

УДК 549+551.761+235.47

DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-70-89

Минералогия спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня

Е. В. Перевозникова, В. Т. Казаченко

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159,
e-mail: elenavalper@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.03.2020 г., принята к печати 10.08.2020 г.

Объект исследований. Статья посвящена изучению спессартин-кварцевых пород триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня. Объектами исследований служили коренные выходы спессартин-кварцевых пород Горной и Широкопаднинской площадей Малиновского и Ольгинского рудных районов (в Самаркинском и Таухинском террейнах соответственно). **Материалы и методы.** Отбор каменного материала проводился штучным способом. Диагностика минералов выполнялась под микроскопом в проходящем и отраженном свете и завершалась определением их составов. Анализы минералов (в аншлифах) выполнены в ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA8100. **Результаты.** Спессартин-кварцевые и марганцевосиликатные породы занимают одинаковое положение в разрезе триасовых отложений Таухинского и Самаркинского террейнов, что свидетельствует о синхронном накоплении осадков (протолитов этих пород) в едином осадочном бассейне. В Таухинском террейне эти породы образовались при контактовом метаморфизме кремнисто-родохрозитовых тел в позднем мелу при становлении гранитоидных массивов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, а в Самаркинском террейне – в раннемеловое время при формировании гранитоидных тел Хунгари-Таубинского плутонического пояса. Протолитами кремнисто-родохрозитовых пород и их контактово-метаморфизованных аналогов являлись кремнистые или биогенной природы. Из-за одинаковой природы протолитов и близких условий метаморфизма марганцевосиликатные и спессартин-кварцевые породы обнаруживают минералогическое сходство. Оно выражается в присутствии многих общих для них минералов, таких как спессартин, члены ильменит-пиррофанитового ряда, титанит, монацит, бастнезит, алланит, апатит, циркон, бадделит, торанит и др. В спессартин-кварцевых породах Сихотэ-Алиня присутствует группа редких в природе минералов: чералит, грэйит, редкая разновидность фтор-глиноземистого титанита, в котором около половины Ti замещено Al, и кармелтазит. **Заключение.** Появление (при контактовом метаморфизме кремнисто-родохрозитовых пород в восстановительных условиях) спессартин-кварцевых или, вместо них, марганцевосиликатных пород, сложенных главным образом пироксеноидами, определяется относительными количествами карбонатного и глинистого вещества в исходных осадках, а также содержаниями в них Ba и щелочей.

Ключевые слова: спессартин-кварцевые породы, кремнисто-родохрозитовые породы, марганцевосиликатные породы, минералогия, чералит, кармелтазит, грэйит, триасовая кремневая формация, Сихотэ-Алинь

Mineralogy of spessartine-quartz rocks of the Sikhote-Alin

Elena V. Perevznikova, Valentin T. Kazachenko

Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159 Century of Vladivostok 100th av.,
Vladivostok 690022, Russia, e-mail: elenavalper@yandex.ru

Received 20.03.2020, accepted 10.08.2020

Research subject. The article is devoted to the study of spessartine-quartz rocks of the Triassic chert formation of the Sikhote-Alin. The research objects involved the outcrops of spessartine-quartz rocks of the Gornaya and Shirokaya Pad areas from Malinovka and Olga ore districts (in the Samarka and Taukha terranes respectively). **Materials and methods.** The selection of stone materials was performed manually. The diagnostic of minerals was performed using the microscope in transmitted and reflected light and carried out by the determination of their composition. The polished sections of the minerals were investigated at the FEGI FEB RAS using JXA8100 microanalysers. **Results.** Spessartine-quartz and manganese silicate rocks occupy the same position in the section of the Triassic deposits of the Taukha and Samarka terranes. This indicates a synchronous accumulation of sediments (protoliths of these rocks) in a single sedimentary basin. The rocks formed by contact metamorphism in the Late and Early Cretaceous large granitoid massifs. This process is manifested in the presence of a variety of such minerals, as spessartine, members of the ilmenite-pyrophanite

Для цитирования: Перевозникова Е.В., Казаченко В.Т. (2021) Минералогия спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня. *Литосфера*, 21(1), 70–89. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-70-89

For citation: Perevznikova E.V., Kazachenko V.T. (2021) Mineralogy of spessartine-quartz rocks of the Sikhote-Alin. *Litosfera*, 21(1), 70–89. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-70-89

series, titanite, monazite, bastnesite, allanite, apatite, zircon, baddeleyite, torianite and others. The rocks under study also include such rare minerals, as cheralite, greyite and a rare variety of fluorine-aluminous titanite. *Conclusion.* The occurrence (during contact metamorphism of siliceous-rhodochrosite rocks) of spessartine-quartz or manganesilicate rocks composed mainly of pyroxenoids, was determined by both the relative amounts of carbonate and clay matter, as well as the concentrations of Ba and alkalis in the initial sediments.

Keywords: *spessartine-quartz rocks, siliceous-rhodochrosite rocks, manganesilicate rocks, mineralogy, cheralite, carmelazite, greyite, Triassic chert formation, Sikhote-Alin*

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью Сихотэ-Алиня, отмечаемой многими исследователями при изучении металлогении этой крупной геологической структуры, является распространение богатых или обогащенных Mn геологических образований (Радкевич и др., 1960; Кулиш, Кулиш, 1974; Гуляева, 1982; и др.).

Наиболее значительные концентрации Mn характерны для Самаркинского и Таухинского террейнов Сихотэ-Алиня (рис. 1). В этих структурах распространены геологические образования, которые (по содержанию и минеральной форме Mn, а также условиям залегания) соответствуют промышленному типу стратифицированных карбонатных марганцевых руд (но плохо изучены в отношении запасов) или являются ценным ювелирно-поделочным или поделочным материалом. К ним относятся кремнисто-родохрозитовые породы триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня и так называемые “родониты” – контакто-метаморфизованные аналоги кремнисто-родохрозитовых пород. Особый интерес к богатым или обогащенным Mn образованиям (включая скарны широко известных месторождений Дальнегорской группы и руды некоторых жильных месторождений Приморья) связан с сопутствующей им Au-Ag-Pd-Pt минерализацией (Казаченко и др., 2012; и др.), а также борными, полиметаллическими (с Ag, Au или Sn) или оловянно-полиметаллическими рудами.

Наибольшее накопление Mn в Сихотэ-Алине происходило в среднем–позднем триасе в металлоносных осадках, частично метаморфизованных при становлении крупных гранитоидных тел позднемелового (в Таухинском террейне) и раннемелового (в Самаркинском) возраста. Они представлены в нынешнем виде кремнисто-родохрозитовыми, спессартин-кварцевыми, марганцевосиликатными (сложенными главным образом силикатами Mn) породами и силикатно-магнетитовыми рудами триасовой кремневой формации, которая известна в Сихотэ-Алине в виде крупных блоков в

осадочных породах юрского и раннемелового олистостромовых комплексов Самаркинского (и его аналога – Наданьхада-Бикинского) и Таухинского террейнов (см. рис. 1). Она сложена кремнями, кремневыми аргиллитами, аргиллитами и алевроаргиллитами (Волохин и др., 2003). Местами (в Центральном и Северном Сихотэ-Алине) в составе триасовой кремневой формации присутствуют прослои известняков, мергелей, глинистых и кремнистых известняков. Ее особенностью является также наличие яшм, углеродистых разностей кремнистых и кремнисто-глинистых пород, приуроченных к определенным стратиграфическим горизонтам. Нижняя часть формации сложена “глинисто-кремнистой” толщей (оленок–средний анизий), обогащенной прослоями углеродистых разностей пород и перекрытой “кремневой” толщей светло-серых плитчатых кремней. В основании последней присутствует горизонт яшм (верхний анизий–ладинский ярус) мощностью более 3 м. Выше лежащие кремни относятся к карнию и норию. Во время юрской и меловой аккреций фрагменты триасовой кремневой формации были включены в состав крупных геологических структур Сихотэ-Алиня – Самаркинского и Таухинского террейнов соответственно.

Кремнисто-родохрозитовые, марганцевосиликатные породы и силикатно-магнетитовые руды слагают стратифицированные линзообразные и пластовые тела в основании “кремневой толщи”. Вместе с яшмами они образуют единую рудоносную пачку или сменяют друг друга по простиранию пород. На поверхности их выходы, группирующиеся в серии протяженных линейных зон, параллельных простиранию вмещающих пород, маркируют выходы смятого в складки рудоносного горизонта. Некоторые зоны прослежены по простиранию на расстоянии не менее 4.5–6.5 км (рис. 2). На некоторых интервалах таких зон марганцевосиликатные породы и силикатно-магнетитовые руды залегают в спессартин-кварцевых породах (рис. 3), в некоторых отношениях близких к яшмам. Как и яшмы, они представляют собой метаморфизован-

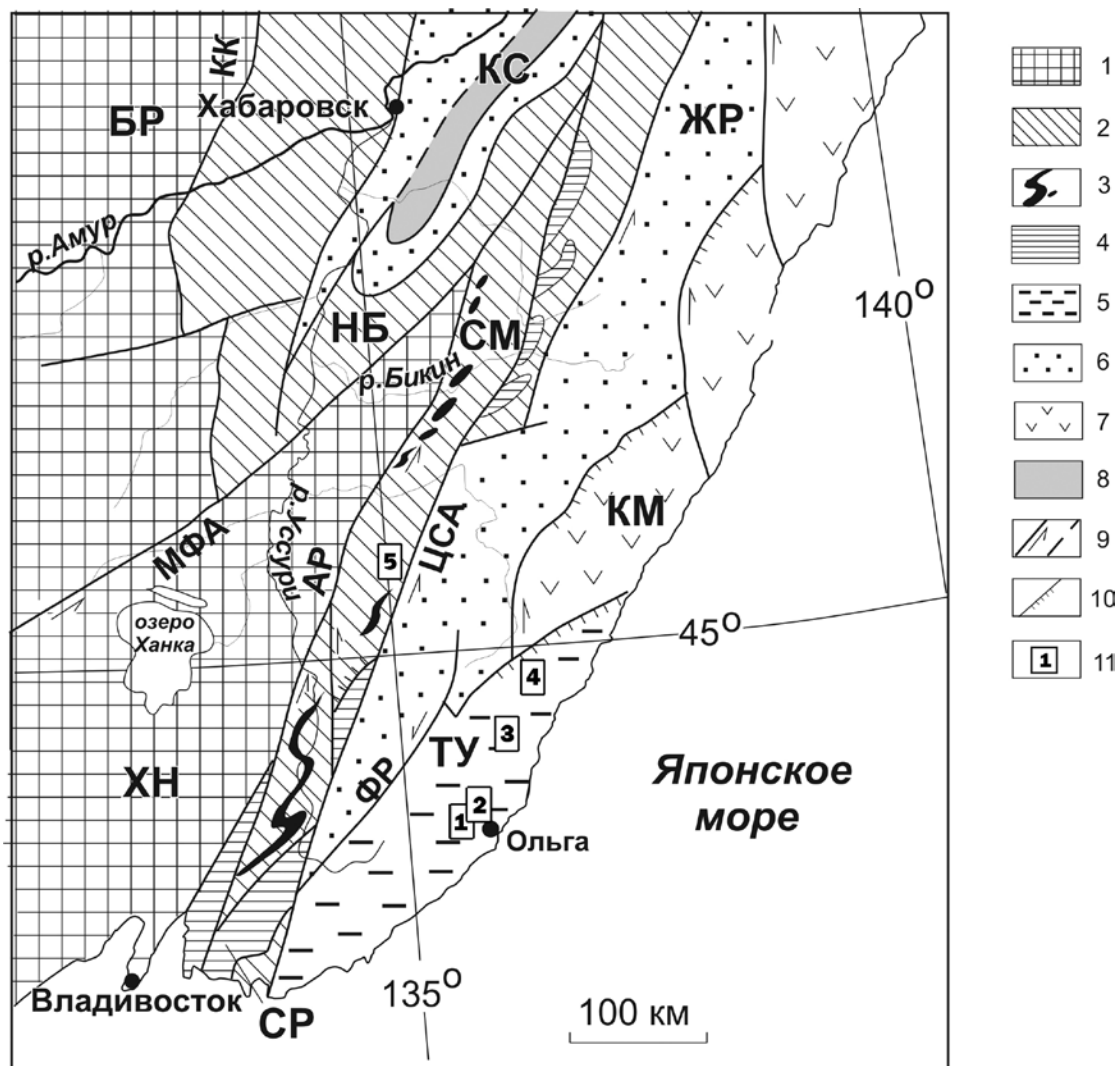


Рис. 1. Положение изученных объектов в Сихотэ-Алине. Тектоническая основа по А.И. Ханчуку (Геодинамика..., 2006) с небольшими изменениями.

1 – фрагменты раннепалеозойских орогенных поясов по Л.М. Парфенову (Парфенов и др., 2003): ХН – Ханкайский массив, БР – Буреинский массив; 2 – юрские террейны (фрагменты аккреционных призм): СМ – Самаркинский, НБ – Наданьхада-Бикинский; 3 – калиновские габброиды (девон?); 4 – Окраинско-Сергеевский террейн (СР) и его фрагменты, включенные в структуры юрской аккреционной призмы и испытавшие вместе с ними цикл син- и постааккреционных преобразований; 5–8 – раннемеловые террейны-фрагменты: 5 – неомеловой аккреционной призмы (ТУ – Таухинский), 6 – приконтинентального спредингового турбидитового бассейна (ЖР – Журавлевско-Амурский); 7 – баррем-альбской островодужной системы (КМ – Кемский); 8 – альбской аккреционной призмы (КС – Киселевско-Маноминский); 9 – левые сдвиги, в том числе: КК – Куканский, АР – Арсеньевский, МФА – Мишань-Фушунский (Алчанский), ЦСА – Центральный Сихотэ-Алинский, ФР – Фурмановский; 10 – надвиги; 11 – изученные площади с выходами триасовых контактово-метаморфизованных металлоносных осадков: 1 – Широкопаднинская, 2 – Мокрушинская, 3 – Высокогорская, 4 – Садовая, 5 – Горная.

Fig. 1. Position of the studied objects in the Sikhote-Alin. Tectonic base after A.I. Khanchuk (Geodinamika..., 2006) with little changes.

1 – fragments of early paleozoic orogenic belts according to L.M. Parfenov (Parfenov et al, 2003): 1 – ХН – Khanka massif, БР – Bureya massif; 2 – Jurassic terranes (fragments of accretionary prisms): СМ – Samarka, НБ – Nadan'khada-Bikin; 3 – Kalinovka gabbroids (Devonian?); 4 – Okraino-Sergeevka terrane (CP) and its fragments included into the structures of the Jurassic accretionary prism and that underwent together with them the cycle of the syn- and post-accretionary transformations; 5–8 – the Early Cretaceous terranes – fragments of: 5 – the Neocomian accretionary prism (ТУ – Taukha), 6 – the near-continental spreading turbidite basin (ЖР – Zhuravlevka-Amur); 7 – the Barremian-Albian island-arc system (КМ – Kema); 8 – the Albian accretionary prism (КМ – Kiselevka-Manomin); 9 – left-lateral faults including: КК – Kukan, АР – Arsenyevka, МФА – Mishan-Fushun (Alchansky), ЦСА – Central Sikhote-Alin, ФР – Furmanovka; 10 – thrusts; 11 – the studied areas with the exposures of the Triassic contact-metamorphosed metal-bearing sediments and deposits: 1 – Shirokaya Pad', 2 – Mokrusha, 3 – Vysokogorsk, 4 – Sadovaya, 5 – Gornaya.

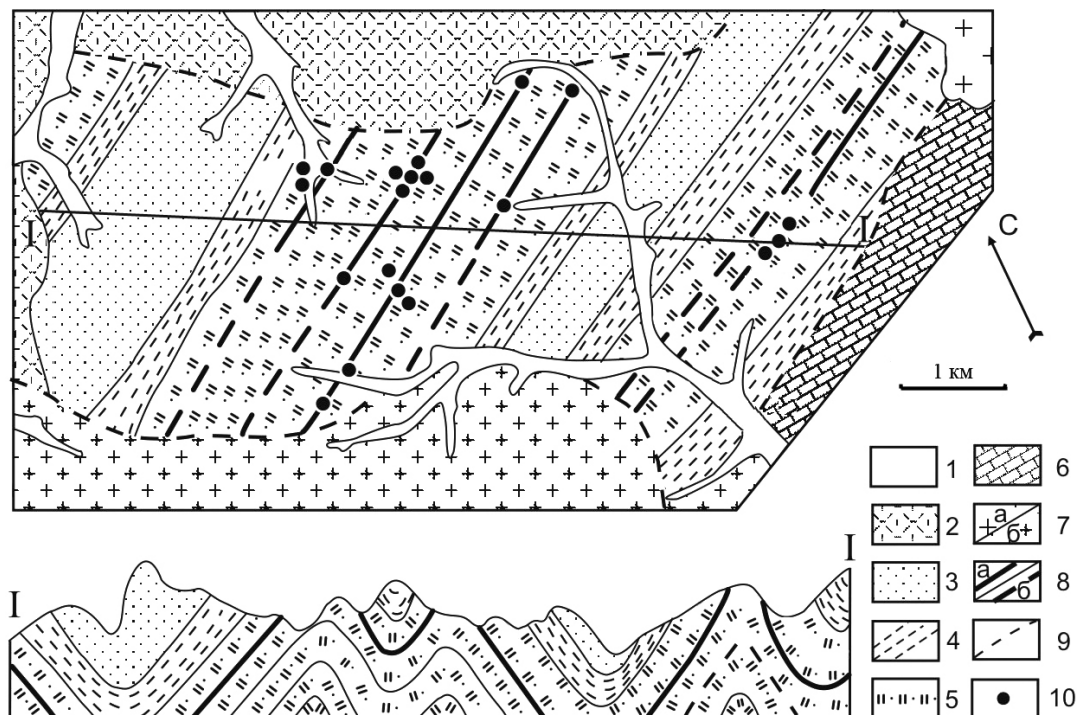


Рис. 2. Схема геологического строения Широкопаднинской площади (по Ф.И. Ростовскому и др., 1981 с изменениями и дополнениями).

1 – четвертичные отложения; 2 – вулканы Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса; 3 – песчаная толща (K_1 ?); 4 – пелит-алевролитовая толща с горизонтами туфитов, кремнистых пород и песчаников (J_{2-3}); 5 – кремнисто-глинистая толща среднего–позднего триаса; 6 – карбон-пермские отложения; 7 – граниты Владимирского (а) и Широкопаднинского (б) массивов; 8 – рудоносная пачка: а – установленное местоположение, б – предполагаемое; 9 – разрывные нарушения; 10 – установленные выходы рудоносной пачки.

Fig. 2. Schematic geological structure of the Shirokaya Pad' area (after F.I. Rostovskii, et al., 1981 with changes and additions).

1 – Quaternary sediments; 2 – volcanics of the East-Sikhote-Alin Volcanic Belt; 3 – sandy sequence (K_1 ?); 4 – clays and siltstones with tuffite, siliceous rock and sandstone units (J_{2-3}); 5 – siliceous-clayey sequence (Middle–Late Triassic); 6 – Carboniferous–Permian sedimentary rocks; 7 – granites of the Vladimir (a) and Shirokaya Pad' (b) massifs; 8 – ore-bearing unit: a – proved, b – inferred; 9 – fractures; 10 – proved exposures ore-bearing unit.

ные, окрашенные (в коричневый цвет) кремнистые и глинисто-кремнистые породы мелкозернистой структуры (рис. 4), но обогащенные восстановленным до двухвалентного состояния Mn. По минеральному составу спессартин-кварцевые породы близки к гондита (обычно мелкозернистым), однако их образование связано не с региональным (как в случае гондитов), а с контактовым метаморфизмом металлоносных осадков.

Кремнисто-родохрозитовые породы представляют собой кремни, насыщенные криптокристаллическим родохрозитом или агрегатами из мельчайших дендритоподобных кристаллов этого минерала. Они содержат многочисленные мельчайшие включения рудных минералов, органического вещества, микроскопические чешуйки хлорита, кристаллы титанита и апатита.

В марганцевосиликатных породах преобладают родонит, пироксмангит, спессартин и кварц.

Распространены пиррофанит, тефроит, манганактинолит, марганцовистые разновидности клинопироксена и амфибола куммингтонит-грюнеритового ряда (Перевозникова, 2010). Реже встречаются манганпиромалит, алабандин, манганаксинит, гельвин, родохрозит, Ва-содержащий флогопит, гялофан, цельзиан, магнетит, графит и другие минералы. Содержание MnO в марганцевосиликатных породах достигает 47 мас. %. Марганцевосиликатные породы содержат акцессорную минерализацию в виде разнообразных соединений Th, U, REE, Ni, Co и многих других металлов.

Силикатно-магнетитовые руды представлены тонко- и мелкокристаллическими разновидностями тальк-магнетитового, тальк-хлорит-магнетитового, манганактинолит-магнетитового (со спессартином) и хлорит-магнетитового состава с плохо сохранившейся слоистой текстурой (Казаченко, 2002). В них присутствуют сингенетические микровключения кас-

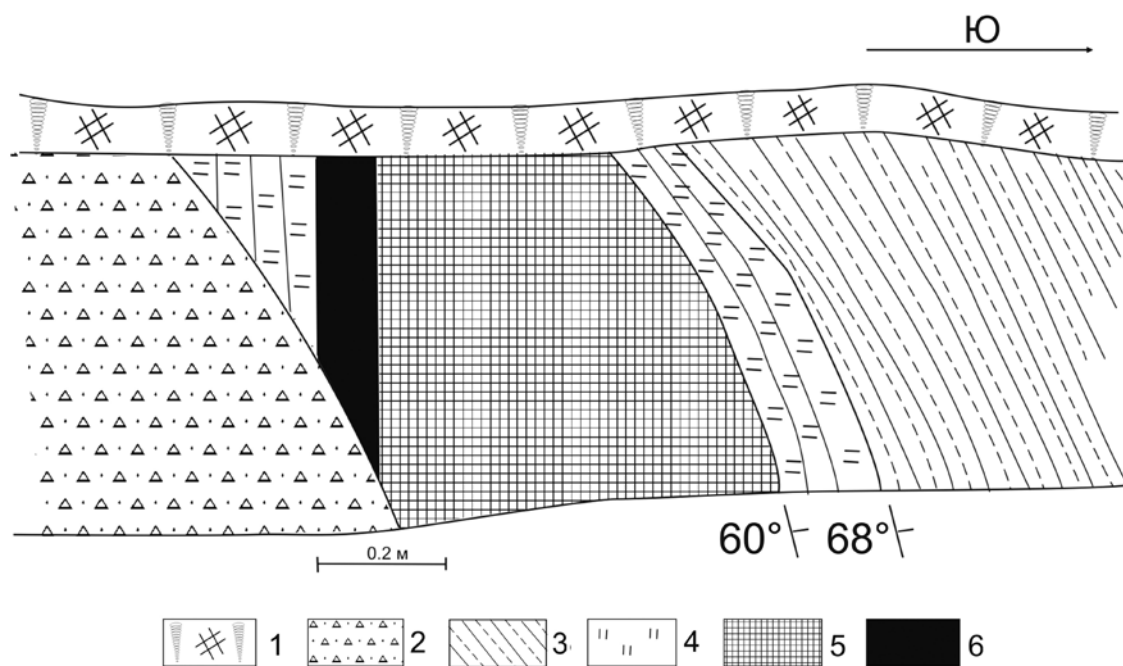


Рис. 3. Характер залегания и строение рудонесущей пачки на Широкопаднинской площади Ольгинского района (рудопоявление 19), по (Казаченко, Сапин, 1990) с дополнениями и изменениями.

1 – почвенно-растительный слой; 2 – делювий; 3 – кремнисто-глинистые породы; 4 – спессартин-кварцевые породы; 5 – марганцевосиликатные породы; 6 – силикатно-магнетитовые руды.

Fig. 3. The nature of occurrence and structure of the ore bearing layer at Shirokaya Pad' area of the Olga district (ore occurrence 19), by (Kazachenko, Sapin, 1990) with additions and changes.

1 – ground-vegetation layer; 2 – deluvium; 3 – siliceous-clay rocks; 4 – spessartine-quartz rocks; 5 – manganese-silicate rocks; 6 – silicate-magnetite ores.

ситерита, ильменита, титанита, шеелита, ксеноти-ма, монацита, бадделейта, ториянита, уранинита, куларита, барита, арсенидов и сульфидов Ni и Co и других минералов. Силикатно-магнетитовые руды содержат 49.26–91.37 мас. % ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$), обогащены Mn (до 0.82 мас. % MnO) и Sn (до 0.65 мас. % SnO_2).

Современное накопление Mn , как показано многочисленными исследователями, в том числе нашими соотечественниками Н.М. Страховым, И.М. Варенцовым и др., внесшими значительный вклад в решение проблем образования марганцевых месторождений и океанического литогенеза, происходит в океанах, мелководных морях, фиордах, пресноводных озерах и болотах. Большинство залежей в океане, представляющих собой скопление железомарганцевых конкреций, располагаются в областях развития красных глин или кремнистых илов. Накопление Mn происходит на абиссальных равнинах, подводных плато, поднятиях, во впадинах и других морфологических элементах океанского дна, в зонах континентального обрамления, в континентальных рифтовых структурах. Большинство залежей, для которых предполагается

эндогенный источник Mn , Fe , Cu , Ni и Co , расположено вблизи или в самых центрах спрединга, таких как Срединно-Атлантический и Центрально-Индийский хребты, Тихоокеанско-Антарктическое и Восточно-Тихоокеанское поднятия, Галапагосский рифт и зоны разломов океанского дна (Мендосино и Атлантик) (Рой, 1986).

Образование марганцевых и железомарганцевых залежей в морском бассейне, по современным представлениям, может происходить путем осаждения из морской воды, гидротермальным (отложения горячих источников) и диагенетическим способами. Залежи марганцевых карбонатов, как отмечает С. Рой (1986), формировались путем либо непосредственного осаждения из вод бассейна, либо отложения из иловых вод в ходе диагенетического перераспределения в восстановленных осадках. В гемипелагических областях современных океанов, мелководных морях и пресноводных озерах с восстановленными, обогащенными органическим веществом донными осадками широко распространен процесс диагенетического перераспределения Mn с образованием карбонатной формы этого элемента. Способ и механизм концентрации

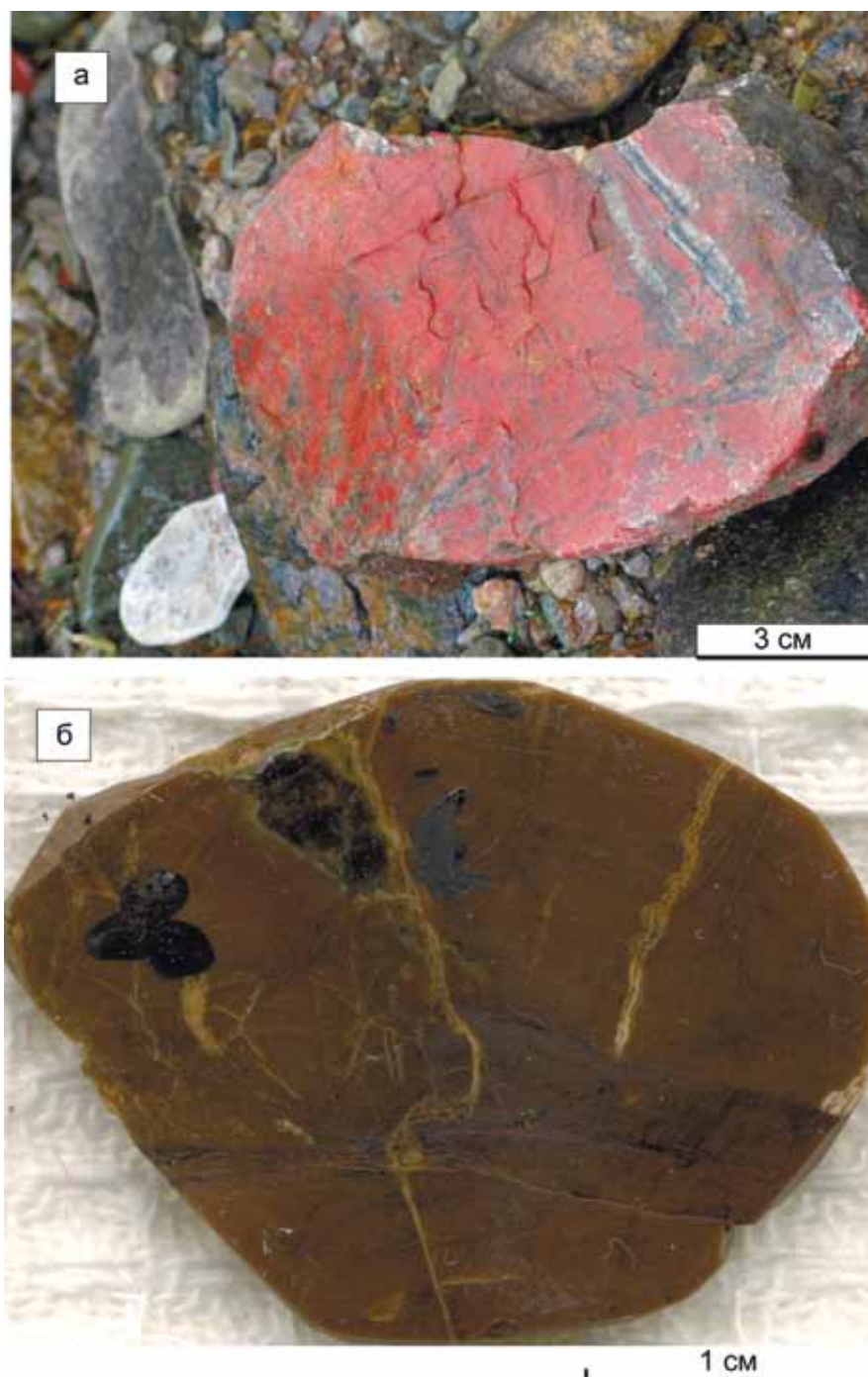


Рис. 4. Внешний вид яшм (а) и спессартин-кварцевых пород (б).

Fig. 4. Appearance of jaspers (а) and spessartine-quartz rocks (б).

переходных металлов в поровых водах восстановленных осадков изучались многими исследователями в различных бассейнах (Li et al., 1969; Price, Calvert, 1970; Логвиненко, 1972; и др.). Залежи марганцевых карбонатов в более древних отложениях нередко связаны с такими обогащенными углеродистым веществом восстановленными осадками.

Во многих случаях при последующем метаморфизме в них образовались марганцевосиликатные породы и силикатно-карбонатные марганцевые руды с графитом, близкие по минеральному составу и особенностям образования к марганцевосиликатным и спессартин-кварцевым породам Сихотэ-Алиня. Марганцевосиликатные породы и силикат-

но-карбонатные марганцевые руды являются широко распространенными образованиями. Их примерами могут служить карбонатно-марганцевосиликатные породы в верхнеюрских радиоляритах Альп (Peters et al., 1973, 1978; Trommsdorff et al., 1970; и др.), девонские оксидно-карбонатно-силикатные, оксидно-силикатные руды и марганцевосиликатные породы Урала (Брусницын, 2000; Старикова и др., 2004; Брусницын, Жуков, 2005; и др.), а также триасовые пластовые месторождения Японии (Ватанабэ и др., 1973; Sato, 1980) оксидно-карбонатно-марганцевосиликатного типа. Спессартин-кварцевые породы известны в родонитовых месторождениях Урала (Прибавкин и др., 2018; и др.) и других регионов. Все эти образования, как и марганцевосиликатные и спессартин-кварцевые породы Сихотэ-Алиня, согласно залегают в силицитовых горизонтах, они образовались в результате контактового или регионального метаморфизма богатых марганцевыми карбонатами отложений. В изучение минералогии, минеральных ассоциаций и условий метаморфизма подобных образований значительный вклад внесли П. Браун, Э. Петерсен, Х. Момои, В. Мареш, А. Моттана, Я. Абрехт, Т. Петерс, А.И. Брусницын, И.Г. Жуков, Е.В. Старикова, Е.Г. Ожогина, В. Мэйсон, К. Ишида и другие исследователи.

Выяснение особенностей происхождения марганцевосиликатных пород Сихотэ-Алиня потребовало решения ряда важнейших вопросов, в том числе определения геологических условий залегания (пластовой и линзовидной морфологии рудных тел, триасового возраста, согласного залегания в кремнистых породах триасового возраста). Кроме того, потребовались обнаружение кремнисто-родохрозитовых пород и получение доказательств, что они являются протолитами марганцевосиликатных пород, выяснение их диагенетического происхождения в осадках, обогащенных органическим веществом, выяснение источника Mn (по геологическим, геохимическим и изотопным данным), а также доказательства контактовой природы метаморфизма, приводившего к преобразованию протолитов в марганцевосиликатные породы в их нынешнем виде. Решение этих вопросов позволило сформировать целостную картину происхождения марганцевосиликатных пород в рамках геологической истории Сихотэ-Алиня (Казаченко и др., 2016), которая почти во всех отношениях применима и к вмещающим их спессартин-кварцевым породам. При этом существовали причины, обусловившие появление спессартин-кварцевых пород вместо марганцевосиликатных и их существенные минералогические различия. Выяснение этих причин на основе сравнительной минералогической характеристики марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня и являлось целью данного исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор каменного материала для исследований проводился штучным способом. Для уверенной диагностики большинства минералов изученных пород, таких как гранат, полевые шпаты, слюды, хлорит, эпидот, алланит, ильменит, монацит, циркон, апатит и пироксен, было достаточно изучения оптических свойств и морфологии кристаллов под микроскопом, а также определения их состава. Диагностика некоторых редких минералов, присутствующих в виде мелких единичных зерен из-за отсутствия возможности использования других методов, выполнена только по результатам определения состава. Анализы минералов (в аншлифах) проводились в ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight (табл. 1, 2) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 1×10^{-8} А. Для обеспечения электропроводимости применялось графитовое напыление. В качестве стандартов использованы чистые металлы, зерна минералов (проанализированные другими методами), а также набор эталонов, поставляемых фирмой Agar Scientific.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спессартин-кварцевые породы содержат многочисленные мельчайшие включения спессартина и пиррофанита (рис. 5), которыми и обусловлена их коричневая окраска (см. рис. 4б). Яшмы и спессартин-кварцевые породы занимают одинаковое положение в разрезе триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня и имеют одинаковый или очень близкий возраст. Они приурочены к основанию “кремневой” толщи. В шлифах спессартин-кварцевых пород Широкопаднинской площади Ольгинского района, отобранных у обоих контактов рудоносной пачки (см. рис. 3), обнаружены многочисленные сферы *Triassocampe* sp., *Tripocyclia* sp., *Spongosaturnalis* sp., обломки конодонтов. После препарирования проб яшм Широкопаднинской площади выявлены многочисленные сферы – *Tripocyclia* sp., *Triassocampe* sp. (возможно, несколько видов). Род *Triassocampe* широко распространен в триасе Приморья, Хабаровского края, Сахалина, Японии и Карелии. По результатам палеонтологических исследований возраст яшм и спессартин-кварцевых пород отвечает среднему-позднему триасу (Казаченко, 2002). Более точно возраст яшм триасовой кремневой формации определен Ю.Г. Волохиным с соавторами по конодонтам. Согласно их данным, время появления этих пород (точнее, их протолитов) соответствует позднему анизию–ладину (Волохин и др., 2003).

Спессартин-кварцевые породы Горной площади наряду с кварцем, спессартином и пиррофа-

Таблица 1. Результаты изучения химического состава минералов спессартин-кварцевых пород Горной площади Малиновского рудного района, мас. %
Table 1. Results of the study of the chemical composition minerals of spessartine-quartz rocks in the Gornaya area of the Malinovsky ore district, wt %

№ п.п.	F	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Ti	Mn	Fe	Zr	Y	La	Ce	Nd	Th	Сумма*	Формула
1	—	—	9.85	29.66	12.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.10	$(K_{0.88}Na_{0.05}Ba_{0.07})_{1.00}Al_{1.00}(Si_{2.97}Al_{0.03})_{3.00}O_8$
2	—	0.58	14.97	18.43	0.89	0.32	—	0.29	—	2.99	—	—	—	—	—	—	76.16	$(Al_{3.49}Fe_{0.34}Ti_{0.04})_{3.87}Si_{4.13}O_{10}(OH)_8$
3	—	1.60	5.44	12.98	4.27	—	—	—	—	28.34	—	—	—	—	—	—	99.24	$(K_{0.82}Na_{0.09})_{0.91}(Fe_{2.63}Mg_{0.37})_{3.00}(Al_{0.76}Fe_{0.24})_{1.00}(Si_{2.62}Al_{0.38})_{3.00}O_{10}(OH)_2$
4	—	7.00	10.74	11.68	—	—	—	—	0.62	21.59	—	—	—	—	—	—	92.67	$(Mg_{1.9}Fe_{2.56}Mn_{0.08}Al_{1.39})_{5.94}□_{0.06}(Si_{2.75}Al_{1.25})_{4.00}O_{10}(OH)_8$
5	—	8.96	10.77	12.13	—	—	—	—	0.62	18.01	—	—	—	—	—	—	92.81	$(Mg_{2.38}Fe_{2.09}Mn_{0.07}Al_{0.16})_{4.70}□_{0.09}Al_{1.21}(Si_{2.79}Al_{1.21})_{4.00}O_{10}(OH)_8$
6	—	—	14.95	18.46	—	16.90	—	—	—	3.93	—	—	—	—	—	—	99.22	$Ca_{1.98}(Al_{0.60}Fe_{0.33})_{0.93}Al_{2.00}Si_{3.08}O_{12}(OH)$
7	—	—	13.92	17.88	—	16.36	—	—	—	5.29	—	—	—	—	—	—	98.11	$Ca_{1.97}(Al_{0.49}Fe_{0.46})_{0.95}Al_{2.00}Si_{3.08}O_{12}(OH)$
8	—	4.58	0.37	24.83	—	15.09	—	—	3.49	9.33	—	—	—	—	—	—	99.83	$(Ca_{0.89}Sc_{0.02}Mn_{0.09})_{1.00}(Mg_{0.44}Fe_{0.39}Mn_{0.06}Al_{0.03})_{0.92}Si_{2.08}O_6$
9	2.04	0.93	10.56	17.39	—	2.99	—	0.20	16.27	10.20	—	—	—	—	—	—	97.34	$(Mn_{1.47}Fe_{0.89}Ca_{0.37})_{2.92}(Al_{1.95}Ti_{0.02}Fe_{0.03})_{2.00}Si_{3.08}O_{12}$
10	—	0.25	10.50	18.16	—	8.67	—	0.30	17.12	5.18	—	—	—	—	—	—	99.62	$(Mn_{1.49}Fe_{0.33}Ca_{1.04}Mg_{0.05})_{2.91}(Al_{1.86}Ti_{0.03}Fe_{0.11})_{2.00}Si_{3.05}O_{12}$
11	—	0.76	10.93	18.29	—	3.36	—	—	19.97	7.82	—	—	—	—	—	—	100.45	$(Mn_{1.74}Fe_{0.60}Ca_{0.40}Mg_{0.15})_{2.89}(Al_{1.93}Fe_{0.07})_{2.00}Si_{3.11}O_{12}$
12	2.11	—	—	0.77	—	—	—	30.46	20.08	13.80	—	—	—	—	—	—	98.40	$(Mn_{0.59}Fe_{0.40})_{0.99}(TiO_3)_{1.01}$
13	—	—	—	0.92	—	—	—	31.08	17.75	16.86	—	—	—	—	—	—	100.27	$(Mn_{0.51}Fe_{0.47})_{0.98}(TiO_3)_{1.02}$
14	—	—	—	0.85	—	—	—	29.91	14.84	20.24	—	—	—	—	—	—	99.85	$(Fe_{0.57}Mn_{0.43})_{1.00}(Ti_{0.98}V_{0.02})_{1.00}O_3$
15	—	—	—	2.05	—	—	—	28.22	12.62	20.37	—	—	—	—	—	—	98.01	$(Fe_{0.62}Mn_{0.38})_{1.00}(TiO_3)_{1.00}$
16	—	—	4.11	6.14	—	—	9.39	—	—	1.20	—	—	4.26	6.28	4.79	21.95	99.28	$(Ca_{0.32}Th_{0.31}Ce_{0.13}Nd_{0.11}La_{0.10}Gd_{0.02})_{1.01}(PO_4)_{0.99}$
17	—	—	0.30	1.72	—	—	—	—	—	6.40	64.34	—	—	—	—	—	97.86	$(Zr_{0.99}Hf_{0.01})_{1.00}O_2$
18	—	—	0.84	6.59	—	—	10.09	—	—	—	—	—	8.55	19.66	7.34	7.38	98.91	$(Ce_{0.44}La_{0.19}Nd_{0.16}Th_{0.10}Ca_{0.09})_{0.98}(PO_4)_{1.02}$
19	—	—	1.77	22.20	—	1.26	7.57	—	—	—	—	—	7.81	15.41	5.53	—	99.11	$(Ce_{0.46}La_{0.23}Nd_{0.16}Ca_{0.13})_{0.98}(PO_4)_{1.02}$
20	—	—	—	12.32	—	0.22	—	—	—	—	—	—	16.09	30.82	6.47	—	88.16	$(Ce_{0.54}La_{0.29}Nd_{0.11}Pr_{0.05}Ca_{0.01})_{1.00}(CO_3)(OH)$
21	—	—	5.37	2.12	—	—	—	—	—	—	—	—	15.81	31.07	5.49	—	78.01	$(Ce_{0.59}La_{0.31}Nd_{0.10})(CO_3)(OH)$
22	0.68	0.84	1.34	15.69	—	—	—	—	—	1.67	—	—	10.80	22.48	—	—	74.88	$(Ce_{0.67}La_{0.33})_{1.00}(CO_3)(OH)_{0.85}F_{0.15}$
23	—	1.12	2.78	9.51	—	—	—	—	—	—	—	—	13.77	21.58	3.86	—	79.16	$(Ce_{0.55}La_{0.35}Nd_{0.10})_{1.00}(CO_3)(OH)$
24	—	—	—	1.14	—	—	—	—	—	0.39	—	26.80	—	—	—	—	63.00	$(Y_{1.78}Dy_{0.15}Gd_{0.07})_{2.00}(CO_3)_3 \cdot nH_2O (?)$
25	5.09	—	7.13	15.29	—	20.51	—	11.53	—	0.36	—	—	—	—	—	—	97.84	$Ca_{0.99}(Ti_{0.46}Al_{0.51}Fe_{0.01})_{0.98}Si_{1.03}O_4F_{0.51}(OH)_{0.01}$
26	3.68	—	5.13	14.73	—	20.53	—	14.69	—	—	—	—	—	—	—	—	97.05	$Ca_{1.00}(Ti_{0.60}Al_{0.37})_{0.97}Si_{1.03}O_4F_{0.61}(OH)_{0.39}$
27	3.95	—	5.88	15.58	—	21.00	—	13.85	—	—	—	—	—	—	—	—	99.49	$Ca_{0.99}(Ti_{0.55}Al_{0.41})_{0.96}Si_{1.05}O_4F_{0.99}(OH)_{0.02}F_{0.39}$

Примечание. В анализах, кроме того: 1 – 0.39 Na и 3.66 Ba; 3 – 0.35 Na; 8 – 0.30 Se; 14 – 0.62 V; 16 – 1.18 Gd; 17 – 1.35 Hf; 20 – 2.70 Pr; 21 – 0.21 Ni; 24 – 1.10 Co, 2.07 Gd и 4.07 Dy. Минералы: калиевый полевой шпат (1), каолинит (2), анит (3), шамозит (4), клинохлор (5), клинозоисит (6, 7), марганцовый пироксен диоксид-геденбергитового ряда (8), спессартин (9–11), пирофанит (12, 13), ильменит (14, 15), чералит (16), бадделейт (17), моназит (18, 19), бастнезит (20–23), тенгерит-(Y)(?) (24), титанит (25–27). Про- черк – не обнаружено. *Суммы элементов включают в себя опущенные в таблице содержания кислорода, □ – вакансии.

Note. In addition, to analyses: 1 – 0.39 Na, 3.66 Ba; 3 – 0.35 Na; 8 – 0.30 Se; 14 – 0.62 V; 16 – 1.18 Gd; 17 – 1.35 Hf; 20 – 2.70 Pr; 21 – 0.21 Ni; 24 – 1.10 Co, 2.07 Gd, 4.07 Dy. Miner- als: potassic feldspar (1), kaolinite (2), annite (3), chamosite (4), clinocllore (5), clinzoisite (6, 7), manganous pyroxene of diopside-hedenbergite series (8), spessartine (9–11), pyroph- anite (12, 13), ilmenite (14, 15), cheralite (16), baddeleyite (17), monazite (18, 19), bastnesite (20–23), tengerite-(Y)(?) (24), titanite (25–27). Dash – not detected. *Amounts of elements include the omitted oxygen content in the table, □ – vacant positions.

Таблица 2. Результаты изучения состава минералов спессартин-кварцевых пород Широкопадинской площади на рентгеноспектральном микроанализаторе, мас. %

Table 2. Results of the study of minerals of spessartine-quartz rocks of the Shirokopadninskaya area using the X-ray spectral microprobe, wt. %

№ п.п.	F	Mg	Na	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zr	La	Ce	Nd	Th	Сумма*	Минерал	Формула
1	—	—	8.18	10.03	31.95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	98.24	Альбит	$\text{Na}_{0.95}\text{Al}_{1.00}\text{Si}_{3.03}\text{O}_8$
2	—	5.90	—	10.85	15.26	—	4.51	—	0.50	1.10	17.36	—	—	—	—	—	98.81	Бiotит	$\text{K}_{0.53}(\text{Mg}_{1.11}\text{Fe}_{1.42}\text{Mn}_{0.09}\text{Al}_{0.38})_{3.00}(\text{Al}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{1.00}(\text{Si}_{2.49}\text{Al}_{0.51})_{3.00}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
3	—	5.64	—	9.79	16.81	—	7.93	—	0.49	0.94	14.54	—	—	—	—	—	97.51	Бiotит	$\text{K}_{0.82}(\text{Mg}_{0.93}\text{Fe}_{1.00}\text{Mn}_{0.07})_{3.00}(\text{Al}_{0.90}\text{Fe}_{0.06}\text{Ti}_{0.04})_{1.00}(\text{Si}_{2.49}\text{Al}_{0.57})_{3.00}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
4	—	7.71	—	12.04	12.96	—	0.35	—	—	2.19	20.21	—	—	—	—	—	97.92	Шамозит	$(\text{Mg}_{1.02}\text{Mn}_{0.24}\text{Fe}_{2.19}\text{Al}_{1.50})_{3.88}\square_{0.15}(\text{Al}_{1.20}\text{Si}_{2.80})_{4.00}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
5	—	—	—	1.25	18.67	—	0.33	—	—	—	41.53	—	—	—	—	—	99.25	Ферросилит	$\text{Fe}_{1.02}(\text{Si}_{0.92}\text{Al}_{0.06})_{0.98}\text{O}_{3.22}$
6	—	0.57	—	7.63	1.76	—	—	1.35	28.98	—	—	20.45	—	—	—	—	99.32	Кармелтазит	$\text{Zr}_{1.06}(\text{Al}_{1.83}\text{Sc}_{0.21})_{2.04}\text{Ti}_{3.90}\text{O}_{14}$
7	—	—	—	11.37	16.43	—	—	7.43	—	3.36	9.09	—	2.69	9.13	3.00	—	98.45	Алланит	$(\text{Ca}_{0.97}\text{Ce}_{0.34}\text{Nd}_{0.11}\text{La}_{0.10}\text{Mn}_{0.32})_{1.84}(\text{Fe}_{0.86}\text{Al}_{2.22})_{3.08}\text{Si}_{3.08}\text{O}_{12}(\text{O},\text{OH})$
8	—	—	—	1.40	15.21	9.97	—	—	—	—	—	—	13.54	23.72	5.86	—	102.75	Монацит	$(\text{Ce}_{0.54}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.13})_{0.98}(\text{PO}_4)_{1.02}$
9	—	—	—	4.91	14.81	6.82	—	2.46	—	—	1.26	—	4.03	9.28	3.57	14.17	96.59	Чералит	$(\text{Ce}_{0.28}\text{Ca}_{0.26}\text{Th}_{0.26}\text{La}_{0.12}\text{Nd}_{0.10})_{1.02}(\text{PO}_4)_{0.93}(\text{SO}_4)_{0.05}$
10	—	0.42	—	1.48	29.32	2.40	0.75	0.43	—	—	0.86	—	—	—	—	21.16	101.56	Грэйит	$\text{Th}_{1.08}(\text{PO}_4)_{0.92}\cdot\text{H}_2\text{O}$
11	—	2.19	—	3.47	14.53	—	0.68	0.57	—	0.57	4.65	—	—	—	—	36.27	98.81	Торианит	ThO_2
12	—	1.46	—	2.01	8.75	—	—	0.80	—	0.65	3.11	—	—	—	—	52.84	102.45	Торианит	$(\text{Th}_{0.97}\text{U}_{0.03})\text{O}_2$
13	3.46	—	—	—	0.59	17.44	—	37.67	—	—	0.55	—	—	—	—	—	98.12	Апатит	$\text{Ca}_{5.00}(\text{PO}_4)_3\text{F}_{0.97}(\text{OH})_{0.03}$
14	—	—	—	—	14.71	—	—	—	—	—	0.45	48.65	—	—	—	—	98.41	Циркон	$(\text{Zr}_{1.05}\text{Hf}_{0.08}\text{Sr}_{0.04})_{1.10}(\text{SiO}_4)_{0.90}$
15	1.78	0.26	—	10.62	17.36	—	—	1.10	—	20.79	9.18	—	—	—	—	—	97.40	Спессартин	$(\text{Mn}_{1.90}\text{Fe}_{0.83}\text{Ca}_{0.14}\text{Mg}_{0.05})_{2.92}\text{Al}_{1.98}\text{Si}_{3.10}\text{O}_{12}$
16	—	—	—	10.65	16.66	—	—	1.07	0.23	23.63	7.51	—	—	—	—	—	99.60	Спессартин	$(\text{Mn}_{2.19}\text{Fe}_{0.68}\text{Ca}_{0.13})_{2.99}(\text{Al}_{1.99}\text{Ti}_{0.02})_{1.01}\text{Si}_{3.00}\text{O}_{22}$
17	—	—	—	10.56	16.99	—	—	1.05	—	25.17	5.92	—	—	—	—	—	98.64	Спессартин	$(\text{Mn}_{2.31}\text{Fe}_{0.51}\text{Ca}_{0.13})_{2.95}(\text{Al}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{Si}_{3.05}\text{O}_{22}$
18	—	—	—	0.33	3.59	—	0.20	—	28.14	16.18	17.69	—	—	—	—	—	97.51	Ильменит	$(\text{Fe}_{0.53}\text{Mn}_{0.49})_{1.02}(\text{TiO}_3)_{0.98}$
19	—	—	—	—	0.24	—	—	—	31.29	16.34	17.91	—	—	—	—	—	99.91	Ильменит	$(\text{Fe}_{0.50}\text{Mn}_{0.47})_{0.97}(\text{TiO}_3)_{1.03}$
20	—	0.37	—	2.18	15.40	—	1.25	—	19.12	11.88	10.40	—	—	—	—	—	103.38	Пирофанит	$(\text{Mn}_{0.54}\text{Fe}_{0.46})_{1.00}(\text{TiO}_3)_{1.00}$
21	—	—	—	0.22	1.38	—	—	—	30.93	19.99	12.96	—	—	—	—	—	98.42	Пирофанит	$(\text{Mn}_{0.58}\text{Fe}_{0.37}\text{Zn}_{0.02})_{0.97}(\text{TiO}_3)_{1.03}$
22	—	—	—	0.58	7.11	—	0.38	—	25.42	18.22	10.65	—	—	—	—	—	98.33	Пирофанит	$(\text{Mn}_{0.63}\text{Fe}_{0.36})_{0.99}(\text{TiO}_3)_{1.01}$

Примечание. В анализах, кроме того: 3 – 0.17 Cl; 6 – 1.46 Sc; 9 – 0.37 S; 10 – 0.26 S; 12 – 1.67 U; 14 – 1.73 Sr, 1.03 Hf; 21 – 0.80 Zn. Формула рассчитана после вычета циркония по кремнию на циркон. Прочерк – не обнаружено. *Суммы элементов включают в себя опущенные в таблице содержания кислорода, □ – вакансии.

Note. In addition, in the analyses: 3 – 0.17 Cl; 6 – 1.46 Sc; 9 – 0.37 S; 10 – 0.26 S; 12 – 1.67 U; 14 – 1.73 Sr, 1.03 Hf; 21 – 0.80 Zn. The formula is calculated after the deduction of zirconium to silicon in zircon. Dash – not detected. *Amounts of elements include the omitted oxygen content in the table, □ – vacant positions..

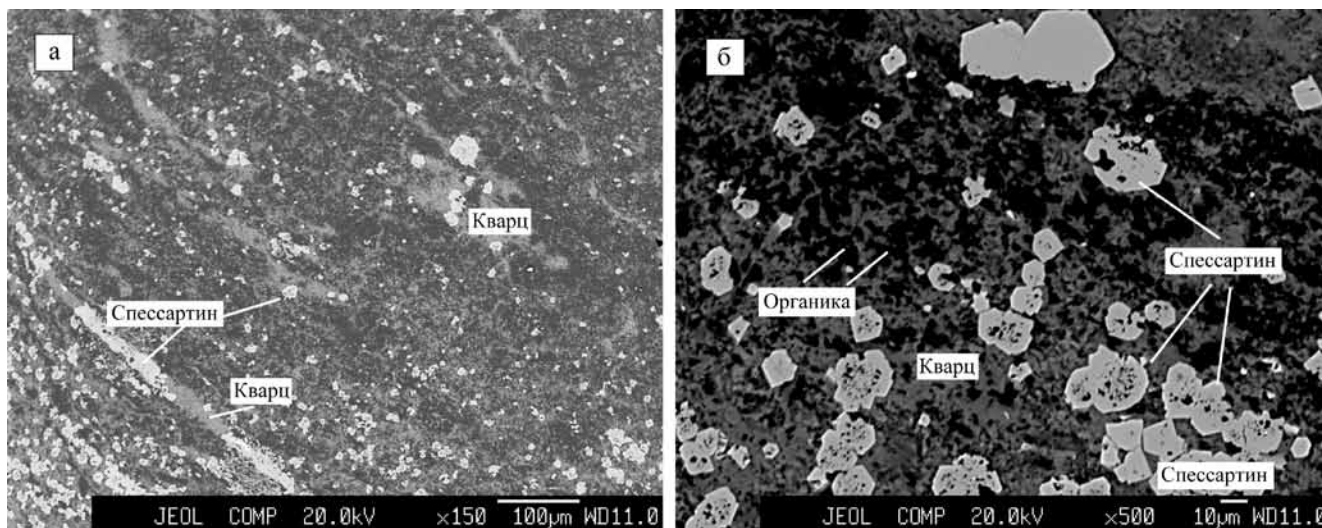


Рис. 5. Внутреннее строение спессартин-кварцевых пород.

а – мелкий план, видны кварцевые зонки перекристаллизации пород вдоль микротрещин с крупными участками спессартина; б – относительно крупный план.

Fig. 5. Internal structure of spessartine-quartz rocks.

а – small plan, quartz signs of recrystallization of rocks along microcracks with large areas of spessartine; б – and relatively large plan.

нитом содержат калиевый полевой шпат, хлорит, аннит, клиноцоизит, клинопироксен и другие минералы. В калиевом полевоом шпате присутствует до 5 мол. % альбитового минала (см. табл. 1). Этот минерал слагает зональные кристаллы, краевые части которых обогащены Ва. Встречается каолинит (в гнездах и прожилках вместе с гидроксидами Fe и Mn), являющийся продуктом экзогенного изменения полевых шпатов. Аннит, наблюдаемый в яшмах в виде отдельных рассеянных чешуек или их агрегатов, содержит немного Na и Mg. Хлорит слагает бесформенные гнезда и маломощные прожилки. В таких прожилках и вдоль их контактов присутствуют скопления чешуек биотита. Хлорит обогащен Mn и характеризуется непостоянными содержаниями Mg и Fe. Клиноцоизит образует срастания с пятнисто-неоднородным по составу хлоритом и калиевым полевым шпатом. Этот минерал содержит немного Fe. Пироксен встречается редко, в виде единичных кристаллов и относится к диопсид-геденбергитовому ряду. Он обогащен Mn и представлен салитом с примерно одинаковыми содержаниями диопсидового и геденбергитового миналов и небольшим количеством Sc и Al.

Богатые Mn породообразующие минералы представлены спессартином и членами ильменит-пирофанитового изоморфного ряда. Спессартин относится к богатой алмандиновым и гроссуляровым миналами (см. табл. 1) разновидности. Кроме того, он содержит до 6.5 мол. % пироповой ком-

поненты и немного Ti. Этот минерал характеризуется непостоянством размеров кристаллов и их состава, особенно в отношении содержаний Ca и Mn. Члены ильменит-пирофанитового ряда – высокомарганцовистый ильменит и высокожелезистый пирофанит – слагают многочисленные кристаллы или участки неправильной формы. Ильменит иногда представлен V-содержащей разновидностью.

К циркониевым минералам относится циркон и Hf-содержащий бадделейт (см. табл. 1). Их редкие и мелкие кристаллы рассеяны в объеме породы. Апатит относится к высокофтористой разновидности (F-апатиту).

В спессартин-кварцевых породах Горной площади присутствует группа минералов РЗЭ. Наиболее распространенными являются монацит и бастнезит. Оба минерала обогащены (в порядке убывания их содержаний) Ce, La и Nd (см. табл. 1). Монацит и бастнезит обычно слагают кристаллы сечением до 3×4 мкм, рассеянные в массе породы или образующие скопления в прожилках органического вещества. Структурные особенности монацита подразумевают возможность гетеровалентных замещений, определяющих сопряженное (из-за необходимости компенсации избыточного заряда) вхождение в этот минерал некоторых двух- и четырехвалентных элементов с отношением их атомных количеств как 1:1. Крайние, изоструктурные монациту, члены таких изоморфных рядов, когда двухвалентный элемент представлен Са, известны в качестве природного минерала чералита

$\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$ и искусственных химических соединений $\text{CaCe}(\text{PO}_4)_2$, $\text{CaU}(\text{PO}_4)_2$ и $\text{CaNp}(\text{PO}_4)_2$ (Borhan et al., 2010). Группировки $(\text{PO}_4)^{3-}$ в монаците могут замещаться группировками $(\text{SiO}_4)^{4-}$ с компенсацией избыточного отрицательного заряда путем замещения REE^{+3} четырехвалентным Th вплоть до образования хаттонита ThSiO_4 (Pabst, 1951). Таким образом, природные минералы монацитовой группы относятся к непрерывной монацит-чералит-хаттонитовой изоморфной серии. В ограниченном количестве в минералах этой серии могут присутствовать Sr и U, замещающие Ca и Th соответственно. Чералитом первоначально был назван минерал $\text{Th}_{0.3}\text{Ca}_{0.3}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.1}\text{La}_{0.1}\text{REE}_{0.05}(\text{PO}_4)_{0.9}(\text{SiO}_4)_{0.1}$ из штата Керала (Индия) (Bowie, Horne, 1953). Впоследствии для чералита в качестве идеальной была принята формула $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$ (Linhout, 2007). Монацит из спессартин-кварцевых пород Горной площади, как правило, обогащен Th и Ca, количество атомов которых в формуле обычно практически одинаково (см. табл. 1). Это указывает на то, что компенсация избыточного заряда в монаците при замещении REE^{+3} четырехвалентным Th происходила путем замещения REE^{+3} двухвалентным Ca с образованием чералитового минерала. Другими словами, монацит из спессартин-кварцевых пород Горной площади относится к монацит-чералитовому изоморфному ряду $2\text{REE}(\text{PO}_4)-\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$. В сростаниях с хлоритом встречается минерал монацит-чералитового ряда, в котором чералитовый минерал $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$ преобладает над монацитовым. По составу (см. табл. 1) чералит Горной площади близок к упомянутому минералу из штата Керала (Индия). Составы минералов монацит-чералитового ряда из спессартин-кварцевых пород Горной площади вынесены на классификационную диаграмму (рис. 6). Положение точки богатого Ca и Th члена этого ряда подтверждает правомерность его отнесения к чералиту. В чералите Горной площади, как и в индийском минерале, содержание кальциевого, ториевого и редкоземельного минералов примерно одинаковы. В багнетизе иногда в заметном количестве присутствует Pr или F.

В спессартин-кварцевых породах Горной площади встречаются рассеянные включения минерала, анализы которого пересчитываются на идеальную формулу редкого в природе, обогащенного Dy и Gd карбоната Y – тенгерита-(Y) (см. табл. 1). Его окончательная диагностика, требующая подтверждения другими методами, затруднена из-за малых размеров и редкой встречаемости зерен этого минерала. Тенгерит (?) из спессартин-кварцевых пород Горной площади, как тенгерит из Иттерби и Иисака (Miyawaki et al., 1993), обогащен Dy и Gd.

В спессартин-кварцевых породах Горной площади встречается фтор-глиноземистый титанит – его редкая разновидность, в которой иногда до половины Ti (и даже несколько более) замещены Al.

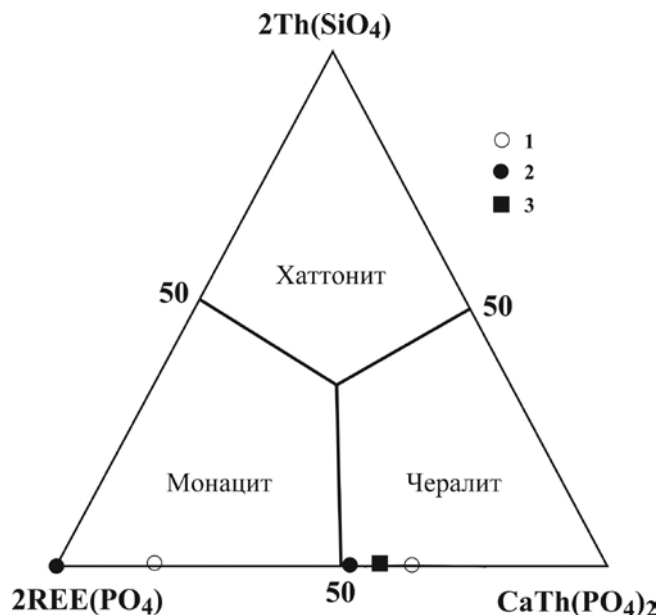


Рис. 6. Положение точек чералита из спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня на классификационной диаграмме $2\text{REE}(\text{PO}_4)-\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2-2\text{Th}(\text{SiO}_4)$ (Linhout, 2007).

1, 2 – минералы монацит-чералитового изоморфного ряда из спессартин-кварцевых пород Горной (1) и Широкопаднинской (2) площадей Сихотэ-Алиня; 3 – чералит из Индии.

Fig. 6. The position of the points of cheralite of spessartine-quartz rocks of the Sikhote-Alin on the classification chart $2\text{REE}(\text{PO}_4)-\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2-2\text{Th}(\text{SiO}_4)$ (Linhout, 2007).

1, 2 – minerals of monazite-cheralite isomorphous series from spessartine-quartz rocks of the Gornaya (1) and Shirokaya Pad' (2) areas of the Sikhote-Alin; 3 – cheralite from India.

Кроме основных элементов, а также Al и F, в титаните иногда присутствует незначительная примесь Mn и Fe. Состав минерала непостоянен главным образом в отношении содержания Ti и Al, а также O и F (см. табл. 1). Фтор-глиноземистый титанит встречается в виде многочисленных рассеянных в кварце однородных по составу кристаллов размером до 10×30 мкм (рис. 7). Более крупные кристаллы (с размером сечения до 200×200 мкм) отмечались в сростании с зернами спессартина и крупными чешуйками хлорита. Иногда кристаллы фтор-глиноземистого титанита с включениями пирофанита присутствуют в относительно крупных хлоритовых чешуйках. Вместе с этим минералом в породе, сложенной главным образом кварцем и содержащей многочисленные кристаллы и неправильной формы участки обогащенного Ba (до 3.66 мас. %) калиевого полевого шпата и хлорита, обнаружены многочисленные зерна

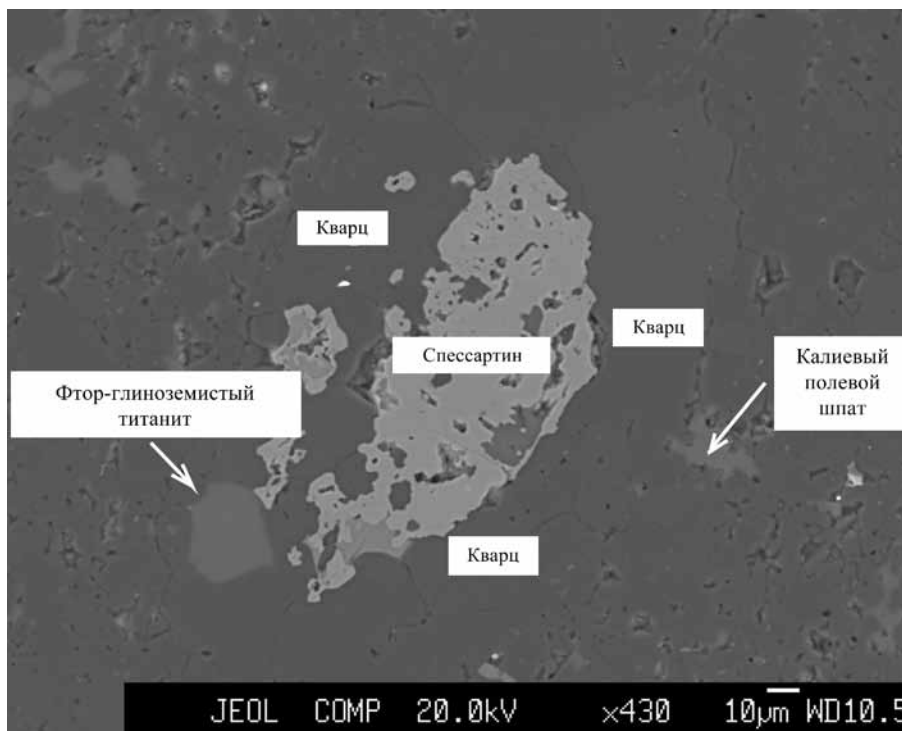


Рис. 7. Кристалл фтор-глиноземистого титанита в спессартин-кварцевой породе Горной площади.

Fig. 7. Crystal of fluorine-alumina titanite in spessartine-quartz rock of the Gornaya area.

V-содержащих разновидностей железистого пиррофанита и марганцовистого ильменита (см. табл. 1), а также клиноцоизита, гранатаgrossуляр-спессартинового и альмандин-спессартинового состава и F-апатита. Встречаются мелкие зерна и кристаллы барита ($\text{Ba}_{0.94}\text{Ca}_{0.02}\text{SO}_4$), циркона, бадделита и чералита.

В виде зерен размером первые микрометры–десятки микрометров в спессартин-кварцевых породах Горной площади присутствуют касситерит, Ni-содержащий пирротин ($\text{Fe}_{0.89}\text{Ni}_{0.05}\text{S}$), сфалерит ($\text{Zn}_{0.74}\text{Fe}_{0.23}\text{S}$), самородное Au (с Ag), “медистое золото”, миллерит, антимонит и молибденит. Встречаются включения и прожилки органического вещества.

В спессартин-кварцевых породах Широкопаднинской площади в качестве породообразующих минералов, наряду с кварцем, встречаются спессартин, пиррофанит, альбит, хлорит и биотит. Эти минералы слагают в кварце бесформенные гнезда, отдельные кристаллы и чешуйки или присутствуют в составе маломощных прожилков. Альбит не содержит примеси анортитового минала (см. табл. 2). Биотит обогащен Mn. В нем, кроме того, присутствует немного Ti. Хлорит относится к марганцовистой (до 2.19 мас. % Mn) разновидности.

Спессартин образует россыпь мельчайших или относительно крупных кристаллов (см. рис. 5), осо-

бенности распределения которых, как и обособлений других минералов, иногда подчеркивают первичную слоистость пород (см. рис. 5а). Для спессартин-кварцевых пород характерны микротрещины, вдоль которых они испытали перекристаллизацию с увеличением размеров кристаллов главным образом кварца и спессартина. Последний содержит существенную долю альмандинового и небольшое количество grossулярового миналов. Иногда в его составе присутствует немного Mg или Ti (см. табл. 2). В крупных кристаллах спессартина отмечались включения ульманита, миллерита, оксида или, возможно, карбоната Ce и La. Встречаются прожилки биотит-спессартинового состава или спессартина с многочисленными включениями монацита. Пиррофанит и ильменит, граница между которыми условно проводится по содержанию ильменитового и пиррофанитового миналов в 50 мол. %, слагают в породе многочисленные кристаллы удлиненного сечения. Пиррофанит встречается значительно чаще ильменита. Он содержит мелкие включения монацита и иногда образует срастания с хлоритом. Этот минерал имеет изменчивый состав (см. табл. 2), но в целом богат ильменитовым миналом, содержание которого иногда приближается к 50 мол. %, а ильменит богат пиррофанитовым миналом, количество которого достигает 48 мол. %. Вследствие этого составы пиррофа-

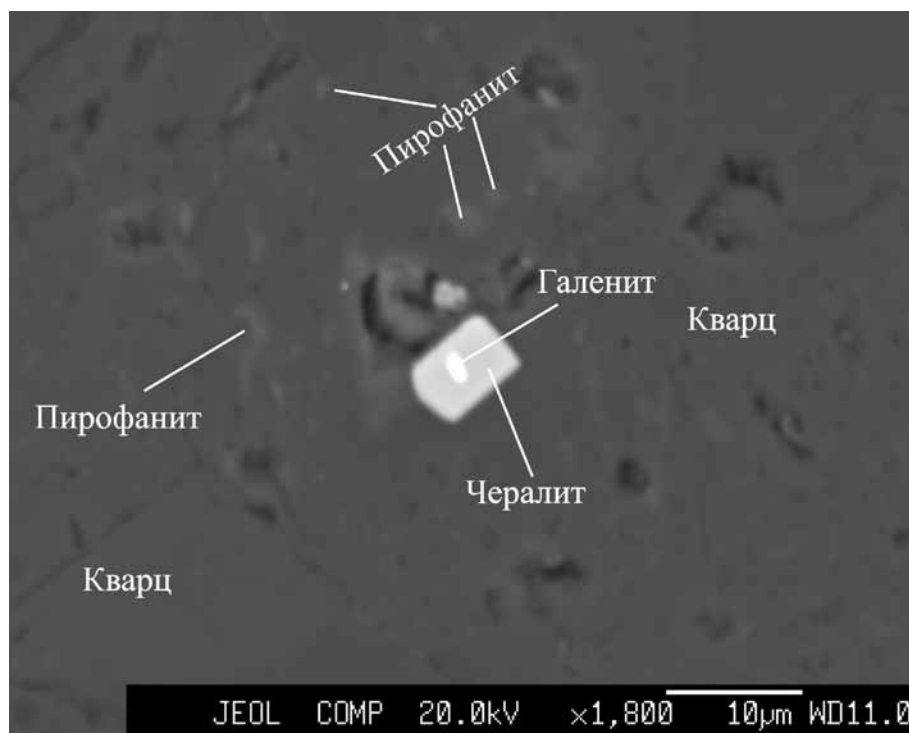


Рис. 8. Кристалл чералита (с включением галенита) в спессартин-кварцевой породе Широкопаднинской площади.

Fig. 8. Cheralite crystal (with the inclusion of galenite) in spessartine-quartz rock in Shirokaya Pad' area.

нита и ильменита в спессартин-кварцевых породах Широкопаднинской площади в некоторых случаях очень близки. Пирофанит иногда содержит немного Zn (см. табл. 2) в виде экандрюситового минала, количество которого не превышает 2 мол. %.

Спессартин-кварцевые породы Широкопаднинской площади содержат разнообразную аксессуарную минерализацию. Минералы REE представлены алланитом, монацитом и чералитом. Алланит, встречающийся в виде редких рассеянных зерен, обогащен Mn и относительно беден REE (см. табл. 2), из которых прибором обнаружены только Ce, La и Nd. Монацит, иногда присутствующий в виде скоплений многочисленных кристаллов, тоже обогащен Ce, La и Nd и не содержит чералитового или хаттонитового миналов. Чералит (см. табл. 2) встречается в виде отдельных кристаллов, иногда вмещающих каплевидные включения галенита (рис. 8). Содержание чералитового минала в этом минерале (52 мол. %) лишь незначительно превышает содержание монацитового (48 мол. %). Правомочность его отнесения к чералиту подтверждает положение точки состава на классификационной диаграмме (см. рис. 6).

Среди ториевых минералов в спессартин-кварцевых породах Широкопаднинской площади наиболее распространен торинит, иногда содержащий примесь U и образующий отдельные рассеянные в породе кристаллы или многочисленные

мельчайшие включения в биотите спессартин-биотитовых (с органическим веществом) прожилковидных зоннок. Реже попадаются единичные включения редкого в природе фосфата Th – грэйита (см. табл. 2). Встречаются также редкие рассеянные включения фторапатита, в котором практически все позиции гидроксильной группы заняты F, а также Hf-, и Sr-содержащего циркона и очень редкого в природе циркониевого минерала – кармелтазита $ZrAl_2Ti_4O_{11}$ (см. табл. 2), содержащего мельчайшие включения циркона или образующего с ним сростания. Кармелтазит, причисленный к драгоценным камням, в качестве нового минерала был описан в корундовых агрегатах из основных и ультраосновных пирокластических пород на севере Израиля, в районе г. Кармель в 2018 г. Ранее он был известен только в метеорите Альянде, упавшем на Землю в 1962 г. Кармелтазит обладает высокой твердостью, превышающей таковую алмаза. По представлениям (Griffin et al., 2018), этот минерал из Израиля образовался на границе земной коры и мантии, на глубине около 30 км. В спессартин-кварцевых породах Широкопаднинской площади обнаружены также включения кобальтина, ульманита, Ni- и Co-содержащего пирротина ($Fe_{0.91-0.95}Co_{0.05-0.01}Ni_{0.04-0.03}S_{1.00}$), умеренно-железистого сфалерита ($Zn_{0.85}Fe_{0.13}S_{1.02}$), халькозина $Cu_{1.83}S_{1.00}$, цинксоодержащего кубани-

та $(\text{Cu}_{0.90}\text{Zn}_{0.21})_{1.11}\text{Fe}_{1.91}\text{S}_{2.98}$ и соединения CuFe_3S_4 (по анализу – $\text{Cu}_{1.00}(\text{Fe}_{2.88}\text{Ni}_{0.03})_{2.91}\text{S}_{4.09}$). Встречаются барит и халькопирит, слагающие маломощные прожилки, а также цинкит, ковеллин, шеелит, касситерит, галенит и “медистое золото”.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наряду с пластовой или линзообразной формой тел и их согласным залеганием в кремнистых отложениях триасового возраста большое значение для понимания генезиса марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня имело обнаружение их протолитов. При проведении полевых исследований в Ольгинском рудном районе было выяснено, что марганцевосиликатные и спессартин-кварцевые породы за пределами контактового ореола позднемелового Широкопаднинского гранитоидного массива переходят в пластовые кремнистые породы, насыщенные криптокристаллическим родохрозитом и включениями органического вещества (Перевозникова, 2010). С удалением от кромки массива в марганцевосиликатных породах на фоне закономерного изменения структурных особенностей происходит смена высокотемпературных ассоциаций средне-низкотемпературными. Таким образом, установлено, что марганцевосиликатные и спессартин-кварцевые породы образовались в результате контактового метаморфизма кремнисто-родохрозитовых пород. Полученные выводы о морфологии тел, согласном залегании в кремнях и возникновении рассматриваемых пород в результате метаморфизма кремнисто-родохрозитовых пород очень важны в генетическом отношении. Они позволяют прийти к заключению, что исходным материалом являлись осадки триасового возраста и что важную роль в образовании марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород играли процессы диагенеза и контактового метаморфизма. Кремнисто-родохрозитовый состав подвергавшихся контактовому метаморфизму пород, присутствие в них органического вещества свидетельствуют о восстановительном характере диагенеза исходных отложений, в результате которого весь Mn был восстановлен до двухвалентного состояния. Эти обстоятельства указывают на обогащенность исходных осадков органическим веществом. Протолитами кремнисто-родохрозитовых пород, представляющих собой обогащенные родохрозитом радиоляриты или глинисто-кремнистые породы с многочисленными фрагментами радиолярий и органическим веществом, являлись, очевидно, обогащенные Mn и органикой биогенные кремнистые илы. Доминирование двухвалентных Mn и Fe в марганцевосиликатных породах при отсутствии минералов трех- и четырехвалентного Mn свидетельствует об унаследованности восстановительного режима при контактовом метаморфизме.

Эти выводы согласуются с результатами изучения подобных образований и часто сопутствующих им оксидно-карбонатно-силикатных и оксидно-силикатных марганцевых руд отечественными и зарубежными исследователями в других регионах планеты. Примерами могут служить карбонатно-марганцевосиликатные породы в верхнеюрских радиоляритах Альп (Trommsdorff et al., 1970; Peters et al., 1973, 1978; и др.), девонские оксидно-карбонатно-силикатные, оксидно-силикатные руды и марганцевосиликатные породы Урала (Старикова и др., 2004; Брусницын, Жуков, 2005; и др.), а также триасовые пластовые месторождения Японии (Ватанабэ и др., 1973; Sato, 1980) оксидно-карбонатно-марганцевосиликатного типа. Все они занимают стратифицированное положение в силицитовых горизонтах и образовались в результате контактового или регионального метаморфизма богатых марганцевыми карбонатами отложений.

Спессартин-кварцевые породы занимают одинаковое положение в разрезе триасовых отложений Таухинского и Самаркинского террейнов Сихотэ-Алиня – такое же, как и марганцевосиликатные породы. Это свидетельствует о синхронном накоплении осадков (протолитов этих пород) в едином осадочном бассейне. Марганцевосиликатные породы образовались при контактовом метаморфизме обогащенных родохрозитом кремнистых пород – в Таухинском террейне в позднем мелу при становлении крупных гранитоидных массивов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, а в Самаркинском террейне в раннемеловое время при формировании крупных гранитоидных тел Хунгари-Татибинского плутонического пояса. Спессартин-кварцевые породы, вмещающие марганцевосиликатные породы и являющиеся, как и последние, метаморфизованными аналогами обогащенных Mn триасовых осадков, имеют такое же происхождение. Образование марганцевосиликатных пород происходило в восстановительных условиях. Оно было связано главным образом с реакциями между кремнистым, карбонатным и глинистым веществом, протекавшими вследствие повышения температуры и приводившими к возникновению безглиноземистых силикатов двухвалентного Mn и спессартина. Такие же процессы и тоже в восстановительных условиях протекали и при формировании спессартин-кварцевых пород, с той лишь разницей, что они приводили к возникновению только спессартина. Из-за одинаковой природы протолитов и близких условий метаморфизма марганцевосиликатные и спессартин-кварцевые породы обнаруживают минералогическое сходство. Оно выражается в присутствии многих общих для них минералов, таких как спессартин, члены ильменит-пирофанитового ряда, титанит, монацит, бастнезит, алланит, апатит, циркон, бадделит, торинит и др. Содержания альмандиново-

го минала в спессартине спессартин-кварцевых пород Горной и Широкопаднинской площадей почти одинаковы. Спессартин из спессартин-кварцевых пород этих площадей, по сравнению с этим минералом из марганцевосиликатных пород Сихотэ-Алиня, богаче Fe, которое присутствует главным образом в двухвалентной форме (рис. 9а). Спессартин из спессартин-кварцевых пород Горной площади отличается относительно высоким содержанием гроссулярового минала (при низком – в марганцевосиликатных породах этой площади). Спессартин из аналогичных пород Широкопаднинской площади характеризуется низким содержанием этого минала (при широких вариациях его содержания в марганцевосиликатных породах) (см. рис. 9а). Члены ильменит-пирофанитового ряда в спессартин-кварцевых породах Сихотэ-Алиня представлены высокожелезистым пирофанитом и богатым Mn ильменитом в отличие от марганцевосиликатных пород, содержащих в целом относительно бедный ильменитовым миналом пирофанит (см. рис. 9б). Таким образом, спессартин и члены пирофанит-ильменитового ряда из спессартин-кварцевых пород отличаются более высокими железистостью и Fe-Mn отношением по сравнению с аналогичными показателями этих минералов из марганцевосиликатных пород Сихотэ-Алиня. Обогащение марганцевых минералов марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород двухвалентным Fe отражает восстановительную обстановку метаморфизма металлоносных осадков.

Минералы REE в марганцевосиликатных породах Сихотэ-Алиня представлены главным образом монацитом-(Ce), торнебоцитом-(Ce) или алланитом-(Ce). Реже встречаются бастнезит-(Ce) и гидроксид (Ce, La)O(OH, F, Cl) (?). В небольшом количестве REE иногда присутствуют в апатите и бреггерите (Перевозникова, 2010). Все эти минералы, за исключением торнебоцита, обнаружены и в спессартин-кварцевых породах Сихотэ-Алиня. Характерными изоморфными примесями монацита в марганцевосиликатных породах Таухинского террейна являются Ca и Th (присутствующие в виде чералитового минала), а Самаркинского – Ca и Sr. В монаците спессартин-кварцевых пород обоих террейнов отмечается изоморфная примесь Ca и Th – тоже в виде чералитового минала. В спессартин-кварцевых породах обоих террейнов в отличие от марганцевосиликатных пород присутствуют очень богатые Ca и Th члены монацит-чералитового изоморфного ряда, представленные чералитом, обогащенным монацитовым миналом (см. рис. 6). К минералам Th и U в марганцевосиликатных породах Сихотэ-Алиня относятся торрианит, бреггерит и уранинит. Торрианиту свойственно переменное, иногда высокое содержание U. Уранинит из марганцевосиликатных пород Самаркинского террейна обогащен Zr. В спессартин-кварцевых поро-

дах Сихотэ-Алиня из минералов Th и U обнаружены (в Таухинском террейне) только торрианит с небольшой изоморфной примесью U, а также редкий в природе фосфат Th – грэйит.

В спессартин-кварцевых породах Сихотэ-Алиня присутствует группа редких в природе минералов и минеральных разновидностей. Кроме уже упомянутых чералита и грэйита, к ним относятся редкая разновидность фтор-глиноземистого титанита, в которой около половины Ti замещено Al, кармелтазит и тенгерит-(Y)(?). Фтор-глиноземистый титанит обнаружен в спессартин-кварцевых породах Самаркинского террейна. Алюминий, как видно из кристаллохимических формул (см. табл. 1), замещает Ti, а F входит в структуру этого минерала вместо кислорода. Несмотря на то что количество F в кристаллохимических формулах изменчиво (от 0.37 до 0.56 ф. е.), оно всегда равно количеству Al. Таким образом, можно полагать, что при замещении трехвалентным Al четырехвалентного Ti уменьшение суммарного положительного заряда компенсировалось уменьшением отрицательного заряда в результате замещения кислорода фтором по схеме $Al^{3+}F^{-} \rightarrow Ti^{4+}O^{2-}$. Титанит отличается необычайно высоким содержанием Al и F. Около половины позиций Ti в структуре этого минерала, и даже несколько более, как видно из кристаллохимических формул, может занимать Al. Минералогические особенности спессартин-кварцевых пород свидетельствуют о восстановительном характере контактового метаморфизма, обусловленном присутствием органического вещества. С этим обстоятельством, очевидно, и связано высокое содержание F в титаните, занимавшего в структуре позиции недостающего кислорода и, как следствие (в силу кристаллохимических особенностей минерала), высокое содержание Al.

Кармелтазит, содержащий изоморфную примесь Sc, встречается в спессартин-кварцевых породах Широкопаднинской площади. Такой же минерал, но с меньшим содержанием Sc обнаружен нами в яшмах Высокогорской площади Кавалеровского рудного района (Таухинский террейн) (неопубликованные данные). Наряду с кармелтазитом в них встречаются другие редкие минералы – вассонит TiS , перовскит $CaTiO_3$ (с примесью REE и Nb), браунмиллерит Ca_2FeAlO_5 , соединение $Ca_3(Y, REE, Sc)_2(CO_3)_3(OH)F$, близкое по составу к камфугиту, и бариоферрит $BaFe_{12}O_{19}$. Некоторые из них образуются в условиях, не сопоставимых с условиями контактового метаморфизма. Зерна таких минералов в спессартин-кварцевых породах и яшмах, в частности зерна кармелтазита – минерала высоких давлений, являются, очевидно, реликтовыми и поступали в осадки, предположительно, из габброидов сергеевского или калиновского комплексов или из метаморфических пород Ханкайского массива при их экзогенном разрушении.

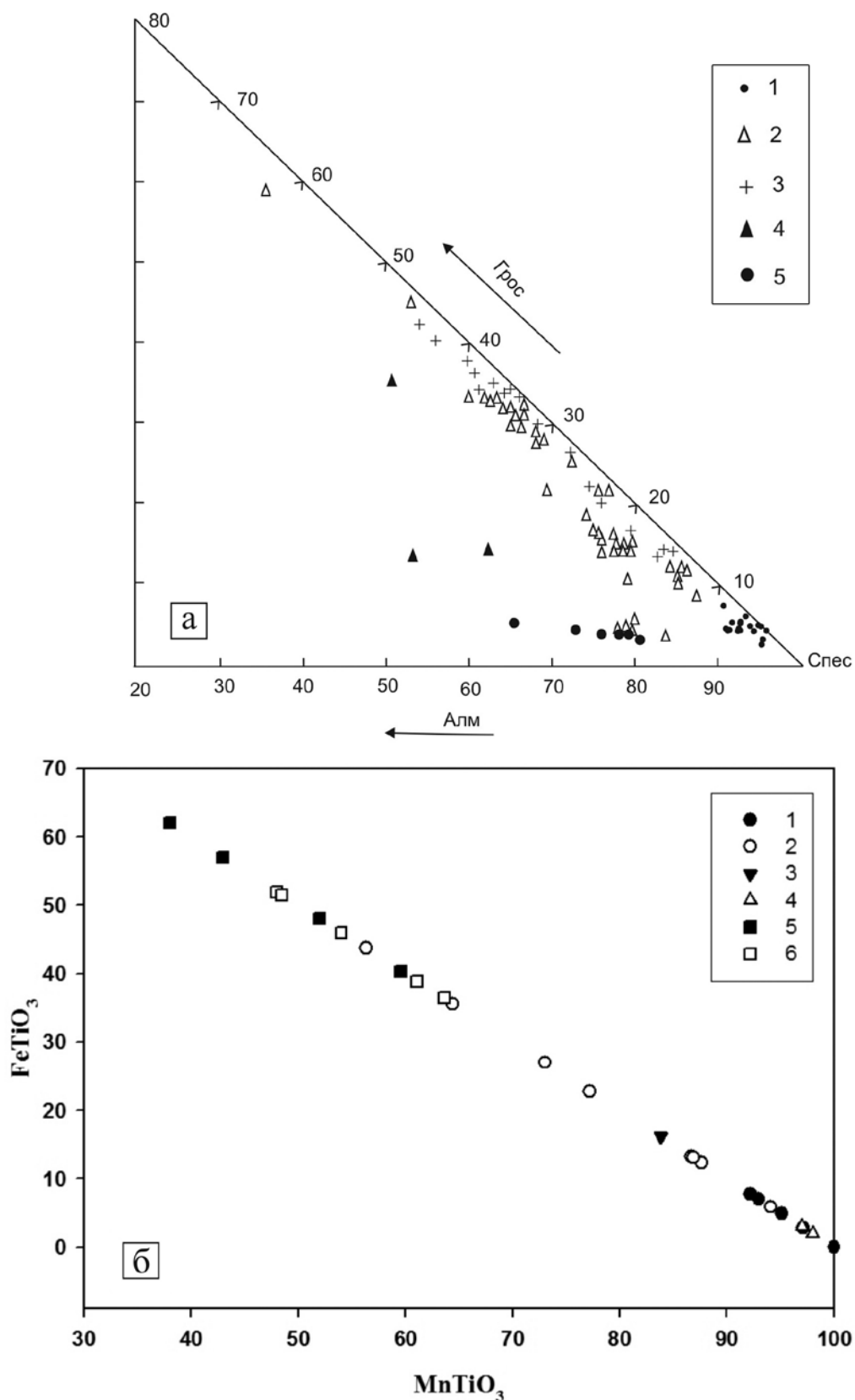


Рис. 9. Диаграммы состава граната (а) и пирофанита (б) марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня.

а. 1–3 – гранат из марганцевосиликатных пород Горной (1), Широкопаднинской (2) и Садовой (3) площадей; 4, 5 – гранат из спессартин-кварцевых пород Горной (4) и Широкопаднинской (5) площадей.

б. 1–4 – пирофанит из марганцевосиликатных пород Горной (1), Широкопаднинской (2), Мокрушинской (3) и Садовой (4) площадей; 5, 6 – пирофанит-ильменитовый твердый раствор из спессартин-кварцевых пород Горной (5) и Широкопаднинской площадей (6).

Fig. 9. Diagrams of the composition of garnet (a) and pyrophanite (б) of manganese silicate and spessartine-quartz rocks of the Sikhote-Alin.

а. 1–3 – garnet from manganese silicate rocks of Gornaya (1), Shirokaya Pad' (2) and Sadovaya (3) areas; 4, 5 – garnet from spessartine-quartz rocks of Gornaya (4) and Shirokaya Pad' (5) areas.
б. 1–4 – pyrophanite from manganese silicate rocks of Gornaya (1), Shirokaya Pad' (2), Mokrusha (3) and Sadovaya (4) areas; 5, 6 – pyrophanite-ilmenite solid solution from spessartine-quartz rocks of Gornaya (5) and Shirokaya Pad' areas (6).

Основными минералогическими особенностями спессартин-кварцевых пород, отличающими их от марганцевосиликатных пород, являются отсутствие пироксеноидов и других не содержащих Al силикатов Mn, а также относительно небольшая доля марганцевых минералов, представленных спессартином, пирофанитом или марганцовистым ильменитом. В ассоциациях марганцевосиликатных пород безглиноземистые силикаты Mn (родонит, пироксмангит, бустамит, тефрит и др.) преобладают над глиноземсодержащими (главным образом спессартином), а также пирофанитом. При контактовом метаморфизме образование безглиноземистых силикатов Mn, в том числе пироксеноидов, возможно только при относительно низкой фугитивности кислорода и при избыточном (в исходной породе) содержании Mn по отношению к Al и Ti, которые связывают его в составе спессартина, пирофанита или марганцовистого ильменита. Образованию безглиноземистых силикатов Mn при метаморфизме способствует также обогащение осадков K, Na и Ba, связывающих глинозем в составе полевых шпатов и слюд.

Спессартин-кварцевые породы, как и марганцевосиликатные, могут возникать (при несоблюдении перечисленных условий) в восстановительных обстановках метаморфизма, как это имело место в Сихотэ-Алине. Однако во многих случаях их происхождение (вместо марганцевосиликатных пород) связано с более окислительными обстановками, так как спессартин более устойчив с возрастом фугитивности кислорода по сравнению с пироксеноидами и тефритом (Казаченко, 2002). Примерами таких геологических образований являются знаменитые докембрийские марганцеворудные пояса Индии (Dasgupta, Manickavasagam, 1981), спессартин- и пьомонтитсодержащие метаосадки Западных Карпат (Spisiak et al., 1989), марганцовистые метаморфические породы о. Андрос (Греция) (Reinecke, 1986) и Олари (Австралия) (Ashley, 1984) и многие другие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые приведена минералогическая характеристика спессартин-кварцевых пород триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня. Они занимают одинаковое положение в разрезе триасо-

вых отложений Таухинского и Самаркинского террейнов Сихотэ-Алиня – такое же, как и марганцевосиликатные породы, что свидетельствует о синхронном накоплении осадков (протолитов этих пород) в едином осадочном бассейне. Марганцевосиликатные породы образовались при контактовом метаморфизме обогащенных родохрозитом кремнистых пород – в Таухинском террейне в позднем мелу при становлении крупных гранитоидных массивов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, а в Самаркинском террейне в раннемеловое время при формировании крупных гранитоидных тел Хунгари-Татибинского плутонического пояса. Спессартин-кварцевые породы, вмещающие марганцевосиликатные породы и являющиеся, как и последние, метаморфизованными аналогами обогащенных Mn триасовых осадков Сихотэ-Алиня, имеют такое же происхождение. Образование марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород было связано с реакциями между силикатной, карбонатной и алюмосиликатной составляющими кремнисто-родохрозитовых пород. Реакции протекали в восстановительной обстановке при повышении температуры и приводили к возникновению безглиноземистых силикатов Mn (в основном пироксеноидов) и спессартина. Протолитами кремнисто-родохрозитовых пород и, соответственно, их контактово-метаморфизованных аналогов – марганцевосиликатных и спессартин-кварцевых пород – являлись в разной степени обогащенные гидроксидами Mn, органическим, глинистым и слюдяным веществом кремнистые илы биогенной природы. Из-за одинаковой природы протолитов и близких условий метаморфизма марганцевосиликатные и спессартин-кварцевые породы обнаруживают значительное минералогическое сходство. Оно выражается в присутствии многих общих для них минералов, таких как спессартин, члены ильменит-пирофанитового ряда, титанит, монацит, бастнезит, алланит, апатит, циркон, бадделит, торанит и др.

В спессартин-кварцевых породах Сихотэ-Алиня присутствует группа редких в природе минералов и минеральных разновидностей. К ним относятся чералит, грэйт, редкая разновидность фторглиноземистого титанита, в которой около половины Ti замещено Al, кармелтазит и тенгерит-(Y) (?).

Основными минералогическими особенностями спессартин-кварцевых пород, отличающими их от марганцевосиликатных, выступают отсутствие пироксеноидов и других безглиноземистых силикатов Mn, а также относительно небольшая доля марганцевых минералов, представленных спессартином, пирофанитом или марганцовистым ильменитом. Появление спессартин-кварцевых пород или вместо них марганцевосиликатных при контактовом метаморфизме в Сихотэ-Алине происходило в восстановительных условиях минералообразования и определялось главным образом количественным соотношением карбонатного и глинистого материала в исходных осадках и содержанием в них Ва и щелочей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брусницын А.И. (2000) Родонитовые месторождения Среднего Урала (минералогия и генезис). СПб.: СПб. гос. ун-т, 200 с.
- Брусницын А.И., Жуков И.Г. (2005) Южно-Файзуллинское марганцевое месторождение (Южный Урал): геологическое строение, петрография, процессы формирования. *Литология и полезн. ископаемые*, (1), 1-21.
- Ватанабе Е., Юи С., Като А. (1973) Обзор пластовых марганцевых месторождений Японии. *Вулканизм и рудообразование*. М.: Мир, 104-120.
- Волохин Ю.Г., Михайлик Е.В., Бурый Г.И. (2003) Триа-совая кремневая формация Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 252 с.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Кн. 1. Под ред. А.И. Ханчука (2006). Владивосток: Дальнаука, 572 с.
- Гуляева Т.Я. (1982) Оловосодержащий андрадит Белогорского месторождения (Приморье). *Тихоокеан. геология*, (5), 110-113.
- Казаченко В.Т. (2002) Петрология и минералогия гидротермальных марганцевых пород Востока России. Владивосток: Дальнаука, 250 с.
- Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Лаврик С.Н. (2016) Геохимические и изотопные "метки" древних габброидов в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках, скарнах и рудах скарновых месторождений Сихотэ-Алиня. *Вестн. Кольского НЦ РАН*, 4(27), 16-36.
- Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Нарнов Г.А. (2012) Акцессорная минерализация в скарнах Дальнегорского рудного района (Сихотэ-Алинь). *Записки РМО*, (4), 74-96.
- Казаченко В.Т., Сапин В.И. (1990) Минералогия и генезис железомарганцевого оруденения Прибрежной зоны Приморья. Владивосток: ДВО АН СССР, 248 с.
- Кулиш Л.И., Кулиш Е.А. (1974) Метаморфические марганцевые комплексы Дальнего Востока. Хабаровск, Ин-т тектоники и геофизики ДВ НЦ АН СССР. 466 с.
- Логвиненко Н.В. (1972) Состав и генезис карбонатов железа и марганца в осадочных образованиях. *Литология и полезн. ископаемые*, (3), 86-96.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртогов О., Х. Янь. (2003) Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии. *Тихоокеан. геология*, 22(6), 7-41.
- Перевозникова Е.В. (2010) Марганцевосиликатные породы Южного Сихотэ-Алиня: минералогия и генезис. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 192 с.
- Прибавкин С.В., Григорьев В.В., Квачев В.И., Готтман И.А. (2018) Метаморфизм марганцовистых осадков Гагарского проявления родонита по данным амфибол-биотит-полевошпатовой термобарометрии. *Ежегодник-2017*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 165, 151-155.
- Радкевич Е.А., Лобанова Г.М., Томсон И.Н. (1960) Геология свинцово-цинковых месторождений Приморья. *Труды ИГЕМ АН СССР*, 34(1), 328 с.
- Рой С. (1986) Месторождения марганца. М.: Мир, 520 с.
- Ростовский Ф.И., Мельник В.Г., Лысюк А.Ф. (1981) Отчет Ольгинской партии о результатах геологической съемки и поисков масштаба 1 : 50 000 за 1977-1981 г.г. (в двух томах). ПГО "Приморгеология", г. Владивосток.
- Старикова Е.В., Брусницын А.И., Жуков И.Г. (2004) Палеогидротермальная постройка марганцевого месторождения Кызыл-Таш, Южный Урал: строение, состав, генезис. СПб.: Наука, 230 с.
- Ashley P.M. (1984) Piemontite-bearing rocks from the Olary District, South Australia. *Austral. J. Earth Sci.*, 31, 203-216.
- Borhan A., Apetrachioaei B., Popa K. (2010) On the existence of cerium (IV) orthophosphate, $Ce_3(PO_4)_4$. *Rev. Roum. Chim.*, 55(7), 389-393.
- Bowie S.H.U., Horne J.E.T. (1953) Cheralite, a new mineral of the monazite group. *Mineral. Mag.*, (30), 93-99.
- Dasgupta H.C., Manickavasagam M. (1981) Regional Metamorphism of Non-Calcareous Manganiferous Sediments from India and the Related Petrogenetic Grid for a Part of the System Mn-Fe-Si-O. *J. Petrol.*, 22(3), 363-396.
- Griffin W.L., Gain S.E.M., Bindi L., Toledo V., Cámara F., Saunders M., O'Reilly S.Y. (2018) Carmeltazite, $ZrAl_2Ti_4O_{11}$, a New Mineral Trapped in Corundum from Volcanic Rocks of Mt Carmel, Northern Israel. *Minerals*, 8(12), 601. doi:10.3390/min8120601
- Li Y.H., Bischoff J.L., Mathieu G. (1969) The migration of manganese in the Arctic Basin Sediment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, (7), 265-270.
- Linthout K. (2007) Tripartite division of the system $2REE-PO_4-CaTh(PO_4)_2-2ThSiO_4$, discreditation of brabantite, and recognition of cheralite as the name for members dominated by $CaTh(PO_4)_2$. *Canad. Mineral.*, (45), 503-508.
- Miyawaki R., Kuriyama J., Nakai I. (1993) The redefinition of tengerite-(Y), $Y_2(CO_3)_3 \cdot 2-3H_2O$, and its crystal structure. *Amer. Miner.*, (78), 425-432.
- Pabst A. (1951) Huttonite, a new monoclinic thorium silicate, with an account on its occurrence, analysis, and properties (the latter by C.O. Hutton). *Amer. Miner.*, 36, 60-69.
- Peters T., Schwander H., Trommsdorf V. (1973) Assemblages among Tephroite, Pyroxmangite, Rhodochrosite, Quartz: Experimental Data and Occurrences in the Rhetic Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42, 325-332.
- Peters T., Valarelli J.V., Coutinho J.M.V., Sommerauer J., Von Raumer J. (1978) The manganese deposits of Buritirama (Para, Brazil). *Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt.*, 57, 409-423.

- Price N.B., Calvert S.E. (1970) Compositional variation in Pacific Ocean-ferromanganese nodules and its relationship to sediment accumulation rates. *Mar. Geol.*, **9**, 145-171.
- Reinecke T. (1986) Phase relations of sursassite and other Mn-silicates in highly oxidized low-grade, high-pressure metamorphic rocks from Evvia and Andros Islands, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 110-126.
- Sato K. (1980) Tungsten Skarn Deposit of the Fujigatani Mine Southwest Japan. *Econ. Geol.*, **75**(7), 1066-1082.
- Spisiak Ya., Hovorka D., Rybka R., Turan Ya. (1989) Spessartin a piemontit v metasedimentoch starsiecho paleozoika vnutornykh Zapadnykh Karpat. *Casopis pro mineralogii a geologii*, **34**(1), 17-30.
- Trommsdorff V., Schwander H., Peters T. (1970) Mangan-silikate der alpinen Metamorphose in Radiolariten des Julier-Bernina-Gebietes. *Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt.*, **50**(3), 439-545.
- Ashley P.M. (1984) Piemontite-bearing rocks from the Olary District, South Australia. *Austral. J. Earth Sci.*, **31**, 203-216.
- Bowie S.H.U., Horne J.E.T. (1953) Cheralite, a new mineral of the monazite group. *Mineral. Mag.*, (30), 93-99.
- Borhan A., Apetrachioaei B., Popa K. (2010) On the existence of cerium (IV) orthophosphate, $\text{Ce}_3(\text{PO}_4)_4$. *Rev. Roum. Chim.*, **55**(7), 389-393.
- Brusnitsyn A.I. (2000) *Rodonitovye mestorozhdeniya Srednego Urala (mineralogiya i genesis)* [Rhodonite Deposits of the Central Urals (Mineralogy and Genesis)]. St. Petersburg, St. Petersburg State Univ. Publ., 200 p. (In Russian)
- Brusnitsyn A.I., Zhukov I.G. (2005) The South Faizuly manganese deposit in the Southern Urals: geology, petrography and formation conditions. *Lithol. Mineral Resources*, **40**(1), 30-47.
- Dasgupta H.C., Manickavasagam M. (1981) Regional Metamorphism of Non-Calcareous Manganiferous Sediments from India and the Related Petrogenetic Grid for a Part of the System Mn-Fe-Si-O. *J. Petrol.*, **22**(3), 363-396.
- Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii* [Geodynamics, magmatism, and metallogeny of East Russia]. B. 1. (2006) Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 572 p. (In Russian)
- Griffin W.L., Gain S.E.M., Bindi L., Toledo V., Cámara F., Saunders M., O'Reilly S.Y. (2018) Carmeltazite, $\text{ZrAl}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$, a New Mineral Trapped in Corundum from Volcanic Rocks of Mt Carmel, Northern Israel. *Minerals*, **8**(12), 601. doi:10.3390/min8120601
- Gulyaeva T.Ya. (1982) *Olovosoderzhashchii andradit Belogorskogo mestorozhdeniya (Primorye)* [Sn-bearing andradite of the Belogorsky deposit (Primor'e)]. *Tikhookean. Geol.*, (5), 110-113. (In Russian)
- Logvinenko N.V. (1972) Sostav i genesis karbonatov zheleza i margantsa v osadochnykh obrazovaniyakh [Composition and Genesis of iron and manganese carbonate in sedimentary formations]. *Litol. Polezn. Iskop.*, (3), 86-96. (In Russian)
- Kazachenko V.T. (2002). *Petrologiya i mineralogiya gidrotermal'nykh margantsevykh porod Vostoka Rossii* [Petrology and mineralogy of hydrothermal manganese rocks of East Russia]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 250 p. (In Russian)
- Kazachenko V.T., Perevznikova E.V., Lavrik S.N. (2016) Geochemical and isotopic "markers" of the old gabroids in the Triassic metamorphosed metalliferous sediments, skarns, and ores of the skarn deposits of the Sikhote-Alin. *Vestn. Kol'skogo NTs RAN*, **4**(27), 16-36. (In Russian)
- Kazachenko V.T., Perevznikova E.V., Narnov G.A. (2012) Accessory mineralization in skarns of the Dal'negorsky ore district (Sikhote-Alin). *Zapiski RMO*, (4), 73-96. (In Russian)
- Kazachenko V.T., Sapin V.I. (1990) *Mineralogiya i genesis zhelezo-margantseвого orudeneniya Pribrezhnoi zony Primor'ya* [Mineralogy and genesis of the iron-manganese mineralization of Coastal zone of Primor'e]. Vladivostok, DVO AN SSSR, 248 p. (In Russian)
- Kulish L.I., Kulish E.A. (1974) *Metamorficheskie margantsevye komplekсы Dal'nego Vostoka* [Metamorphic manganese complexes of the Far East]. Khabarovsk, DVO AN SSSR. 466 p. (In Russian)
- Li Y.H., Bischoff J.L., Mathieu G. (1969) The migration of manganese in the Arctic Basin Sediment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **7**, 265-270.
- Linthout K. (2007) Tripartite division of the system $2\text{REE-PO}_4\text{-CaTh(PO}_4)_2\text{-2ThSiO}_4$, discreditation of brabantite, and recognition of cheralite as the name for members dominated by $\text{CaTh(PO}_4)_2$. *Canad. Mineral.*, (45), 503-508.
- Miyawaki R., Kuriyama J., Nakai I. (1993) The redefinition of tengerite-(Y), $\text{Y}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 2\text{-3H}_2\text{O}$, and its crystal structure. *Amer. Miner.*, (78), 425-432.
- Pabst A. (1951) Huttonite, a new monoclinic thorium silicate, with an account on its occurrence, analysis, and properties (the latter by C.O. Hutton). *Amer. Miner.*, **36**, 60-69.
- Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril S.I., Kirillova G.L., Kuzmin M.I., Nokleberg W.J., Prokopyev A.V., Timofeev V.F., Tomurtogoo O., Yang H. (2003). A model for the formation of orogenic belts in Central and Northeast Asia. *Tikhookean. Geol.* **22**(6), 7-41. (In Russian)
- Perevznikova E.V. (2010). *Margantsevosilikatnye porody Yuzhnogo Sikhote-Alinya: mineralogiya i genezis*. Dis. kand. geol.-min. nauk [Manganese-silicate rocks of the South Sikhote-Alin: mineralogy and genesis]. Cand. geol. and min. sci. diss. Vladivostok, 192 p. (In Russian)
- Peters T., Schwander H., Trommsdorff V. (1973) Assemblages among Tephroite, Pyroxmangite, Rhodochrosite, Quartz: Experimental Data and Occurrences in the Rhetic Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **42**, 325-332.
- Peters T., Valarelli J.V., Coutinho J.M.V., Sommerauer J., Von Raumer J. (1978) The manganese deposits of Buritirama (Para, Brazil). *Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt.*, **57**, 409-423.
- Pribavkin S.V., Grigor'ev V.V., Kvachev V.I., Gottman I.A. (2018) Metamorphism of manganese deposits of Gagar-sky rhodonite deposits according to amphibole-biotite-feldspar thermobarometry. *Ezhegodnik-2017. Tr. IgGG UrO RAN*, V. 165, 151-155. (In Russian)
- Price N.B., Calvert S.E. (1970) Compositional variation in Pacific Ocean-ferromanganese nodules and its relationship to sediment accumulation rates. *Mar. Geol.*, **9**, 145-171.
- Radkevich E.A., Lobanova G.M., Thomson I.N. (1960) *Geologiya svintsovo-tsinkovykh mestorozhdenii Primor'ya* [Geology of lead- zinc deposits of Primorye]. *Tr. IGEM AN SSSR*, **34**(1), 328 p. (In Russian)

- Reinecke T. (1986) Phase relations of sursassite and other Mn-Silicates in highly oxidized low-grade, high-pressure metamorphic rocks from Evvia and Andros Islands, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 110-126.
- Roy S. (1986) *Mestorozhdeniya margantsa* [Manganese Deposits]. Moscow, Mir Publ., 520 p. (In Russian)
- Rostovskii F.I., Mel'nik V.G., Lysyuk A.F. (1981) *Otchet Ol'ginskoy partii o rezul'tatakh geologicheskoy s'yemki i poiskov masshtaba 1 : 50 000 za 1977-1981 g.g. (v dvukh tomakh)*. [Report of the Olginskaya party on the results of geological survey and prospecting at a scale of 1 : 50 000 for 1977-1981. (in 2 volumes)]. PGO "Primor-geology", Vladivostok (In Russian, unpublished)
- Sato K. (1980) Tungsten Skarn Deposit of the Fujigatani Mine Southwest Japan. *Econ. Geol.*, **75**(7), 1066-1082.
- Spisiak Ya., Hovorka D., Rybka R., Turan Ya. (1989) Spessartin a piemontit v metasedimentoch starsiecho paleozoika vnutornych Zapadnykh Karpat. *Casopis pro mineralogii a geologii*, **34**(1), 17-30.
- Starikova E.V., Brusnitsyn A.I., Zhukov I.G. (2004) *Paleogidrotermal'naya postroika margantsevogo mestorozhdeniya Kyzyl-Tash, Yuzhnyi Ural: stroenie, sostav, genezis* [Paleohydrothermal buildup of the Kyzyl-Tash manganese deposit, southern Urals: structure, composition, genesis]. St. Petersburg, Nauka Publ., 230 p. (In Russian)
- Trommsdorff V., Schwander H., Peters T. (1970) Mangansilikate der alpinen Metamorphose in Radiolariten des Julier-Bernina-Gebietes. *Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt.*, **50**(3), 439-545.
- Volokhin Yu.G., Mikhailik E.V., Burii G.I. (2003) *Triasovaya kremnevaya formatsiya Sikhote-Alinya* [The Triassic silicic formation of the Sikhote-Alin]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 252 p. (In Russian)
- Watanabe E., Yu S., Kato A. (1973) Overview of formation manganese deposits in Japan. *Vulkanizm i rudoobrazovanie* [Volcanism and ore formation]. Moscow, Mir Publ., 104-120. (In Russian)