



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-4-5>

УДК 552.54:553.08

Минералы Zn в магнезитовых породах мурандавской свиты, Дальний Восток России

Е.А. Рожкова¹, М.О. Ким², И.А. Блинов¹

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; rozhkova95.lena@yandex.ru

²ООО «Русское горно-химическое общество», ул. Павловская 7, г. Москва, 115093 Россия

Статья поступила в редакцию 22.10.2025 г., после доработки 24.11.2025 г., принята к печати 04.12.2025 г.

Аннотация. Статья содержит результаты минералого-петрографического и электронно-микроскопического исследования магнезитовых пород мурандавской свиты (Дальний Восток России). Установлено, что основная часть магнезитовых пород сложена криптозернистым магнезитом, а перекристаллизованные карбонаты в прожилках и линзах представлены доломитом и магнезитом. В перекристаллизованных карбонатах и вблизи них обнаружены собственные минералы Zn – гемиморфит ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), цинксит ($\text{Zn}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) и сфалерит (ZnS). Совместно со сфалеритом отмечены галенит (PbS), кёстерит ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) и не диагностированные сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb и сульфид Pb и Cd, а гемиморфит и цинксит содержат тонкие включения сульфида Hg. Предположительно, гемиморфит и цинксит образовались в результате окисления сфалерита.

Ключевые слова: магнезит, силикаты цинка, сфалерит, мурандавская свита, Малохинганская провинция, Дальний Восток России.

Финансирование. Работа поддержана государственной бюджетной темой № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы благодарят Е.В. Белогуб за консультации и ценные замечания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Е.А. Рожкова – разработка концепции, оптико-микроскопические исследования, сбор информации, написание черновика рукописи, визуализация; М.О. Ким – написание черновика рукописи; И.А. Блинов – электронная микроскопия. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Рожкова Е.А., Ким М.О., Блинов И.А. Минералы Zn в магнезитовых породах мурандавской свиты, Дальний Восток России. *Минералогия*, 2025, 11(4), 78–95. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-4-5>

Zn minerals in magnesite rocks of the Murandavskaya formation, Far East Russia

E.A. Rozhkova¹, M.O. Kim², I.A. Blinov¹

¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region,
456317 Russia; rozhkova95.lena@yandex.ru

²CJSC Russian Mining and Chemical Society, ul. Pavlovskaya 7, Moscow, 115093 Russia

Received 22.10.2025, revised 24.11.2025 accepted 04.12.2025

Abstract. The paper presents the results of mineralogical-petrographic and electron microscopic studies of magnesite rocks of the Murandavskaya Formation (Far East Russia). It is established that the magnesite rocks mainly consist of cryptocrystalline magnesite, whereas recrystallized carbonates in veins and lenses include

dolomite and magnesite. The Zn minerals (hemimorphite $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, zincsilite $\text{Zn}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, and sphalerite ZnS) are found inside and close to recrystallized carbonates. Galena (PbS), k  sterite ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) and unidentified Pb-Fe-Sn-Sb sulfosalt and Pd-Cd sulfide occur together with sphalerite, whereas hemimorphite and zincsilite contain fine inclusions of a Hg sulfide. Hemimorphite and zincsilite most likely formed by oxidation of sphalerite.

Keywords: magnesite, zinc silicates, sphalerite, Murandavskaya Formation, Maly Khingan province, Far East Russia.

Funding. This work was supported by state contract no. 122031600292-6.

Acknowledgments. The authors thank E.V. Belogub for consultations and valuable comments.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest related to the manuscript.

Author contributions. E.A. Rozhkova – conceptualization, optical microscopic studies, data collection, writing the manuscript, visualization; M.O. Kim – writing the manuscript; I.A. Blinov – electron microscopy. All authors approved the final version of the article before publication.

For citation: Rozhkova E.A., Kim M.O., Blinov I.A. Zn minerals in magnesite rocks of the Murandavskaya formation, Far East of Russia. *Mineralogy*, 2025, 11(4), 78–95. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-4-5>.

ВВЕДЕНИЕ

На территории России месторождения магнезита известны на Южном Урале, в Енисейском крае, Восточном Саяне, Забайкалье, а также в Еврейской автономной области на Дальнем Востоке (Малохинганская брусит-магнезитовая провинция). Считается, что они относятся к двум формационным типам – терригенно-карбонатному и ультрамафитовому докембрийского возраста (Методические..., 2007). Малохинганская провинция представляет интерес в связи с выявленными на ее территории Кульдурским и Савкинским гидротермально-метасоматическими месторождениями мономинерального брусита, а также тем, что магнезитоносный комплекс слабометаморфизован и незначительно перекристаллизован, почти полностью сохранил первичные седиментационные текстуры и структуры пород продуктивной толщи, в связи с чем геологи, проводившие геологическое изучение провинции (С.А. Музылев, М.В. Чеботарев, А.И. Шевелев и др.), признавали их осадочное происхождение (Урасина и др., 1993).

В отличие от остальных перекристаллизованных и метасоматически измененных средне- и крупнозернистых отечественных магнезитов, магнезиты мурандавской свиты (Малохинганская провинция), а также Халиловского месторождения в коре выветривания (Оренбургская область) – криптокристаллические и, вероятно, первично осадочные. Обнаруженные в магнезитовых породах мурандавской свиты силикаты Zn не типичны для магнезитовых пород и представляют определенный

генетический интерес. Детальной характеристике обнаруженных фаз и посвящена статья.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА

Все месторождения и проявления магнезита Малохинганской провинции связаны с венд-нижнекембрийской мурандавской свитой ($V-C_1mr$), которая входит в состав хинганской серии, согласно залегает на породах верхнерифейской игинчинской и согласно перекрывается нижнекембрийской лондоковской свитой (рис. 1) (Врублевский и др., 2000; Петрук и др., 2012; Добкин, 2016). Нижняя подсвита мурандавской свиты (Vmr_1) представлена существенно доломитовой толщей (650–750 м), датируемой вендом. В средней части разреза встречаются пачки риолитов (до 110 м). Доломит-магнезитовые породы и магнезиты в виде пластов (до 140 м) и линз (3–60 м) играют заметную роль в существенно доломитовом разрезе подсвиты. Верхняя подсвита мурандавской свиты ($V-C_1mr_2$) мощностью до 900 м отличается от нижней более пестрым составом и представлена углеродисто-кремнистыми, углеродисто-кремнисто-глинистыми и глинисто-серицитовыми сланцами, фтанитами, доломитами, доломитовыми брекчиями, известняками, песчаниками, реже магнетит-гематитовыми, браунит-гематитовыми, родохрозит-гематитовыми рудами и фосфоритами. На границе нижней и верхней толщ иногда наблюдаются седиментационные брекчии, возможно, связанные с проявлениями локального размыва. Общая мощность мурандавской свиты 1300–1650 м.

Отложения хинганской серии (игинчинская, мурандавская, лондоковская свиты, кимканская толща) прорываются раннепалеозойскими интрузиями, которые в основном контролируются зонами крупных разломов. Отложения мурандавской свиты прорываются дайками гнейсовидных роговообманковых гранитов и габбро-гранодиорит-гранитных пород, которые, соответственно, относятся к бибиджанскому и тырмо-буреинскому комплексам, и совместно с породами мурандавской свиты подвержены наложенным структурным преобразованиям (Петрук и др., 2012; Добкин, 2016; Смирнова и др., 2016; Сорокин и др., 2016).

Терригенные, кремнисто-терригенно-карбонатные и кремнисто-терригенные формации венданского кембрия (Байкальский структурный этаж) выполняют Кимканский прогиб. В современном эрозионном срезе отложения прогиба наблюдаются в блоках II порядка, смещенных относительно друг друга Помпеевским разломом, и в останцах кровли палеозойских гранитоидных массивов. Блоки характеризуются сложным складчато-чешуйчатым строением с преобладающим меридиональным простираем складок (Петрук и др., 2012).

Магнезиты образуют различные по размерам линзо- и пластообразные залежи, вытянутые согласно с вмещающими их доломитами. Центральные части залежей сложены однородными, чистыми по химическому составу магнезитами белого цвета с массивной текстурой и скрытокристаллической структурой. Среди однородных магнезитов встречаются участки окварцевания в виде прожилков и гнезд. Периферийные части залежей слагают брекчиевидные и пятнистые магнезиты, представляющие собой плотную породу, где на белом фоне скрытокристаллического магнезита выделяются участки и прожилки серого мелкозернистого доломита. На некоторых проявлениях залежи магнезитов окаймляются тальк-карбонатными породами (Врублевский и др., 2000).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Все исследования выполнены в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс, Россия). Изучено 57 образцов, включая 34 образца доломит-магнезитовых и магнезитовых пород, отобранных на участке развития мурандавской свиты. Оптико-микроскопические исследования в проходящем и отраженном свете выполнены при помощи микро-

скопов ADF U300P и AxioScore A.1. Для уточнения минерального состава пород использован рентгеноструктурный метод (дифрактометр Shimadzu XRD-6000, CuK- α излучение с монохроматором, количественный расчет проведен в программном комплексе SIROQUANT V.2). Отбор материала для рентгеноструктурного анализа произведен в максимально возможной близости от места взятия материала для шлифа.

Микрофотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE) и состав минералов получены при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega3 SBU с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с). Использованные стандарты: диопсид – Ca и Mg для магнезита и доломита; Са – цинксилита; гематит – Fe в карбонатах; галенит – Zn в цинксилите, гемиморфите и карбонатах; оливин – Si в цинксилите и гемиморфите; крокоит – Pb в цинксилите; биотит – K в цинксилите; хлорит – Mg, Si и Fe в тальке; барит – Ba, S в барите; PbS – галенита и Pb и S в сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb; ZnS – сфалерита и Zn в кестерите; касситерит – Sn в кестерите и сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb; халькопирит – Cu в сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb и Cu, Fe и S в кестерите; пирит – Fe и пираргирит – Sb в сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb; металлические Cd и Mn – Cd и Mn.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В пределах изученного участка развиты как осадочные карбонатные породы (доломиты и магнезиты), так и метасоматически измененные (серицитизированные, карбонатизированные, окварцованные) вулканические и субвулканические породы от среднего до основного состава с сохранившимися реликтовыми порфиоровыми структурами, а также биотит-кварц-хлоритовые и карбонат-хлорит-кварцевые сланцы (рис. 2а, б). Широко распространены тальковые и тальк-карбонатные сланцы (рис. 2в, г), карбонат в которых, по данным рентгеноструктурного анализа, представлен преимущественно доломитом с подчиненным содержанием магнезита, редко соотношение доломит/магнезит близко к 1:1.

Песчанистые доломиты, в которых по данным рентгеноструктурного анализа, доломит преобладает над магнезитом в соотношении примерно 3:1, в проходящем свете имеют градиционно-слоистую текстуру и представлены мелко-тонкозернистым агрегатом карбоната с обломками кварца,

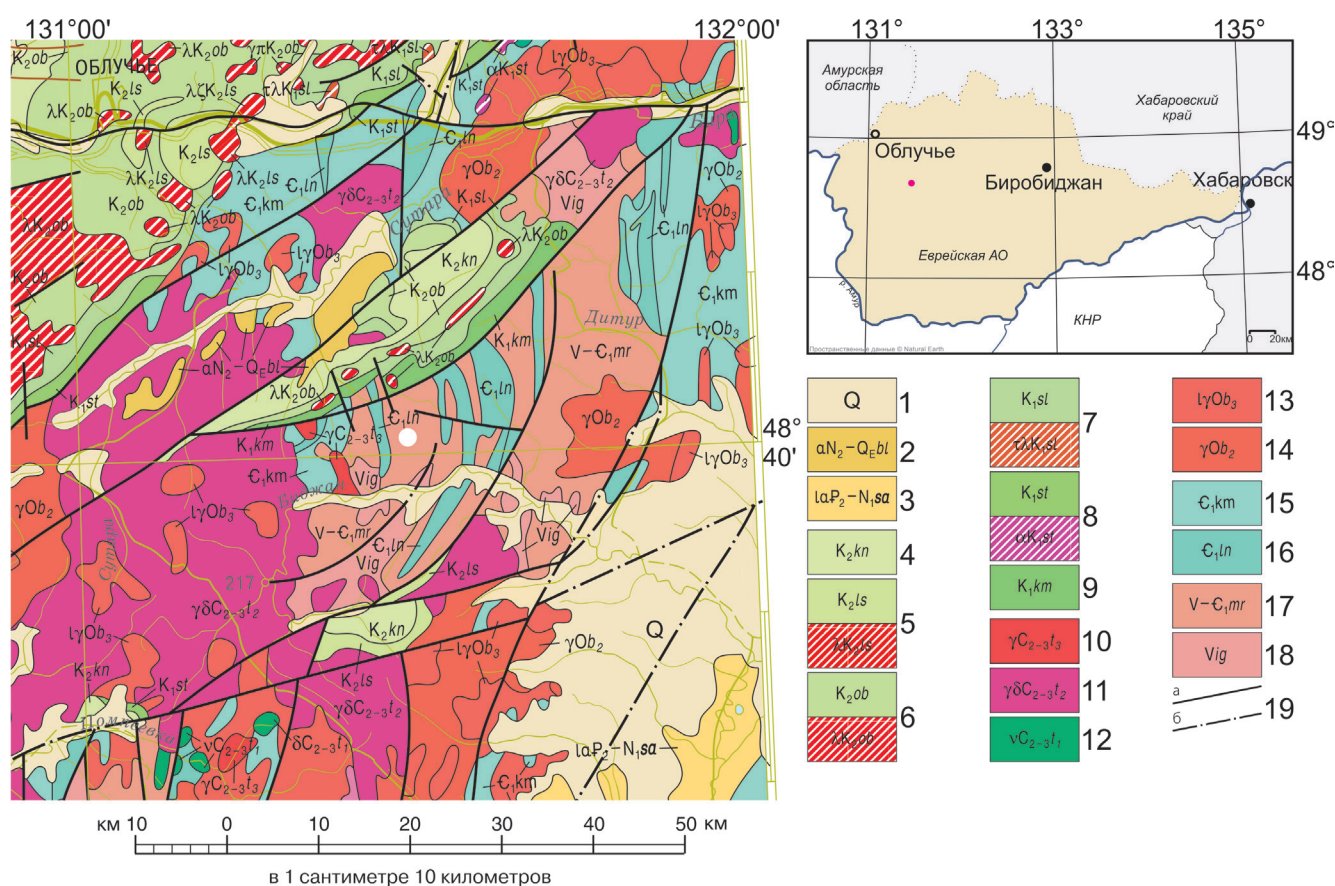


Рис. 1. Фрагмент геологической карты масштаба 1 : 1 000 000 с упрощениями. Лист М-52. Авторы Н.Н. Петрук, Ю.Р. Волкова, ОАО «Амургеология», 2010 г.

1 – четвертичные образования: галечники, гравийники, алевроиты, пески, супеси, суглинки, глины, илы, торфяники, гравийно-галечные и валунно-галечные отложения; 2 – белогорская свита: аллювиальные пески, гравийники, супеси, глины, суглинки; 3 – среднеамурская серия (чернореченская, бирофельдская, головинская и ушумунская свиты): алевроиты, глины, пески, реже гравийники, галечники, бурые угли; 4 – кундурская свита: конгломераты, туфоконгломераты, галечники, гравелиты, песчаники, алевролиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, аргиллиты, туфы, каменные угли; 5 – листовичная свита: риолиты, их туфы, игнимбриты, трахириолиты, туфогенные конгломераты, песчаники, алевролиты, туффиты; субвулканические риолиты и трахириолиты; риодациты ($\lambda\zeta$); 6 – обманйская свита: риолиты, редко трахириолиты и трахириодациты, их туфы, игнимбриты, ксенотуфы; субвулканические риолиты, дацириолиты, их брекчии; гранит-порфиры ($\gamma\pi$); 7 – солонечная свита: туфы и лавы риолитов, трахириолитов, дациты, трахириодациты, игнимбриты риолитов и трахириолитов, туффиты, туфогенные алевролиты, песчаники, конгломераты; субвулканические трахириолиты и риолиты; 8 – станолирская свита: андезиты, их лавобрекчии, туфы и туффиты, андезибазальты, трахибазальты, дациты, туфогенные песчаники, алевролиты, конгломераты; субвулканические андезиты, базальты, андезибазальты; 9 – каменушинская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты, гравелиты, конгломераты, каменные угли; 10–12 – тырмо-буреинский габбро-гранитный комплекс: 10) граниты; 11) гранодиориты; 12) габбро; диориты, габбродиориты (δ); 13, 14 – биробиджанский габбро-гранитный комплекс: 13) лейкограниты, умереннощелочные лейкограниты, аплиты, пегматиты; 14) граниты, гранодиориты, монцониты, кварцевые монцониты, кварцевые сиениты; 15 – кимканская толща: песчаники, алевролиты, глинистые, углеродисто-глинистые и кремнисто-глинистые сланцы, известняки, доломиты, яшмы, фтаниты, железные и марганцевые руды, прослои графитовых и кварцево-слоистых сланцев, прослои и линзы риолитов и их туфов; 16 – лондоковская свита: известняки, доломиты, кремнисто-глинистые и глинистые сланцы, часто углеродистые, фтаниты, фосфориты, прослои и линзы песчаников, алевролитов, кремнистых пород и кварцитов; 17 – мурандавская свита: доломиты, известковистые доломиты, сланцы глинистые, кремнистые, кремнисто-глинистые, песчаники, алевролиты, известняки, мергели, магнезиты, доломит-магнезитовые породы, фтаниты, железные и марганцевые руды, фосфориты, пласты и линзы риолитов и их туфов; 18 – игинчинская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы глинистые, доломиты, известняки; 19 – разрывные нарушения: а – достоверные, б – достоверные, скрытые под более молодыми образованиями. Красной и белой точкой на карте обозначено местоположение объекта исследования.

Fig. 1. Simplified fragment of geological map on a scale of 1 : 1000000. Sheet M-52. Authors N.N. Petruk and Yu.R. Volkova, JSC Amurgeology, 2010.

1 – Quaternary pebble, gravel, silt, sand, sandy loam, loam, clay, silt, peat, gravel-pebble and boulder-pebble deposits; 2 – Belaya Gora Formation: alluvial sand, gravel, sandy loam, clay, loam; 3 – Middle Amur Group (Chernaya Rechka, Birofeld, Golovinskaya and Ushumun formations): silt, clay, sand, less common gravel, pebble, brown coal; 4 – Kundur Formation: conglomerate, tuff conglomerate, pebble, gravelite, sandstone, siltstone, tuff sandstone, tuff siltstone, mudstone, tuff, coal; 5 – Listvenichnaya Formation: rhyolite, their tuff, ignimbrite, trachyrhyolite, tuffaceous conglomerate, sandstone, siltstone, tuffite; subvolcanic rhyolite and trachyrhyolite; rhyodacites ($\lambda\zeta$); 6 – Obmaniy Formation: rhyolite, rarely trachyrhyolite and trachyrhyodacite, their tuff, ignimbrite, xenotuff; subvolcanic rhyolite, dacryolite and their breccias; granite porphyry ($\gamma\pi$); 7 – Solonechnaya Formation: tuff and lavas of rhyolite, trachyrhyolite, dacite, trachyrhyodacite, ignimbrite of rhyolite and trachyrhyolite, tuffite, tuffaceous siltstone, sandstone, conglomerate; subvolcanic trachyrhyolite and rhyolite; 8 – Stanolirskaya Formation: andesite, their lava breccia, tuff and tuffite, basaltic andesite, trachybasalt, dacite, tuffaceous sandstone, siltstone, conglomerate; subvolcanic andesite, basalt, basaltic andesite; 9 – Kamenushinskaya Formation: sandstone, siltstone, mudstone, gravelite, conglomerate, coal; 10–12 – Tyrmo-Bureya gabbro-granite complex: 10) granite; 11) granodiorite; 12) gabbro; diorite, gabbrodiorite (δ); 13, 14 – Birobidzhan gabbro-granite complex: 13) leucogranite, moderately alkali leucogranite, aplite, pegmatite; 14) granite, granodiorite, monzonite, quartz monzonite, quartz syenite; 15 – Kimkan Sequence: sandstone, siltstone, clayey shale, carbonaceous-clayey shale, siliceous-clayey shale, limestone, dolomite, jasper, chert, iron and manganese ores, interbeds of graphite and quartz-mica shales, interbeds and lenses of rhyolite and their tuff; 16 – Londokovskaya Formation: limestone dolomite, siliceous-clayey and clayey shale (often carbonaceous), chert, phosphorite, interbeds and lenses of sandstone, siltstone, siliceous rock and quartzite; 17 – Murandavskaya Formation: dolomite, calcareous dolomite, clayey shale, siliceous shale, siliceous-clayey shale, sandstone, siltstone, limestone, marls, magnesite, dolomite-magnesite rocks, chert, iron and manganese ores, phosphorite, beds and lenses of rhyolite and their tuff; 18 – Iginchin Formation: sandstone, siltstone, mudstones, clay shale, dolomite, limestone; 19 – faults: a – proven; б – proven but hidden under younger rocks. Red and white dots indicate the position of the studied object.

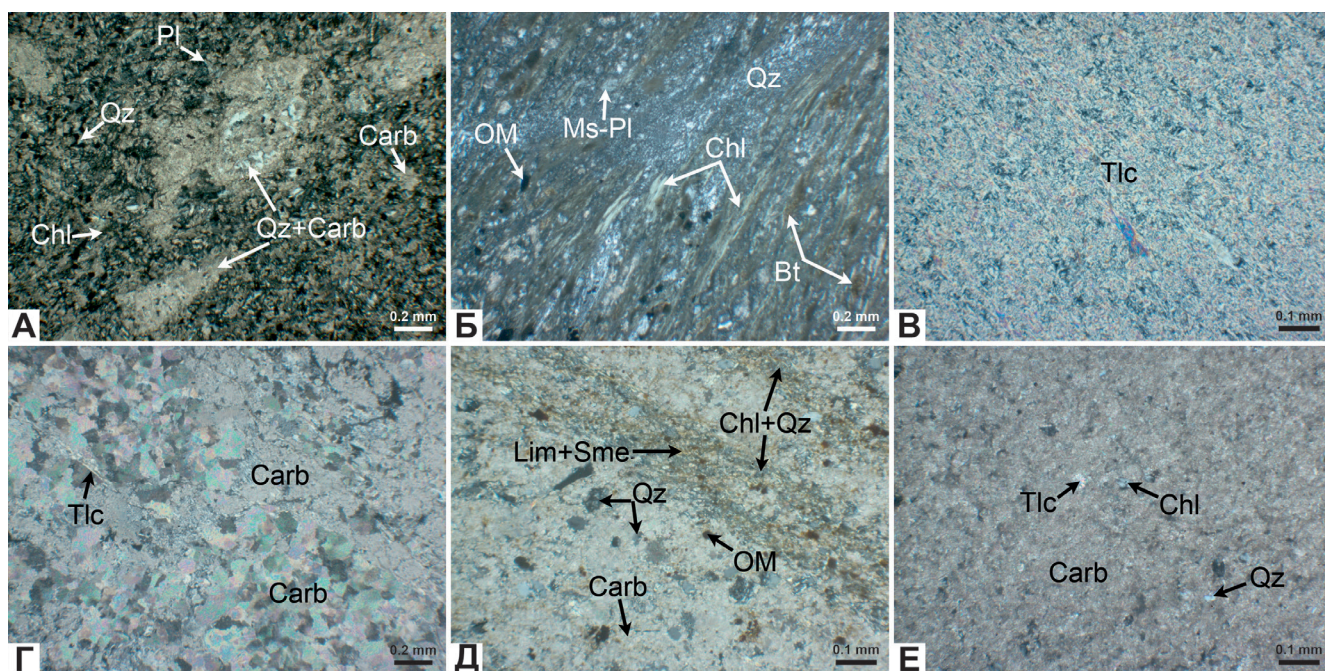


Рис. 2. Метасоматические (А–Г) и осадочные (Д, Е) доломитовые породы: А – кварц-хлорит-карбонатный метасоматит по субвулканической породе основного (?) состава; Б – биотит-кварц-хлоритовый сланец; В – тальковый сланец; Г – тальк-карбонатный метасоматит; Д – песчаный доломит; Е – доломитовая порода.

Проходящий свет с анализатором. Здесь и далее: Carb – карбонат; Qz – кварц; Pl – плагиоклаз; Bt – биотит; Chl – хлорит; Tlc – тальк; Ms – мусковит; Sme – глинистый минерал; Lim – гидроксиды Fe; OM – рудный минерал.

Fig. 2. Metasomatic (A – Г) and sedimentary (Д, Е) dolomite rocks: А – quartz-chlorite-carbonate metasomatite after mafic subvolcanic rock; Б – biotite-quartz-chlorite schist; В – talc schist; Г – talc-carbonate metasomatite; Д – sandy dolomite; Е – dolomite rock.

Transmitted light with analyzer. Hereinafter: Carb – carbonate; Qz – quartz; Pl – plagioclase; Bt – biotite; Chl – chlorite; Tlc – talc; Ms – muscovite; Sme – clay mineral; Lim – Fe hydroxides; OM – ore mineral.

чешуйками серицита и хлорита с прослоями из кварца и смектита (рис. 2д).

Доломитовые и магнезит-доломитовые породы серого и темно-серого цвета характеризуются пятнистой текстурой (рис. 3а). По данным рентгеноструктурного анализа в этих породах доломит либо существенно преобладает над магнезитом, либо находится с ним в соотношении ~1:1. В проходящем свете породы имеют крипто-тонкозернистую до мелкозернистой структуры, состоят из агрегата карбонатов с включениями кварца, талька, хлорита и рудного минерала и рассекаются прожилками и просечками гранозернистого карбоната и кварца, иногда с тальком и хлоритом (рис. 2е).

Магнезитовые и доломит-магнезитовые породы белого, редко сероватого или желтоватого цвета характеризуются плотной текстурой и криптозернистой структурой. По данным рентгеноструктурного анализа в этих породах магнезит преобладает над доломитом. Порода часто содержит гнезда и рассекается прожилками тонко-мелкозернистого гранозернистого кварца и карбонатов (магнезит и доломит). Иногда интенсивное прожилкование придает породе брекчиевидную текстуру (рис. 3б–д).

Содержания элементов-примесей в магнезитовых породах незначительное, близкое к кларковому, характерному для земной коры.

В проходящем свете магнезитовые и доломит-магнезитовые породы имеют массивную текстуру, иногда пятнистую и полосчатую микротекстуру, представлены криптозернистым агрегатом карбоната, в котором иногда наблюдаются включения тонкозернистого карбоната, изометричных зерен и кристаллов кварца, призматических и игольчатых кристаллов талька (рис. 4а). Кристаллы кварца часто имеют гексагональные сечения и содержат включения криптозернистого карбоната. Иногда в основной массе криптозернистого карбоната наблюдаются трещины (похожие на трещины усыхания), выполненные криптозернистым карбонатом, возможно, с примесью глинистого минерала (рис. 4б). В некоторых образцах отмечены округлые, вытянутые, дугообразные и сложной формы агрегаты тонкозернистого карбоната (рис. 4в), предположительно, псевдоморфозы по органическим остаткам. Породы часто пересекаются тонкими карбонатными, реже кварцевыми просечками, встречаются прожилки и линзы перекристаллизованного гранозернистого и гребенчатого карбоната, часто с кварцем, редко в прожилках отмечен тальк (рис. 4).

В трех образцах магнезитовых пород обнаружены силикаты Zn, которые образуют рассеянную вкрапленность зерен с треугольным и ромбовидным сечением размером 0.02–0.15 мм в криптозернистой массе и прожилках перекристаллизованных карбонатов и кварца (рис. 4д–ж). Еще в одном образце в криптозернистой массе присутствует рассеянная вкрапленность сфалерита, а прожилки и гнезда перекристаллизованных карбонатов содержат сфалерит и галенит (рис. 4з).

С помощью СЭМ изучены образец с силикатами Zn (обр. № 1) и образец с галенит-сфалеритовой минерализацией (обр. № 2). В обоих образцах криптозернистый карбонат представлен магнезитом, а перекристаллизованные карбонаты, слагающие прожилки, гнезда и линзы – магнезитом и доломитом (рис. 5, 6). В химическом составе криптозернистого магнезита из обр. № 1 отмечена незначительная примесь Ca, тогда как перекристаллизованный магнезит содержит Mn и Fe (табл. 1). Помимо Ca в составе криптозернистого магнезита из обр. № 2 присутствуют также Mn и Zn, обнаруженные и в перекристаллизованном магнезите (табл. 1). Касситерит отмечен в виде единичного включения в криптозернистом магнезите в обр. № 1.

Перекристаллизованный доломит в обр. № 1 содержит Mn, Sr, Zn, Cd и Pb, тогда как доломит в обр. № 2 отличается чистым составом (табл. 2). В образце № 1 в доломите обнаружено включение барита, в составе которого присутствует Sr (2.80 мас. % SrO) и Ca (1.58 мас. % CaO).

Силикаты Zn в обр. № 1 представлены гемиморфитом (водный диоритосиликат $Zn \cdot Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$) и цинксилитом (слоистый силикат Zn из группы смектита $Zn_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$). Гемиморфит встречается в прожилках и просечках перекристаллизованных магнезита и доломита, редко образует вкрапленность в криптозернистом магнезите (рис. 5а, д, е). В гемиморфите отмечены тонкие включения сфалерита, галенита и сульфида Hg. Состав гемиморфита не имеет примесей (табл. 3).

Цинксилит образует рассеянную вкрапленность в криптозернистом магнезите вблизи прожилков и гнезд перекристаллизованных карбонатов и содержит включения сульфида Hg (рис. 5а, б, ж–и). В составе цинксилита присутствуют примеси Pb, Ca, Mg, K и S, аналитическая сумма характеризуется дефицитом, что, по-видимому, связано как с рыхлой структурой самого минерала, так и с подсветкой вмещающих карбонатов и реликтовых сульфидов (табл. 4).

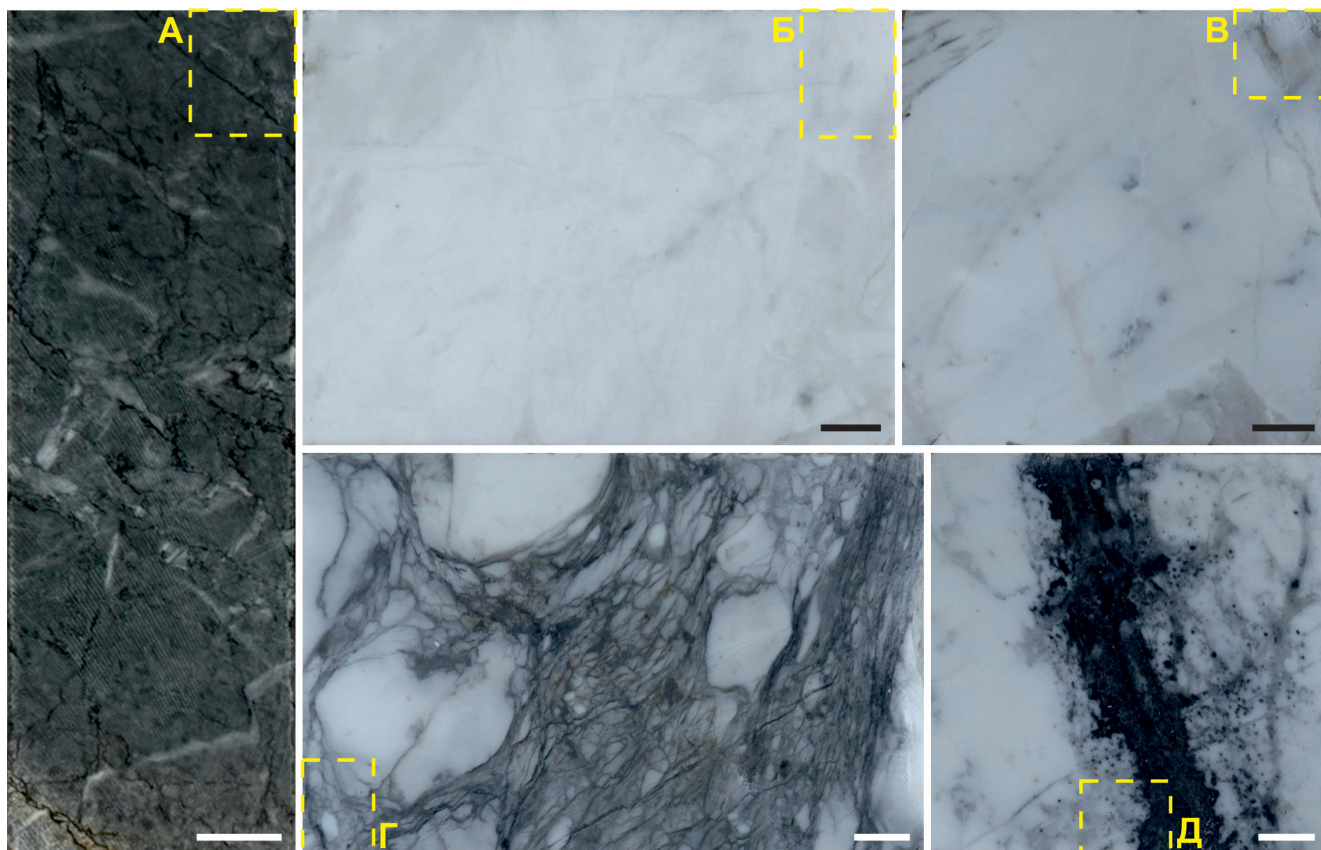


Рис. 3. Структуры изученных карбонатных пород: А – доломитовая порода с тонкозернистой структурой и прожилками мелкозернистого карбоната; Б–Д – магнезитовые породы: Б – массивная магнезитовая порода с криптозернистой структурой и редкими включениями и просечками доломита и кварца; В – массивная магнезитовая порода с криптозернистой структурой и включениями доломита (обр. № 1); Г – брекчиевидная магнезитовая порода; Д – магнезитовая порода с криптозернистой структурой и прожилком и тонкой вкрапленностью сфалерита (обр. № 2). Желтый контур – место взятия материала для шлифов. Масштаб 1 см.

Fig. 3. Structures of the studied carbonate rocks: А – dolomite rock; Б–Д – magnesite rocks: Б – massive magnesite rock with cryptocrystalline structure and rare dolomite and quartz inclusions and veinlets; В – massive magnesite rock with cryptocrystalline structure and dolomite inclusions (sample no. 1); Г – brecciated magnesite rock; Д – magnesite rock with cryptocrystalline structure and sphalerite veinlet and fine dissemination (sample no. 2).

Yellow contour indicates a sampling place for thin sections. Scale bar is 1 cm.

В перекристаллизованном магнезите из обр. № 1 отмечены единичные включения галенита размером до 3 мкм и сфалерита размером до 13 мкм, содержащего тонкое включение не установленного сульфида Pb и Cd (рис. 5г, д).

В образце № 2 сфалерит размером от 5.0 мкм до 2.5 мм образует гнезда и прожилки в перекристаллизованном магнезите, сростается с галенитом и сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb и содержит включения и вроски кёстерита размером 1–30 мкм (рис. 6). Редко сфалерит отмечен в виде вкрапленности размером 30–150 мкм в криптозернистом магнезите (рис. 6а, б). В отличие от сфалерита агрегаты га-

ленита размером от 5.0 мкм до 1.8 мм встречаются только в перекристаллизованном магнезите, также выполняют интерстиции и сростаются со сфалеритом и сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb (рис. 6а, в–ж). Последняя отмечена в виде сростаний до 10 мкм со сфалеритом и галенитом, слагающих прожилков с перекристаллизованным магнезитом (рис. 6г, д, ж).

В обоих образцах в составе сфалерита отмечен Cd, в кёстерите – Fe (табл. 5). Состав сульфосолей Pb-Fe-Sn-Sb не рассчитывается на известные минеральные виды, но наиболее близок к франкеиту (табл. 6).

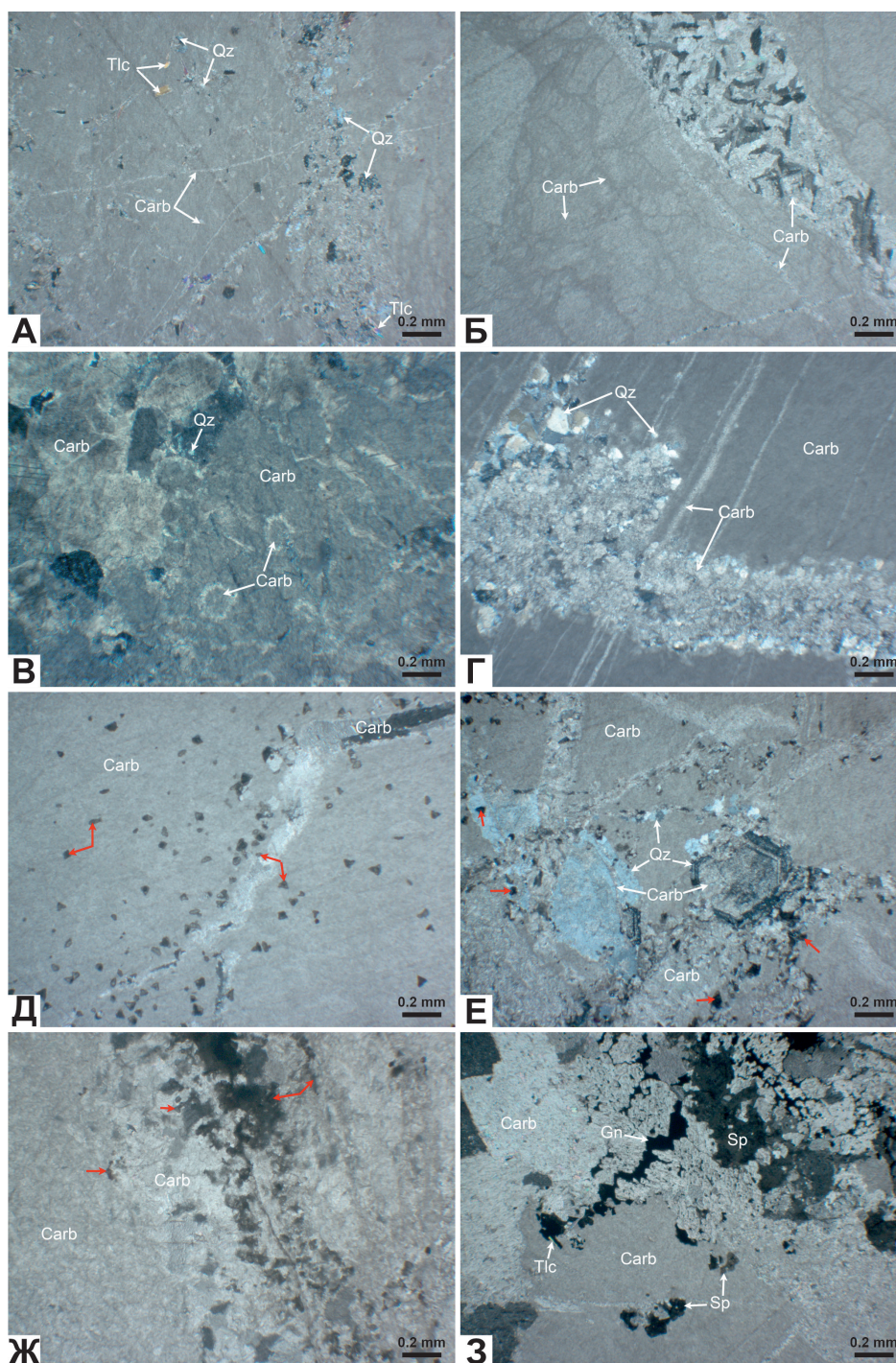


Рис. 4. Породообразующие и акцессорные минералы магнезитовых и доломит-магнезитовых пород: А – криптозернистый карбонат с включениями талька, кварца и тонкозернистого карбоната с карбонатным прожилком и просечками с тальком и кварцем; Б – трещиноватый криптозернистый карбонат с прожилками гребенчатого и тонкозернистого карбоната; В – округлые агрегаты тонкозернистого карбоната в криптозернистом карбонате с прожилком гранозернистого карбоната с кварцем; Г – прожилки и просечки карбоната и кварца в криптозернистом карбонате; Д – рассеянная вкрапленность силикатов Zn (стрелки) в криптозернистом карбонате вблизи прожилка гранозернистого карбоната; Е – вкрапленность силикатов Zn (стрелки) в криптозернистом карбонате и прожилках гранозернистого карбоната и гексагонального кварца; Ж – прожилок гранозернистого карбоната с вкрапленностью силикатов Zn (стрелки) в криптозернистом карбонате; З – прожилок гранозернистого карбоната с галенитом, сфалеритом и тальком в криптозернистом карбонате с вкрапленностью сфалерита.

Проходящий свет с анализатором. Sp – сфалерит, Gn – галенит.

Fig. 4. Rock-forming and accessory minerals of magnesite and dolomite-magnesite rocks: А – cryptogranular carbonate with inclusions of talc, quartz and fine-grained carbonate and carbonate veinlets with talc and quartz; Б – fractured cryptogranular carbonate with veinlets of comb and fine-grained carbonate; В – rounded aggregates of fine-grained carbonate in cryptogranular carbonate with vein of granular carbonate and quartz; Г – carbonate and quartz veins in cryptogranular carbonate; Д – dissemination of Zn silicates (arrows) in cryptogranular carbonate near the granogranular carbonate vein; Е – dissemination of Zn silicate (arrows) in cryptogranular carbonate and veinlets of granogranular carbonate and hexagonal quartz; Ж – granular carbonate vein with Zn silicates (arrows) in cryptogranular carbonate; 3 – granular carbonate vein with galena, sphalerite and talc in cryptogranular carbonate with sphalerite inclusions.

Transmitted light with analyzer. Sp – sphalerite, Gn – galena.

Таблица 1. Состав магнезита Мурандавской свиты (мас. %)

Table 1. Composition of magnesite of the Murandavskaya Formation (wt. %)

№ п/п	№ обр.	№ ан.	MgO	CaO	MnO	ZnO	FeO	CO ₂ *	Сумма**	Формулы
Криптозернистый магнезит										
1	1	24540f	46.32	0.84	—	—	—	51.24	98.38	(Mg _{0.99} Ca _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
2		24540i	46.80	0.53	—	—	—	51.52	98.84	(Mg _{0.99} Ca _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
3		24540n	47.17	0.39	—	—	—	51.81	99.37	(Mg _{0.99} Ca _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
4		25547a	46.68	0.54	—	—	—	51.39	98.60	(Mg _{0.99} Ca _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
5	2	24541c	46.40	0.17	0.48	—	—	51.10	98.16	(Mg _{0.992} Mn _{0.006} Ca _{0.003}) _{1.001} CO _{3.00}
6		24541f	46.63	—	0.44	0.40	—	51.41	98.89	(Mg _{0.990} Mn _{0.005} Zn _{0.004}) _{0.999} CO _{3.00}
7		25548b	47.86	—	—	—	—	52.26	100.12	Mg _{1.00} CO _{3.00}
Кристаллически-зернистый магнезит										
8	1	24540b	40.03	—	6.52	—	0.63	48.14	95.32	(Mg _{0.91} Mn _{0.08} Fe _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
9		24540c	42.67	—	4.16	—	0.52	49.49	96.84	(Mg _{0.94} Mn _{0.05} Fe _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
10		25547b	46.16	—	1.44	—	—	51.30	98.90	(Mg _{0.98} Mn _{0.02}) _{1.00} CO _{3.00}
11		25547c	44.11	—	2.65	—	0.53	50.13	97.43	(Mg _{0.96} Mn _{0.03} Fe _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
12		25547o	46.32	—	0.83	—	—	51.09	98.24	(Mg _{0.99} Mn _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
13	2	24541h	46.00	—	1.14	—	—	50.94	98.08	(Mg _{0.99} Mn _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}
14		24541e	46.92	—	—	0.68	—	51.61	99.21	(Mg _{0.99} Zn _{0.01}) _{1.00} CO _{3.00}

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – содержание CO₂ рассчитано по стехиометрии; ** – сумма анализа с учетом расчетного содержания CO₂; прочерк – не установлено. Формулы рассчитаны на сумму катионов (Mg + Ca + Mn + Zn + Fe) = 1.

Note. Here and in Table 2: * – the CO₂ content is calculated by stoichiometry; ** – analytical sum takes into account the calculated CO₂ content; dash – not determined. Formulas are calculated on the basis of cation sum (Mg + Ca + Mn + Zn + Fe) = 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Акцессорные минералы в магнезитовых породах

В магнезитовых и доломитовых породах известных месторождений России и Китая в виде акцессорных минералов присутствуют другие карбонаты, кварц, слоистые силикаты (хлорит, тальк, гидрослюда), пирит, органическое вещество в форме шунгита или графита (табл. 7). Для некоторых месторождений характерны специфические минералы, связанные с наложенными процессами кон-

тактового или регионального метаморфизма, например, амфибол, биотит, брусит, серпентин, апатит, палыгорскит, сфалерит, барит.

В изученных магнезитовых породах мурандавской свиты акцессорные минералы представлены кварцем, тальком и глинистыми минералами, а хлорит присутствует в магнезит-доломитовых породах. Собственные минеральные формы Zn, Pb и Sn, такие как водные силикаты Zn, сфалерит, галенит, кестерит, сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb, касситерит и сульфид Hg, на других месторождениях и проявлениях магнезита России не описаны, за исключением редких находок сфалерита в магнезитах,

Таблица 2. Состав перекристаллизованного доломита Мурандавской свиты (мас. %)

Table 2. Composition of recrystallized dolomite of the Murandavskaya Formation (wt. %)

№ п/п	№ обр.	№ ан.	MgO	CaO	MnO	ZnO	SrO	CdO	PbO	CO ₂ *	Сумма**
1	1	24540a	(Ca _{1.01} Mg _{0.94} Mn _{0.05}) _{2.00} (CO _{3.00}) _{2.00}								
20.30			30.27	2.08					47.21	99.87	
2		24540h	(Ca _{1.03} Mg _{0.97} Sr _{0.004}) _{2.004} (CO _{3.00}) _{2.00}								
21.31			31.40			0.22			48.00	100.93	
3		24540k	(Ca _{1.08} Mg _{0.85} Zn _{0.02} Pb _{0.02} Cd _{0.02} Sr _{0.01}) _{2.00} (CO _{3.00}) _{2.00}								
17.10			30.40		0.90	0.57	1.35	2.10	44.15	96.58	
4		24540l	(Mg _{0.99} Ca _{0.98} Mn _{0.01} Sr _{0.01}) _{1.99} (CO _{3.00}) _{2.00}								
21.71			30.00	0.50		0.61			47.82	100.64	
5		24540m	(Ca _{1.03} Mg _{0.96} Mn _{0.01}) _{2.00} (CO _{3.00}) _{2.00}								
20.87			31.07	0.39					47.41	99.75	
6	25547d	(Ca _{1.03} Mg _{0.97}) _{2.00} (CO _{3.00}) _{2.00}									
20.87		30.91						47.05	98.83		
7	25547q	(Ca _{1.02} Mg _{0.98}) _{2.00} (CO _{3.00}) _{2.00}									
21.05		30.37						46.82	98.24		
8	2	24541b	(Ca _{1.03} Mg _{0.97}) _{2.00} (CO _{3.00}) _{2.00}								
21.20	31.45							47.83	100.48		

Примечание. Формулы рассчитаны на сумму катионов (Ca + Mg + Sr...) = 2.

Note. Formulas are calculated on the basis of cation sum (Ca + Mg + Sr...) = 2.

обогащенных углеродисто-хлоритовой примесью (Бочаров и др., 2001), и в доломитовых породах Саткинского месторождения.

Силикаты Zn в магнезитовых породах

Гемиморфит $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ является типичным минералом кор выветривания свинцово-цинковых месторождений, ассоциирующих с карбонатными толщами в Восточном Забайкалье (Кличинское, Тайнинское и др.), Казахстане (Акжал, Кызыл-Эспе, Гулышад, Шаймерден), Восточных Альпах (Райбл, Блайберг) (Дубинина, Корнилович, 1962; Ивлев, 2007; Паленова, 2008; Бетехтин, 2008; Белогуб, 2009). Известны псевдоморфозы гемиморфита по смитсониту, кальциту, доломиту, флюориту, пироморфиту, галениту и другим минералам.

На полиметаллических месторождениях Восточного Забайкалья наиболее распространенными минералами Zn в зоне окисления являются карбонаты (монгеймит $(Zn,Fe)CO_3$, смитсонит $ZnCO_3$), гемиморфит и реже соконит $Na_{0.3}Zn_3((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2 \cdot 4H_2O$ (Дубинина, Корнилович, 1962). Гемиморфит является одним из наиболее поздних ми-

нералов Zn в зоне окисления. На поздних стадиях окисления наблюдается замещение гемиморфита соконитом. На Южном Урале гемиморфит упоминается в списке минералов зон окисления Гайского и Яман-Касинского колчеданных месторождений (Белогуб, 2009).

На месторождении Шаймерден в Казахстане описан гемиморфит-смтсонитовый тип руд (Ивлев, 2007; Паленова, 2008; Белогуб, 2009). Гемиморфит в рудах развивается по обломкам глинизированных вулканических пород и цементирующей их массе. Считается, что имело место инфильтрационное накопление Zn, принесенного поверхностными и подземными водами из окисленной части неизвестного свинцово-цинкового проявления, расположенного рядом с месторождением.

Цинксилит $Zn_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ является крайним членом в изоморфном ряду Mg–Zn монтмориллонит – соконит – цинксилит и впервые был найден в 1954 г. в виде псевдоморфозы по диопсиду в выветрелом диопсид-гранатовом скальне с халькопирит-галенит-сфалеритовой минерализацией полиметаллического месторождения Батыстау (Центральный Казахстан) (Яхонтова и др., 1977).

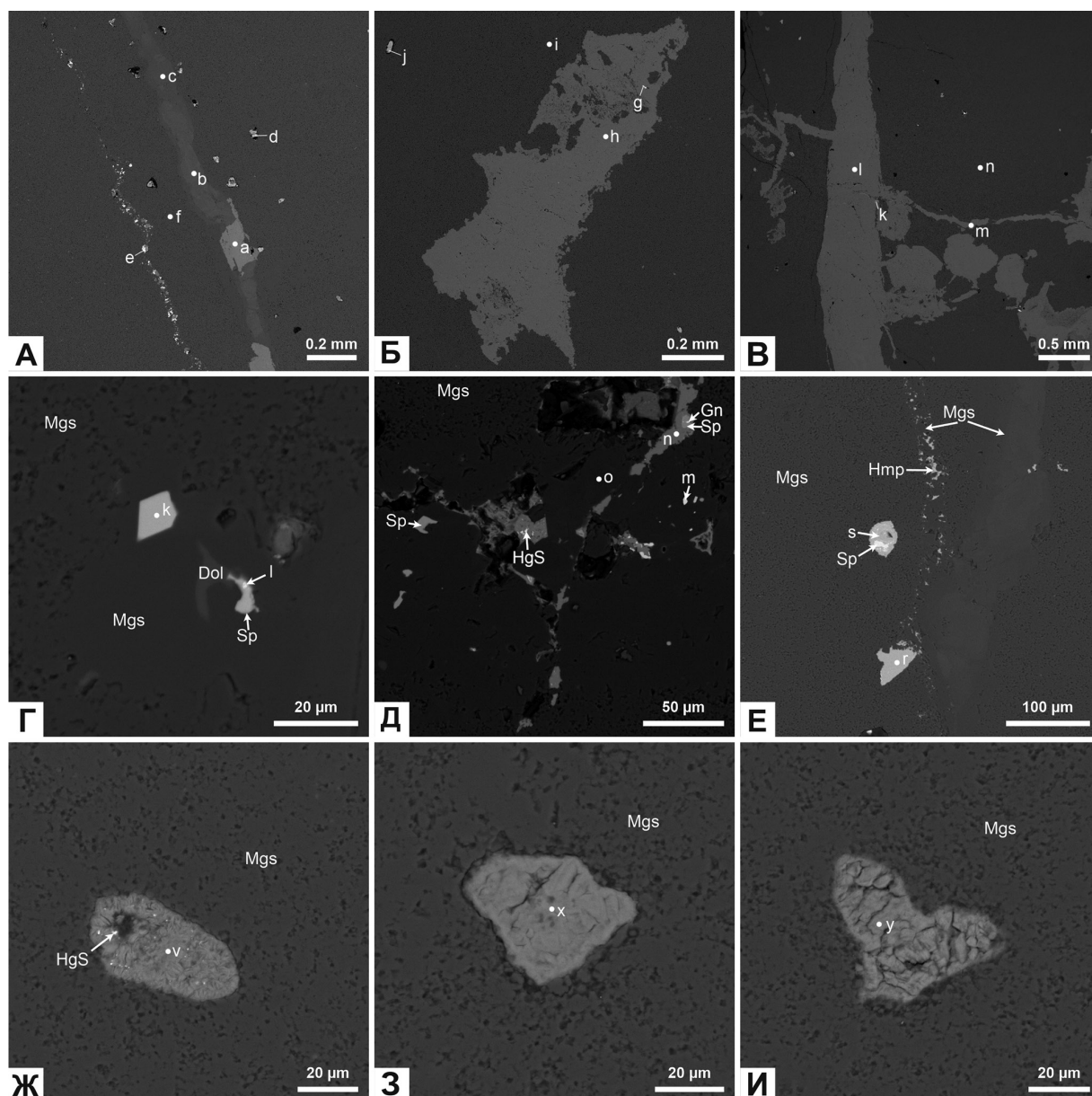


Рис. 5. Морфология породообразующих и акцессорных минералов в магнезите (обр. № 1): А – прожилки магнезита (точки b, c) и доломита (точка a) с гемиморфитом (точка e) в основной массе криптозернистого магнезита (точка f) с вкрапленностью цинксилита (точка d); Б – гнездо доломита (точка h) с включением барита (точка g) в криптозернистом магнезите (точка i) с включением цинксилита (точка j); В – прожилки доломита (точки k, l, m) в криптозернистом магнезите (точка n); Г – гнездо перекристаллизованного магнезита (Mgs) с включениями доломита (Dol) и сфалерита (точка k), содержащего тонкое включение не установленного сульфида Pb и Cd (точка l); Д – перекристаллизованный магнезит (точка o) с включениями сфалерита и галенита (точка m) с просечками гемиморфита (точка n) с включениями галенита, сфалерита и сульфида ртути (HgS); Е – прожилки магнезита с гемиморфитом (Hmp, точка r) в криптозернистом магнезите с вкрапленностью гемиморфита (точка s) с тонким включением сфалерита; Ж–И – вкрапленность цинксилита (точки v, x, y) с тонкими включениями сульфида ртути в криптозернистом магнезите. BSE фото.

Fig. 5. Morphology of rock-forming and accessory minerals in magnesite (sample no. 1): A – magnesite (points b, c) and dolomite (point a) veinlets with hemimorphite (point e) in cryptogranular magnesite (point f) with zincsilite inclusions (point d); Б – dolomite (point h) with barite inclusion (point g) in cryptogranular magnesite (point i) with zincsilite inclusion (point j); В – dolomite veinlets (points k, l, m) in cryptogranular magnesite (point n); Г – recrystallized magnesite (Mgs) with inclusions of dolomite (Dol) and sphalerite (point k, Sp), which contains a fine inclusion of an unidentified Pb–Cd sulfide

(point l); Д – recrystallized magnesite (point o) with sphalerite and galena (point m) inclusions cut by hemimorphite veinlet (point n) with galena, sphalerite and Hg sulfide (HgS) inclusions; E – magnesite veinlets with hemimorphite (Hmp, point r) in cryptogranular magnesite also with hemimorphite (point s) and fine sphalerite inclusion; Ж–И – dissemination of zinsilite (points v, x, y) with fine Hg sulfide inclusions in cryptogranular magnesite.

BSE images.

Таблица 3. Состав гемиморфита (мас. %)

Table 3. Composition of hemimorphite (wt. %)

№ п/п	№ ан.	SiO ₂	ZnO	H ₂ O*	Сумма**	Формулы
1	24540e	26.45	66.07	7.62	100.15	Zn _{3.84} Si _{2.08} O ₇ (OH) ₂ · H ₂ O
2	25547n	24.22	67.21	7.35	98.77	Zn _{4.05} Si _{1.98} O ₇ (OH) ₂ · H ₂ O
3	25547p	24.92	66.53	7.42	98.87	Zn _{3.97} Si _{2.01} O ₇ (OH) ₂ · H ₂ O
4	25547r	25.63	66.86	7.54	100.03	Zn _{3.92} Si _{2.04} O ₇ (OH) ₂ · H ₂ O
5	25547s	24.42	68.19	7.43	100.04	Zn _{4.06} Si _{1.97} O ₇ (OH) ₂ · H ₂ O

Примечание. * – рассчитано по стехиометрии гемиморфита; ** – сумма анализа с учетом расчетной воды. Формулы рассчитаны на сумму зарядов Zn+Si = 16.

Note. * – calculated from stoichiometry of hemimorphite; ** – analytical sum takes into account the calculated water content. Formulas are calculated on the basis of the charge sum Zn+Si = 16.

Таблица 4. Состав цинксилита (мас. %)

Table 4. Composition of zinsilite (wt. %)

№ п/п	№ ан.	MgO	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	ZnO	PbO	Сумма	OH*	H ₂ O*	Сумма**
1	24540d		37.46	–	–	0.08	38.28	0.67	76.49	5.30	11.23	93.02
2	24540j	3.49	36.97	–	–	–	37.34	0.48	78.28	5.23	11.08	94.60
3	25547e	5.43	39.31	–	–	–	33.59	–	78.33	5.56	11.79	95.68
4	25547h	6.20	41.39	–	–	–	32.72	–	80.31	5.86	12.41	98.58
5	25547t	3.44	36.90	–	–	–	36.56	1.08	77.98	5.22	11.06	94.27
6	25547u	4.90	34.64	–	0.20	0.13	30.52	–	70.38	4.90	10.39	85.67
7	25547v	5.94	38.90	–	–	–	31.75	–	76.59	5.51	11.66	93.76
8	25547w	5.01	33.30	–	–	–	32.55	–	70.86	4.71	9.98	85.56
9	25547x	5.37	35.68	–	–	–	36.56	1.13	78.73	5.05	10.70	94.48
10	25547y	5.45	36.48	0.64	0.17	1.13	35.36	–	79.24	5.16	10.94	95.34
Формулы												
1. (Zn _{3.02} Pb _{0.02} Ca _{0.01}) _{3.05} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
2. (Zn _{2.98} Mg _{0.56} Pb _{0.01}) _{3.55} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
3. (Zn _{2.52} Mg _{0.82}) _{3.34} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
4. (Zn _{2.33} Mg _{0.89}) _{3.22} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
5. (Zn _{2.93} Mg _{0.56} Pb _{0.03}) _{3.52} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
6. (Zn _{2.60} Mg _{0.84} K _{0.03} Ca _{0.02}) _{3.49} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
7. (Zn _{2.41} Mg _{0.91}) _{3.32} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
8. (Zn _{2.89} Mg _{0.90}) _{3.79} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
9. (Zn _{3.03} Mg _{0.90} Pb _{0.03}) _{3.96} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												
10. (Zn _{2.86} Mg _{0.89} Ca _{0.13} S _{0.05} K _{0.02}) _{3.95} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O												

Примечание. * – рассчитано по стехиометрии цинксилита; ** – сумма анализа с учетом расчетной воды. Формулы рассчитаны на Si = 4. Прочерк – не установлено (здесь и в табл. 5 и 6).

Note. * – calculated from zinsilite stoichiometry; ** – analytical sum takes into account the calculated water content. Formulas are calculated on the basis of Si = 4. Dash – not determined (here and in Table 5 and 6).

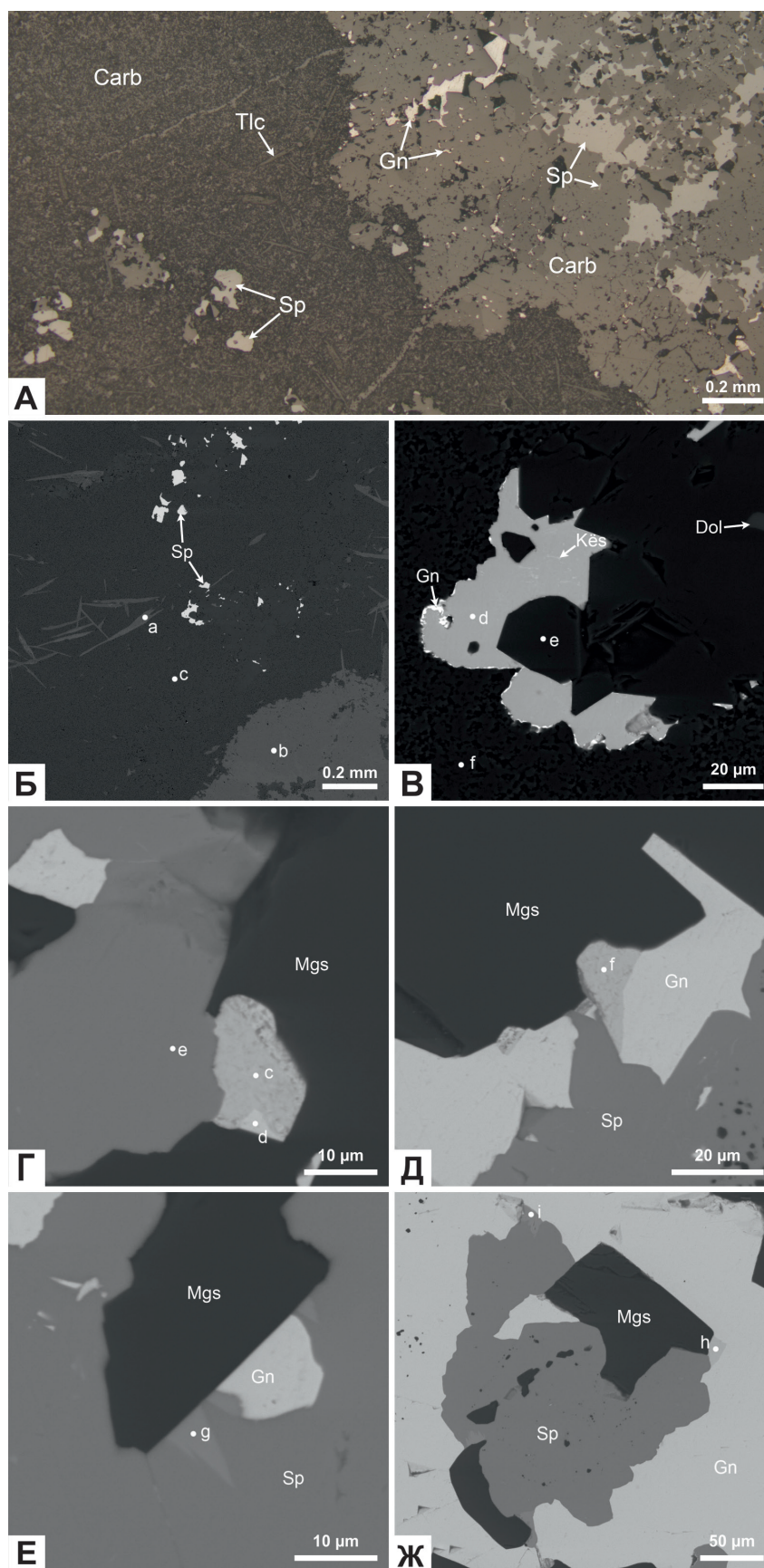


Рис. 6. Морфология породообразующих и акцессорных минералов в магнезите (обр. № 2): А – прожилки и гнезда перекристаллизованных карбонатов (Carb) с вкрапленностью сфалерита и галенита в криптозернистом карбонате с включениями талька (Tlc) и сфалерита; Б – гнездо перекристаллизованного доломита (точка b), чешуйки талька (точка a) и включения сфалерита в криптозернистом магнезите (точка c); В – сросток перекристаллизованного магнезита (точка e) и сфалерита (точка d) с каймой галенита и включениями кёстерита (Kës) в криптозернистом магнезите (точка f); Г – агрегат сфалерита (точка e) с сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb (точка c) и галенитом (точка d) в перекристаллизованном магнезите; Д – сфалерит, галенит и сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb (точка f) в перекристаллизованном магнезите; Е – сросток магнезита с галенитом и кёстеритом (точка g) в сфалерите; Ж – агрегат магнезита со сфалеритом, кёстеритом (точка i) и сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb (точка h) в галените. А – отраженный свет, Б–Ж – BSE фото.

Fig. 6. Morphology of rock-forming and accessory minerals in magnesite (sample № 2): A – veinlet and pockets of recrystallized carbonates (Carb) with sphalerite and galena inclusions in cryptogranular carbonate with talc (Tlc) and sphalerite inclusions; Б – aggregate of recrystallized dolomite (point b) and talc (point a) and sphalerite inclusions in cryptogranular magnesite (point c); В – intergrowth of recrystallized magnesite (point e) and sphalerite (point d) with galena rim and kesterite (Kës) inclusions in cryptogranular magnesite (point f); Г – sphalerite (point e) aggregate with Pb-Fe-Sn-Sb sulfosalt (point c) and galena (point d) in recrystallized magnesite; Д – sphalerite, galena and Pb-Fe-Sn-Sb sulfosalt (point f) in recrystallized magnesite; Е – intergrowth of magnesite with galena and kesterite (point g) in sphalerite; Ж – aggregate of magnesite with sphalerite, kesterite (point i) and Pb-Fe-Sn-Sb sulfosalt (point h) in galena. A – reflected light, Б–Ж – BSE images.

Таблица 5. Состав сфалерита, галенита и кёстерита (мас. %)
Table 5. Composition of sphalerite, galena and kesterite (wt. %)

№ п/п	№ обр.	№ ан.	S	Fe	Cu	Zn	Cd	Sn	Pb	Сумма	Формула
1	1	25547k	32.70	–	–	65.86	0.70	–	–	99.26	$(\text{Zn}_{0.99}\text{Cd}_{0.01})_{1.00}\text{S}_{1.00}$
2	2	24541d	33.05	–	–	66.90	0.62	–	–	100.57	$(\text{Zn}_{0.99}\text{Cd}_{0.01})_{1.00}\text{S}_{1.00}$
3		25548e	33.37	–	–	66.07	0.81	–	–	100.27	$(\text{Zn}_{0.97}\text{Cd}_{0.01})_{0.98}\text{S}_{1.00}$
4	1	25547m	13.63	–	–	–	–	–	86.86	100.50	$\text{Pb}_{0.99}\text{S}_{1.00}$
5	2	25548d	13.93	–	–	–	–	–	86.17	100.10	$\text{Pb}_{0.96}\text{S}_{1.00}$
6		25548g	28.84	0.18	28.68	15.70	–	27.12	–	100.52	$(\text{Cu}_{2.01}\text{Zn}_{1.07}\text{Sn}_{1.02}\text{Fe}_{0.01})_{4.11}\text{S}_{4.00}$
7		25548i	28.79	–	29.38	13.84	–	27.29	–	99.31	$(\text{Cu}_{2.06}\text{Sn}_{1.02}\text{Zn}_{0.94})_{4.02}\text{S}_{4.00}$

Примечание. Формулы сфалерита и галенита рассчитаны на S = 1, кёстерита – на S = 4.

Note. Formulas are calculated on the basis of S = 1 for sphalerite and galena and S = 4 for kesterite.

Таблица 6. Состав сульфосоли Pb-Fe-Sn-Sb (мас. %)
Table 6. Composition of Pb-Fe-Sn-Sb sulfosalt (wt. %)

№ п/п	№ ан.	S	Mn	Fe	Cu	Zn	Sn	Sb	Pb	Сумма
1	25548c	19.16	–	0.84	–	1.73	11.77	8.90	57.27	99.65
2	25548f	19.64	–	1.16	1.01	3.14	10.91	7.96	56.73	100.56
3	25548h	19.71	0.60	1.02	0.98	1.06	10.95	8.70	57.56	100.60

Цинксилит, как и другие низкотемпературные водные силикаты Zn (Zn-содержащий монтмориллонит, соконит), обнаружен в полостях растворения сфалерита или на расстоянии нескольких сантиметров от них в гидротермально измененных пегматитах Ловозерского щелочного массива: среди натролита в пегматите № 31 (г. Кедыкверпахк) и крупноблокового микроклина в пегматите № 47

(г. Лепхе-Нельм) (Пеков и др., 2004; Пеков и др., 2012; Лыкова, 2015). Предположительно, цинксилит кристаллизовался непосредственно из обогащенных Zn растворов на позднегидротермальных или гипергенных стадиях.

Таким образом, цинксилит и гемиморфит, так или иначе, связаны с зонами окисления свинцово-цинковых и полиметаллических месторождений,

Таблица 7. Акцессорные минералы в карбонатных породах магнезитовых месторождений
Table 7. Accessory minerals in carbonate rocks of magnesite deposits

Карбонаты	Силикаты	Сульфиды	Оксиды	Гидроксиды	Другое
Саткинское месторождение (Южный Урал) (Урасина и др., 1993; Крупенин, 2025)					
Магнезитовые породы					
Доломит	Кварц, тальк, клинохлор	Пирит, сфалерит			Графит
Доломитовые породы					
	Кварц, серицит, гидрослюда, каолин	Пирит, сфалерит			Барит, шунгит
Исмакаевское месторождение (Южный Урал) (Урасина и др., 1993; Крупенин, 2025)					
Магнезитовые породы					
Доломит, кальцит	Кварц, хлорит, альбит, мусковит, тальк	Пирит			Графитовое вещество
Семибратское месторождение (Южный Урал) (Урасина и др., 1993)					
Магнезитовые породы					
Доломит, кальцит, брейнерит, сидерит	Кварц, хлорит, тальк, серицит, серпентин, опал, халцедон	Пирит	Магнетит, гематит		
Доломитовые породы					
Магнетит, кальцит, брейнерит, сидерит	Кварц, хлорит, тальк, серицит, мусковит, биотит, флогопит, тремолит, кислый плагиоклаз, брусит, серпентин, опал, халцедон, циркон, титанит	Пирит, пирротин	Магнетит, гематит	Гидроксиды Fe	Графит
Киргитейское и Тальское месторождения (Енисейский край) (Урасина и др., 1993)					
Магнезитовые породы					
Доломит, кальцит, сидерит	Тальк, кварц, хлорит, палыгорскит	Пирит		Гидроксиды Fe	Углеродисто-графитистое вещество, апатит
Доломитовые породы					
Кальцит	Тальк, кварц, хлорит	Пирит		Гидроксиды Fe	Углеродисто-графитистое вещество
Савинское месторождение (Восточносибирская провинция, Иркутская область) (Урасина и др., 1993)					
Доломит, кальцит	Кварц, хлорит, тальк, серпентин, амфибол, биотит, брусит	Пирит с Со оруденением		Гидроксиды Fe	
Ляонинская провинция (КНР) (Урасина и др., 1993)					
Магнезитовые породы					
Доломит	Тальк, хлорит	Пирит			Графит

где образуются за счет сфалерита или других Zn-содержащих минералов, неустойчивых в поверхностных условиях. Скорее всего, образование цинк-силита и гемиморфита в изученных магнезитовых породах мурандавской свиты тоже связано с окислением Zn-содержащих сульфидов, что подтверждается наличием в них реликтов сфалерита. Стоит

отметить, что силикаты Zn неустойчивы в кислой среде, обычной для зон окисления сульфидных месторождений, где Zn проявляет себя как очень подвижный элемент. В нашем случае карбонатная обстановка нейтрализует кислотность и способствует сохранности силикатов Zn (Hitzman, 2003).

Возможные источники Zn, Pb и Sn в магнезитовых породах

Породы хинганской серии прорываются гранитами Биробиджанского комплекса, с которым генетически связаны скарны и роговики, содержащие повышенные и значительно варьирующие концентрации As и металлов, включая Sn, Mo, Pb, Bi и Au. С гранитоидами, а также с Помпеевским разломом связывают шлиховые ореолы и потоки рассеяния киновари (Петрук и др., 2012). Не исключено, что источником Zn и других металлов для формирования сульфидной минерализации в магнезитовых породах могли служить флюиды, связанные с гранитоидами. На это косвенно указывают находки минералов Sn и ассоциации сфалерита с сульфидами и сульфосолями полиметаллов в перекристаллизованных карбонатах.

В 3–4 км к югу от изученного участка находится Верхнебиджанское гидротермальное месторождение олова, локализованное в доломитах мурандавской свиты и относящееся к оловорудной силикатно-сульфидной формации. Его образование, предположительно, связано с палеозойскими интрузиями гранитоидов (Петрук и др., 2012). Первичные сульфидные руды здесь сложены буланжеритом и арсенопиритом с касситеритом, блеклыми рудами, висмутином, пиритом, редкими халькопиритом и сфалеритом. Зона окисления на месторождении распространена до глубины 45 м, из вторичных рудных минералов в ней описаны скородит, церуссит, биндгеймит, гидроксиды Fe, но собственные минералы Zn не упоминаются. Однако обнаруженная в магнезитах и перекристаллизованных карбонатах мурандавской свиты минеральная ассоциация Zn с галенитом, сульфидом Hg, кестеритом и сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb не установлена на Верхнебиджанском месторождении.

Цинк может изоморфно входить в состав карбонатов группы кальцита и доломита, и при перекристаллизации высвобождаться в поровые растворы. Учитывая редкость находок минералов Zn, нельзя исключить, что источником Zn служили сами осадочные толщи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магнезитовых породах мурандавской свиты (Дальний Восток России) впервые установлены нетипичные для этих пород силикаты Zn гемиморфит и цинксилит, а также сфалерит, галенит, кестерит, касситерит, сульфосолю Pb-Fe-Sn-Sb и сульфид Hg, которые приурочены в основном к перекристаллизованному карбонатам. Силикаты Zn образовались в результате окисления сфалерита. Ассоциация сфалерита с галенитом и кестеритом, а силикатов Zn с касситеритом может указывать на связь первичных концентраций цветных металлов и олова с гранитоидными интрузиями, развитыми в районе.

ЛИТЕРАТУРА

- Белогуб Е.В. (2009) Гипергенез сульфидных месторождений Южного Урала. Дисс. на соиск. степ. док. геол.-мин. наук. Миасс, ИМин УрО РАН, 536 с.
- Бетехтин А.Г. (2008) Курс минералогии: учебное пособие. М., КДУ, 736 с.
- Бочаров Л.Д., Коптелов В.Н., Перепелицын В.А., Афонин Ю.А., Марясов И.Г., Павлова Н.Ю., Устьянцев В.М., Мосейкин Д.Ж. (2001) Особенности вещественного состава саткинских магнезитов. Углеродисто-хлоритовое вещество. *Огнеупоры и техническая керамика*, 10, 21–30.
- Врублевский А.А., Кузин А.А., Иванюк Б.О., Иванюк М.Б. (2000) Месторождения неметаллических полезных ископаемых Еврейской автономной области: Справочник. Хабаровск-Биробиджан, Приамурское географическое общество, 208 с.
- Добкин С.Н. (2016) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Буреинская, лист М-52-XXX. Объяснительная записка. М., Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 122 с.
- Дубинина В.Н., Корнилович И.А. (1962) К минералогии цинковых окисленных руд полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья. *Труды минералогического музея*, 13, 43–61.
- Ивлев А.И. (2007) Уникальное смитсонит-каламиновое месторождение Шаймерден в Валерьяновском синклинии Зауралья. *Металлогения древних и современных океанов-2007. Гидротермальные и гипергенные рудоносные системы*. Миасс, ИМин УрО РАН, 198–204.
- Крупенин М.Т. (2025) Магнезиально-железистые карбонатные руды в рифейских отложениях Башкирского мегаинтродузии (источники вещества, этапы и механизмы образования). Автореферат дисс. на соиск. степ. док. геол.-мин. наук. Новосибирск, ИГМ СО РАН, 46 с.
- Лыкова И.С. (2015) Минералы группы эпистолита: посткристаллизационные преобразования и их кристаллохимические механизмы (природные системы и

модельные эксперименты). Дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Москва, 235 с.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Магнезит и брусит (2007) Москва, ФГУ ГКЗ, 32 с.

Паленова Е.Е. (2008) Карбонаты друзовых окисленных цинковых руд месторождения Шаймерден (Казахстан). *Металлогения древних и современных океанов-2008. Рудоносные комплексы и рудные фации*. Миасс, ИМин УрО РАН, 169–173.

Пеков И.В., Чуканов Н.В., Турчкова А.Г., Гришин В.Г. (2004) Новое в минералогии Ловозерского массива. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, (1), 30–33.

Пеков И.В., Бритвин С.Н., Зубкова Н.В., Чуканов Н.В., Брызгалов И.А., Лыкова И.С., Белаковский Д.И., Пушаровский Д.Ю. (2012) Вигришинит $Zn_2Ti_{4-x}Si_4O_{14}(OH, H_2O)_8$ – новый минерал из Ловозерского щелочного массива (Кольский полуостров, Россия). *Записки Российского минералогического общества*, 141 (4), 12–27.

Петрук Н.Н., Волкова Ю.Р., Шилова М.Н., Мялик А.В., Шадрин Н.И., Азарова И.А. (2012) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М52 – Благовещенск. Объяснительная записка. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 496 с. + 10 вкл.

Смирнова Ю.Н., Сорокин А.А., Котов А.Б., Ковач В.П. (2016) Тектонические условия накопления и источники верхнепротерозойских и нижнепалеозойских терригенных отложений Малохинганского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Стратиграфия и геологическая корреляция*, 24 (3), 3–26. <https://doi.org/10.7868/S0869592X1603008X>

Сорокин А.А., Котов А.Б., Смирнова Ю.Н., Сальникова Е.Б., Плотнокина Ю.В., Яковлева С.З. (2016) О возрасте терригенных отложений хинганской серии Малохинганского террейна восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Доклады Академии наук*, 471 (2), 191–195. <https://doi.org/10.7868/S0869565216320244>.

Урасина Л.П., Другалева Т.А., Смолин П.П. (1993) Главнейшие магнезитовые месторождения. М., Наука, 157 с.

Яхонтова Л.К., Сидоренко Г.А., Сергеева Н.Е., Шумкова Н.Г., Плюснина И.И., Зоткин Ю.М., Свешникова Е.В. (1977) О мореснетите из зоны окисления Ачисайского месторождения. *Новые данные о минералах СССР*, 26, 171–182.

Hitzman M., Reynolds N., Sangster D., Allen C., Carman C. (2003) Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, 98(4), 685–714. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.685>.

REFERENCES

Belogub E.V. (2009) Supergene genesis of sulfide deposits of the South Urals (Doctoral dissertation). Miass, IMin UrO RAN, 536 p. (in Russian)

Betekhtin A.G. (2008) Mineralogy: training manual. Moscow, KDU, 736 p. (in Russian)

Bocharov L.D., Koptelov V.N., Perepelitsyn V.A., Afonin Yu.A., Maryasev I.G., Pavlova N.Yu., Ustyancsev V.M., Moseykin D.Zh. (2001) Features of the composition of Satka magnesites. Carbonaceous-chlorite matter. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika (Refractories and Technical Ceramics)*, 10, 21–30. (in Russian)

Dobkin S.N. (2016) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. Bureya series, sheet M-52-XXX. Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 122 p. (in Russian)

Dubinina V.N., Kornilovich I.A. (1962) Mineralogy of Zn oxidized ores of polymetallic deposits of Eastern Transbaikalia. *Trudy Mineralogicheskogo muzeya (Proceedings of the Mineralogical Museum)*, 13, 43–61. (in Russian)

Hitzman M., Reynolds N., Sangster D., Allen C., Carman C. (2003) Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, 98(4), 685–714. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.685>.

Ivlev A.I. (2007) The unique Shaimerden smithsonite-calamine deposit in the Valerianovsky Synclinorium of the Transurals. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2007. Gidrotermal'nye i gipergennyye rudonosnye sistemy (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2007. Hydrothermal and Supergene Ore-Bearing Systems)*. Miass, IMin UrO RAN, 198–204. (in Russian)

Krupenin M.T. (2025) Magnesian-ferruginous carbonate ores in the Riphean deposits of the Bashkirian Meganticlinorium: matter sources, stages and mechanisms of formation (abstract of Doctoral Dissertation). Novosibirsk, IGM SB RAS, 46 p. (in Russian)

Lykova I.S. (2015) Minerals of the epistolite group: postcrystallization transformations and their crystal chemical mechanisms (natural systems and modeling experiments) (Candidate Dissertation). Moscow, 235 c. (in Russian)

Methodic recommendations for the application of the classification of deposit reserves and forecast resources of solid minerals. Magnesite and Brucite. (2007) Moscow, FGU GKZ, 32 p.

Palenova E.E. (2008) Carbonates of drusy Zn oxidized ores from the Shaimerden deposit (Kazakhstan). *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2008. Rudonosnye komplekсы i fatsii (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2008. Ore-Bearing Complexes and Facies)*. Miass, IMin UrO RAN, 169–173. (in Russian)

Pekov I.V., Chukanov N.V., Turchkova A.G., Grishin V.G. (2004) New in mineralogy of the Lovozero massif. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN (Proceedings*

of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute KSC RAS), (1), 30–33. (in Russian)

Pekov I.V., Zubkova N.V., Bryzgalov I.A., Lykova I.S., Pushcharovsky D.Y., Britvin S.N., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I. (2013) Vigrishinite, $Zn_2Ti_{4-x}Si_4O_{14}(OH,H_2O)_8$, a new mineral from the Lovozero alkaline complex, Kola Peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 55 (7), 575–586. <https://doi.org/10.1134/S107570151307009X>.

Petruk N.N., Volkova Yu.R., Shilova M.N., Myalik A.V., Shadrina N.I., Azarova I.A. (2012) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 1 000 000 (third generation). Far Eastern Series. Sheet M52 – Blagoveshchensk. Explanatory Note. St. Petersburg, VSEGEI, 496 p. (in Russian)

Smirnova Y.N., Sorokin A.A., Kotov A.B., Kovach V.P. (2016) Tectonic conditions of sedimentation and source areas of Upper Proterozoic and Lower Paleozoic terrigenous deposits of the Lesser Khingan Terrane of the Central Asian Fold Belt. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 24(3), 219–241. <https://doi.org/10.1134/S0869593816030060>.

Sorokin A.A., Kotov A.B., Smirnova Y.N., Salnikova E.B., Plotkina Y.V., Yakovleva S.Z. (2016) Age of terrigenous deposits of the Khingan Group in the Lesser Khingan terrane in the eastern part of the Central Asian fold belt. *Doklady Earth Sciences*, 471(1), 1126–1130. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16110180>.

Urasina L.P., Drugaleva T.A., Smolin P.P. (1993) Main magnesite deposits. Moscow, Nauka, 157 p. (in Russian)

Vrublevsky A.A., Kuzin A.A., Ivanyuk B.O., Ivanyuk M.B. (2000) Deposits of non-metallic minerals of the Jewish autonomous region: reference book. Khabarovsk-Birobidzhan, Priamyrskoe geograficheskoe obshchestvo, 208 p. (in Russian)

Yakhontova L.K., Sidorenko G.A., Sergeeva N.E., Shumkova N.G., Plyusnina I.I., Zotkin Yu.M., Sveshnikova E.V. (1977) Moresnetite from the oxidation zone of the Achisai deposit. *Novye dannye o mineralakh SSSR (New data on minerals of the USSR)*, 26, 171–182. (in Russian)

Информация об авторах

Рожкова Елена Александровна – инженер, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; rozhkova95.lena@yandex.ru

Ким Майя Олеговна – заместитель генерального директора по развитию МСБ, ООО «Русское горно-химическое общество», г. Москва, Россия; mkim616@yandex.ru

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; ivan_a_blinov@mail.ru

Information about the authors

Elena A. Rozhkova – Engineer, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; rozhkova95.lena@yandex.ru

Maya O. Kim – Deputy General Director for the Development of the Mineral Resource Base, Russian Mining and Chemical Company, Moscow, Russia; mkim616@yandex.ru

Ivan A. Blinov – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; ivan_a_blinov@mail.ru