дубинина Е.О., Перчук А.Л., Корепанова О.С. Изотопно-кислородные эффекты при дегидратации глаукофанового сланца: экспериментальные данные при РТ-условиях зоны субдукции // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 534–538.
- Кислов Е.В., Худякова Л.И., Николаев А.Г. Отходы переработки аподоломитового нефрита и направление их использования // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 2. С. 195–206. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>
- Лохов К.И., Прасолов Э.М., Акимов Е.Ю., Лохов Д.К., Бушмин С.А. Изотопно и элементно фракционированные He, Ne и Ar во флюидных включениях минералов метаморфических пород Северной Карелии с аномальным изотопно легким кислородом:

- фракционирование изотопов в эндогенном флюиде по механизму термодиффузии с каскадированием // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2016. № 1. С. 29–47.
- Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. Месторождения нефритов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. 377 с.
- Технические условия ТУ 41-07-052-90. Камни цветные природные в сырье. М.: Кварцсамоцветы, 1990. 28 с.
- Филиппова А.А., Мехоношин А.С., Бычинский В.А., Чудненко К.В. Физико-химические особенности флюидов, сформировавших апогипербазитовые и апокарбонатные нефриты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. С. 168–178. DOI 10.18799/24131830/2021/03/3112
- Adamo I., Bocchio R. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and Update // *Gems and Gemology*. 2013. V. 49. № 2. P. 98–106. <https://doi.org/10.5741/GEMS.49.2.98>
- Bai F., Li G., Lei J., Sun J. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, North-east China // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 115. P. 103171. <https://doi.org/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 Geol. Rev.* 2020. V. 118. P. 103362. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103362>
- Biagioni C., Bosi F., Hålenius U., Pasero M. The crystal structure of svabite, $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{F}$, an arsenate member of the apatite supergroup // *American Mineralogist*. 2016. V. 101, № 8. P. 1750–1755; <https://doi.org/10.2138/am-2016-5636>
- Chen D., Yang Y., Qiao B., Li J., Luo W. Integrated interpretation of pXRF data on ancient nephrite artifacts excavated from Tomb No. 1 in Yuehe Town, Henan Province, China // *Heritage Science*. 2022. V. 10. P. 1. <https://doi.org/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 Geol. Rev.* 2022. V. 141. 104655. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104655>
- Fu W.-l., Lu H., Chai J., Sun Z.-y. Spectroscopic Characteristics of Longxi Nephrite From Sichuan and Its Color Genesis // *Spectroscopy and spectral analysis*. 2023. V. 43. № 5. P. 1408–1412. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2023\)05-1408-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2023)05-1408-05) (In Chinese with English abstract)
- Gao K., Shi G., Wang M., Xie G., Wang J., Zhang X., Fang T., Lei W., Liu Y. The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, northwest China // *Geoscience Frontiers*. 2019. V. 10. № 4. P. 1597–1612. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.10.008>
- Gao S., Bai F., Heide G. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tieli, China // *Ore Geo. Rev.* 2019. V. 107. P. 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.016>
- Gao K., Fang T., Lu T., Lan Y., Zhang Y., Wang Y., Chang Y. Hydrogen and oxygen stable isotope ratios of dolomite-related nephrite: relevance for its geographic origin and geological significance // *Gems and Gemology*. 2020. V. 56. № 2. P. 266–280. <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.56.2.266>
- Gil G., Barnes J.D., Boschi C. Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin // *Canadian Mineralogist*. 2015. V. 53. P. 533–556. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500018>
- Gil G., Bagiński B., Gunia P., Madej S., Sachanbiński M., Jokušauskas P., Belka Z. Comparative Fe and Sr isotope study of nephrite deposits hosted in dolomitic marbles and serpentinites from the Sudetes, SW Poland: Implications for Fe-As-Au-bearing skarn formation and post-obduction evolution of the oceanic lithosphere // *Ore Geo. Rev.* 2020. V. 118. P. 103335. <https://doi.org/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. P. 1049. <https://doi.org/10.3390/min13081049>
- Jiang B., Bai F., Zhao J. Mineralogical and geochemical characteristics of green nephrite from Kutcho, northern British Columbia, Canada // *Lithos*. 2021. V. 388–389. 106030. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106030>
- Jiang T., Shi G., Ye D., Zhang X., Zhang L., Han H. A New Type of White Nephrite from Limestone Replacement along the Kunlun–Altyn Tagh Mountains: A Case from the Mida Deposit, Qiemo County, Xinjiang, China // *Crystals*. 2023. V. 13. P. 1677. <https://doi.org/10.3390/cryst13121677>
- 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. P. 418. <https://doi.org/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 Geol. Rev.* 2022. V. 149. P. 105087. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105087>
- Korybska-Sadłó I., Gil G., Gunia P., Horszowski M., Sitarz M. Raman and FTIR spectra of nephrites from the Złoty Stok and Jordanów Śląski (the Sudetes and Fore-Sudetic Block, SW Poland) // *Journal of Molecular Structure*.

2018. V. 1166. P. 40–47.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.020>
- 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. P. 120012.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2022.04.003>
- 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 Geo. Rev.* 2023₁. V. 160. P. 105604.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105604>
- Li N., Bai F., Peng Q., Liu M.* Geochemical Characteristics of Nephrite from Chuncheon, South Korea: Implications for Geographic Origin Determination of Nephrite from Dolomite-Related Deposits // *Crystals*. 2023₂. V. 13. P. 1468. <https://doi.org/10.3390/cryst13101468>
- Liang H., Shi G., Yuan Y., Cao C., Sun X., Zhang X.* Polysynthetic twinning of diopsides in the Niewang and Tatliksu nephrite deposits, Xinjiang, China // *Minerals*. 2022. V. 12, № 12. P. 1575. <https://doi.org/10.3390/min12121575>
- Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L., Gose J., Wu R.-Y., Wang S.-Q., Liu Y., Tang G.-C., Li X.-H.* Age determination of nephrite by in-situ SIMS U-Pb dating syngenetic titanite: A case study of the nephrite deposit from Luanchuan, Henan, China // *Lithos*. 2015. V. 220–223. P. 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.019>
- Liu Y., Deng J., Shi G.H., Lu T., He H., Ng Y.-N., Shen C., Yang L., Wang Q.* Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China // *Resource Geology*. 2010. V. 60, № 3. P. 249–259. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00135.x>
- Liu Y., Deng J., Shi G., Sun X., Yang L.* Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011₁. V. 42. № 3. P. 440–451. <https://doi.org/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 Geol. Rev.* 2011₂. V. 41. № 1. P. 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.004>
- Liu Y., Zhang R., Zhang Zh., Shi G., Zhang Q., Abuduwayiti M., Liu J.* Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit // *Lithos*. 2015. V. 212–215. P. 128–144.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.002>
- Liu Y., Zhang R.-Q., Abuduwayiti M., Wang C., Zhang S., Shen C., Zhang Z., He M., Zhang Y., Yang X.* SHRIMP U-Pb zircon ages, mineral compositions and geochemistry of placer nephrite in the Yurungkash and Karakash River deposits, West Kunlun, Xinjiang, northwest China: Implication for a Magnesian Skarn // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 72. № 1. P. 699–727. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.023>
- Liu X.-F., Liu Y., Li Z.-J., Maituohuti A., Tian G.-Y., Guo D.-X.* The genesis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pishan brown nephrite bearing Mg-skarn deposit in Xinjiang // *Acta Petrologica et Mineralogica*. 2017. V. 36. № 2. P. 259 Ore Geo 273 (In Chinese with English abstract).
- Liu X., Gil G., Liu Y., He X., Syczewski M., Bagiński B., Fang T., Shu X.* Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China // *Ore Geol. Rev.* 2021. V. 131. P. 103972. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103972>
- Nangeelil K., Dimpfl P., Mamtimin M., Huang S., Sun Z.* Preliminary study on forgery identification of Hetian Jade with Instrumental Neutron Activation Analysis // *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. V. 191. P. 110535. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110535>
- Nichol D.* Two contrasting nephrite jade types // *Journal of Gemmology*. 2000. V. 27. № 4. P. 193–200.
- Sharp Z.D.* A laser-based microanalytical method for the *in situ* determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. P. 1353–1357.
- Siqin B., Qian R., Zhou S.J., Gan F.X., Dong M., Hua Y.F.* Glow discharge mass spectrometry studies on nephrite minerals formed by different metallogenic mechanisms and geological environments // *Int. J. Mass Spectrom.* 2012. V. 309. P. 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2011.10.003>
- Siqin B., Qian R., Zhuo S.J., Gao J., Jin J., Wen Z.Y.* Studies of rare earth elements to distinguish nephrite samples from different deposits using direct current glow discharge mass spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2014. V. 29. P. 2064–2071. <https://doi.org/10.1039/c4ja00172a>
- Su Y., Yang M.* Combining Rare Earth Element Analysis and Chemometric Method to Determine the Geographical Origin of Nephrite // *Minerals*. 2022. V. 12. P. 1399. <https://doi.org/10.3390/min12111399>
- 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. <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
- Vysotskiy S.V., Nechaev V.P., Kissin A.Y., Yakovenko V.V., Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Sutherland F.L., Agoshkov*

- A.I.* Oxygen isotopic composition as an indicator of ruby and sapphire origin: A review of Russian occurrences // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 68. P. 164–170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.018>
- Wang R., Shi X.* Progress on the nephrite sources of jade artifacts in ancient China from the perspective of isotopes // *Front. Earth Sci.* 2022. V. 10. P. 1008387. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1008387>
- Wang L., Lin J.H., Ye T.P., Tan J., Wang B., Yang L.* Discussing the coloration mechanism of Luodian Jade from Guizhou // *Open Access Library Journal.* 2020. V. 7. e6364. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106364>
- Wang W., Liao Z., Zhou Z., Shang J., Li P., Cui D., Li L., Chen Q.* Gemmological and mineralogical characteristics of nephrite from Longxi, Sichuan Province // *J. of Gems and Gemmology.* 2022. V. 24. № 1. P. 20–27. <https://doi.org/10.15964/j.cnki.027jgg.2022.01.003> (In Chinese with English abstract).
- 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 Geol. Rev.* 2022. V. 142. P. 104702. <https://doi.org/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 J. of Geosciences.* 2021. V. 14. P. 204. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06578-6>
- Yin Z., Jiang C., Santosh M., Chen Y., Bao Y., Chen Q.* Nephrite jade from Guangxi province, China // *Gems and Gemmology.* V. 50. № 3. P. 228–235. <https://doi.org/10.5741/GEMS.50.3.228>
- Yu H., Wang R., Guo J., Li J., Yang X.* Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: Insights from spectroscopic and compositional analyses // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences.* 2016₁. V. 111, № 5. P. 313–325. <https://doi.org/10.2465/jmps.151103>
- Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C., Li J.G., Yang X.W.* Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China // *Science China Earth Sciences.* 2016₂. V. 59. P. 1597–1609. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.593>
- 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. <https://doi.org/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 // *J. of Petrology.* 2022₁. V. 63. P. 11. egac117. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac117>
- Zhang X., Feng Y., Zhang Y., Maituohuti A.* Characterization of Yellow-Green Hetian Jade in Qiemo-Ruoqiang, Xinjiang // *Rock and Mineral Analysis.* 2022₂. V. 41. № 4. P. 586–597. <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.20211121018> (In Chinese with English abstract)
- Zhang C., Yang F., Yu X., Liu J., Carranza E.J.M., Chi J., Zhang P.* Spatial-temporal distribution, metallogenic mechanisms and genetic types of nephrite jade deposits in China // *Front. Earth Sci.* 2023. V. 11. P. 1047707. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1047707>
- 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. <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.201807310089> (In Chinese with English abstract)
- Zheng J., Chen L., Zhang C., Liu Y., Tian R., Wu J., Wu Y., Zhang S.* Constraints on Crystallinity of Graphite Inclusions in Nephrite Jade from Xinjiang, Northwest China: Implications for Nephrite Jade Formation Temperatures // *Minerals.* 2023. V. 13. P. 1403. <https://doi.org/10.3390/min13111403>
- Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh.* Black nephrite jade from Guangxi, Southern China // *Gems and Gemmology.* 2019. V. 55, No 2. P. 198–215. <https://doi.org/10.5741/GEMS.55.2.198>

VOIMAKAN DEPOSIT OF DOLOMITE TYPE NEPHRITE, MIDDLE-VITIM MOUNTAIN COUNTRY: FORMATION CONDITIONS

E. V. Kislov^a, I. S. Goncharuk^{a, b}, V. V. Vanteev^a, and Posokhov V. F.^a

^a *N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, 6a Sakhyanova str., Ulan-Ude, 670047 Russia*

^b *D. Banzarov Buryat State University, Institute of Natural Sciences, 24a Smolina str., Ulan-Ude, 670000 Russia*

^{*}*E-mail: evg-kislov@ya.ru*

^{**}*E-mail: goncharukirina993@gmail.com*

^{***}*E-mail: vanteev997@mail.ru*

^{****}*E-mail: vitaf1@yandex.ru*

The Voimakan deposit of dolomite type nephrite has been investigated in order to clarify the features of its formation. 12 samples of nephrite and 5 samples of host rocks were studied. A binocular stereomicroscope, a gemological flashlight and a polarizing petrographic microscope were used. The contents of macro- and micro-components, the isotopic composition of oxygen were determined. Nephrite is light salad, salad, gray-salad and brown (honey). It forms separations in calcite-tremolite skarn bodies at the contact of dolomite marble and amphibolite transformed into epidote-tremolite skarn. The value of $\delta^{18}\text{O}$ of nephrite is $-18.5 \div -18.8\%$; calcite-tremolite skarn -17.4% ; epidote-tremolite skarn $-4.4, 2.6\%$; dolomite 26.1% . Nephrite meets the requirements for gemstone raw materials. Diopside with nephrite lenses and interlayers can be used for carving multicolored products or inlays. The green shade of nephrite increases with an increase in the Fe^{2+} content. The brown color of nephrite is determined by Fe^{3+} in the tremolite structure. The dolomite type of nephrite is confirmed by the ratio of Mg and Fe, a reduced content of Cr, Ni, Co, an increased content of F and the ratio of Sr to Ba, and the nature of the REE distribution. The distribution of REE in nephrite is determined by the composition of the initial dolomite under the influence of epidote-tremolite skarn. The source of abnormally isotopically light oxygen of nephrite is a meteoric fluid depleted in ^{18}O as a result of dolomite decarbonation. Granite only provides regional heating, activating the fluid. Both metasomatic and metamorphic processes were involved in the nephrite formation and transformation. The formation of nephrite is associated with the formation of calcite-tremolite and epidote-tremolite skarns. Tectonic stresses caused the crushing of rocks, facilitating the penetration of fluid, provided the formation of a nephrite cryptocrystalline tangled fibrous structure. But further regressive metamorphism led to the development of chlorite and talc, which worsened the nephrite quality.

Keywords: nephrite, Voimakan deposit, material composition, causes of colore, conditions of origin