ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 498, № 1, с. 31–36

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.2:550.4

О ПРИРОДЕ СКАРНОВО-БОРОСИЛИКАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ-ГИГАНТОВ СИХОТЭ-АЛИНЯ И ПАМИРА

© 2021 г. Академик РАН А. И. Ханчук[1, 2], В. В. Раткин[1, *], О. А. Елисеева[1, **]

Поступило 25.12.2020 г.
После доработки 25.01.2021 г.
Принято к публикации 28.01.2021 г.

Показано, что месторождения-гиганты бора Сихотэ-Алиня и Памира сопряжены с фрагментами бороносных эвапоритовых толщ палеокеанических атоллов в субдукционном меланже. Формирование руд связано как непосредственно с преобразованием *in situ* бороносных эвапоритовых толщ на месторождении Ак-Архар, так и с мобилизацией и переотложением бора на некотором удалении от эвапоритового источника в условиях интенсивной постаккреционной флюидно-магматической переработки субдукционного меланжа на Дальнегорском месторождении.

Ключевые слова: субдукционный меланж, атоллы, эвапориты, скарны, данбурит, месторождение бора, Дальнегорское, Ак-Архар

DOI: 10.31857/S2686739721050078

В мировом минерально-сырьевом балансе бора в числе нескольких сотен скарновых боросиликатных месторождений известно только два объекта, запасы которых соизмеримы с месторождениями бороносных эвапоритов. Это Дальнегорское месторождение на юго-востоке Сихотэ-Алиня (44°34′ с.ш. и 135°37′ в.д.; более 35 млн тонн B_2O_3) и месторождение Ак-Архар на Памире (37°58′ с.ш. и 73°42′ в.д.; 7.2 млн тонн B_2O_3). Оба месторождения приурочены к субдукционному меланжу мезозойского возраста и проявлены при феноменальных запасах как обособленные точечные объекты, полностью лишенные шлейфа однотипных мелких месторождений и рудопроявлений в их окружении. Эта особенность и специфика геологических условий локализации позволили ранее высказать предположение [1], что скарновые боросиликатные руды Дальнегорского месторождения сформировались за счет бора из скоплений эвапоритов – фрагментов лагунных карбонатных отложений океанических атоллов в субдукционном меланже. Эти модельные представления нашли предметное подтверждение в современных исследованиях геологии и минералов указанных месторождений.

Дальнегорское месторождение находится в юго-восточной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса, сформированного как коллаж юрских и раннемеловых террейнов [2]. Рудовмещающие породы на месторождении представлены толщей субдукционного меланжа в составе аккреционной призмы Таухинского террейна. Характерной особенностью меланжа является обилие пластообразных крупных (до нескольких километров протяженностью) включений известняков триасового возраста, заключенных в песчано-сланцевом юрско-меловом матриксе призмы. Фиксировано [3], что подстилавшиеся в первичном залегании океаническими базальтами известняки являются фрагментами гайотов, в истории формирования которых различаются стадии вулканического острова, атолла и подводного поднятия (гайота, симаунта). В дальнейшем разработана по данным детального палеонтологического фациального анализа [4] концептуальная модель карбонатного осадконакопления, соответствующая системе типа срединно-океанического атолла, состоящей из хорошо развитой лагуны, окаймляющих полос рифов и оолитовых кос. В составе триасовых карбонатных пород, форми-

[1] *Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*
[2] *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: ratkin@yandex.ru*
***E-mail: okaras@yandex.ru*

рующих включения в меланже, при фациальном доминировании морских лагунных образований преобладают микро- и макрофауна, типичная для тропической зоны Панталассы.

Структурно месторождение проявлено как зона известковых скарнов, заместивших пластообразное тело триасовых известняков (рис. 1). Скарнирование в объеме месторождения проявилось дважды [5]. На раннем этапе в теле известняков была образована колонна гроссуляр-волластонитовых скарнов, практически нацело заместивших известняки в интервале современных глубин от 0.5 до 1.2 км. Выше колонны в известняках были сформированы протяженные палеогидротермальные полости, последовательно выполненные датолит-бустамит (дальнегорскит)-геденбергитовыми минеральными почками с ферросилитом и далее – данбуритом [6]. В позднекампанское время – 78.4 млн лет, по данным [7], в финале раннего этапа, в сохранившееся пространство полостей инъецировался базальтовый расплав. В палеоцене, на глубине около 1200 м от современной поверхности, гроссуляр-волластонитовые скарны с данбуритом были ограничены секущей зону интрузией гранитоидов дальнегорского комплекса (рис. 1), датированной значениями возраста 60.45 ± 0.65 млн лет [8]. В ассоциации с интрузиями дальнегорских гранитоидов проявился второй этап скарнирования и формирование скарновых и жильных полиметаллических руд Дальнегорского района. Оказавшаяся на фланге Партизанского Pb–Zn-месторождения ранее сформированная залежь данбуритовых руд была повторно скарнирована в объем соразмерной зоны ильваит-андрадит-геденбергитовых скарнов. Данбурит был превращен в крупнокристаллический кварц-кальцитовый агрегат. При этом мобилизованный в процессе гидротермальной переработки ранних руд бор был связан в той же зоне в виде датолита и аксинита в ассоциации с поздними скарнами [5, 9]. Первичные данбуритовые руды сохранились от замещения и переотложения только в северо-восточной части Дальнегорского месторождения (рис. 1). Термобарогеохимическое изучение показало, что данбурит формировался в интервале температур 350–200°C при участии обогащенных CO_2, насыщенных хлоридами натрия и магния растворов с нарастанием их солености от 2.9 до 16.34 мас. % экв. NaCl по мере снижения температуры [5]. По данным [10], минеральные ассоциации с данбуритом формировались при участии флюидов с аномальными содержаниями бора и лития в интервале 6.20–53.80 и 0.104 г/кг раствора соответственно. Эта особенность флюидов раннего этапа проявляется также в геохимической обогащенности гроссуляр-волластонитовых скарнов с данбуритом литием и марганцем, при средних значениях содержаний – 49.8 и 5629.8 г/т соответственно. Это указывает на наличие специфического, обогащенного хлоридами, магнием, марганцем и литием, источника растворов с аномально высокими содержаниями бора. При этом специфика данбуритовых руд ярко проявлена также в изотопном составе бора. По нашим данным [11], бор данбурита, при значениях $\delta^{11}B = +17.7‰$, соответствует эвапоритам морского происхождения. По данным изучения изотопного состава кислорода [5], формирование данбурита происходило из интенсивно разбавленных метеорной составляющей растворов магматического происхождения, при значениях $\delta^{18}O$ флюида около –1.0‰.

Аномальная обогащенность флюида, сформировавшего скопления данбурита, в полной мере согласуется с данными экспериментальных работ [12], где показано, что кристаллизация данбурита происходит при температуре 300–400°C из раствора, содержащего от 3.75 до 8.0 моль H_3BO_3 на 1000 г H_2O. Указанное предполагает наличие высококонцентрированного источника бора, предшествующего скарнообразованию. Источником бора могут быть либо очаги глубоко дифференцированной гранитной магмы с характерным проявлением пегматитообразования [10], либо скопления эвапоритов. Но отсутствие на рудоносной площади гранитоидов с хоть сколько-нибудь заметно проявленным пегматитообразованием, при феноменально большом объеме данбуритовых руд, исключает первое. Прямым подтверждением этого вывода являются утяжеленный изотопный состав бора данбурита и характерная обогащенность флюида литием. Необычное повышение солености флюида по мере развития процесса кристаллизации данбурита, вероятно, также указывает на участие эвапоритовых соленосных отложений в генерации рудообразующих флюидов.

Месторождение Ак-Архар расположено на Памире в восточной части Базар-Даринского хребта. Рудоносная территория является частью сутуры Рушан-Пшарт (Rushan-Pshart), сопряженной с триасовой субдукцией плиты океанического бассейна Палео-Тетиса под блок Южного Памира [13]. Рудовмещающий складчатый комплекс сложен породами позднетриасовой аккреционной призмы, перекрытой с несогласием осадками средней юры. Призма представлена флишоидными отложениями позднего триаса и толщей субдукционного меланжа. Главными типами включений в меланже являются части океанического гайота в виде фрагментов базальтового основания вулканического острова и позднепермские и триасовые карбонатные “шапки” атолла и симаунта (рис. 2). Включения триасового возраста представлены изометричными телами известняков с прослоями мергелей, доломитовых известняков и кремнистых сланцев. Пластообразные олистолиты сложены позднепермской толщей тонкого

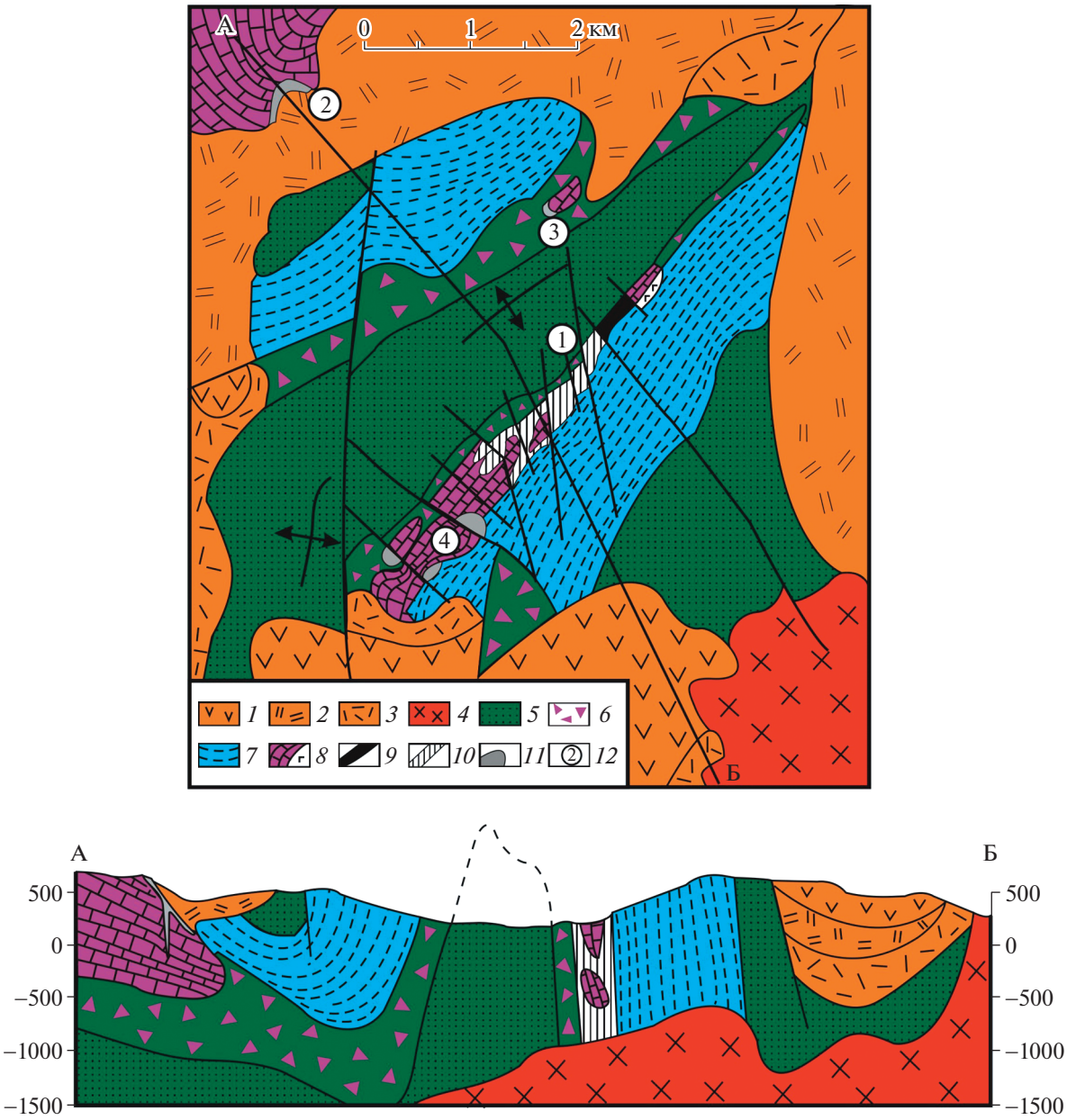

Рис. 1. Схема геологического строения центральной части Дальнегорского рудного района, по данным [5] с изменениями и дополнениями. *1–3* – поздний мел-раннепалеоценовые эффузивы и туфы: *1* – андезиты; *2* – риодациты и дациты; *3* – риолиты; *4* – позднепалеоценовые интрузии гранодиорит-гранитного состава; *5–7* – осадочные породы Таухинского террейна (позднеюрско-раннемеловой аккреционной призмы): 5 – матрикс призмы: песчаники и флишоиды, *6* – субдукционный меланж; *7–8* – включения фрагментов океанической плиты: *7* – триасовые кремни и юрские кремнисто-глинистые породы; *8* – триасовые известняки и базальты атоллов-гайотов; *9* – реликтовая зона ранних данбуритовых руд в гроссуляр-волластонитовых скарнах кампанского возраста; *10* – зона преобразования и переотложения ранних данбуритовых руд – датолитовые руды в ильваит-геденбергит-андрадитовых скарнах палеоценового возраста; *11* – свинцово-цинковые руды в ильваит-геденбергит-андрадитовых скарнах палеоценового возраста; *12* – месторождения: 1 – Дальнегорское боросиликатное; 2 – Верхнее свинцово-цинковое; 3 – Первое Советское свинцово-цинковое; 4 – Партизанское свинцово-цинковое.

равномерного переслаивания (с мощностью прослоев 0.5–5.0 см) оолитовых, детритовых и конгломератовидных, иногда доломитовых, известняков, кремней и кремнистых сланцев. Тонкоплитчатые кремнистые породы обычно серые, но временами с фиолетовым оттенком. Прослои глинистых сланцев и мергелей в слоистой толще часто являются доломитсодержащими. В разрезе толщи также присутствует горизонт туфов альбитофиров, туфосланцев и туфопесчаников с лин-

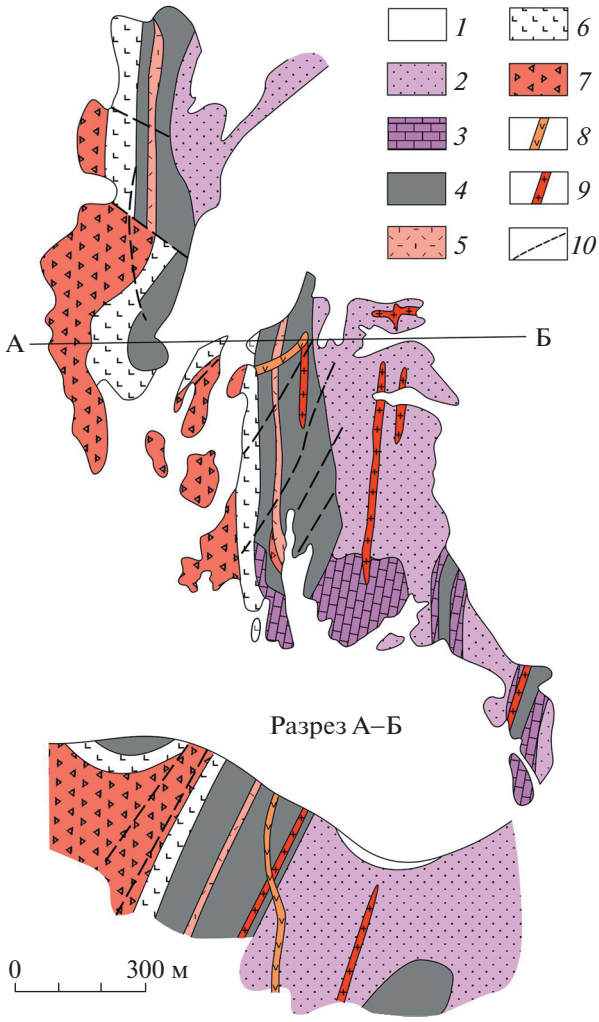

Рис. 2. Схема геологического строения месторождения Ак-Архар, по данным [14] с изменениями и дополнениями. *1* – четвертичные отложения; *2* – песчаники и флишоиды матрикса позднетриасовой (?) аккреционной призмы; *3–6* – породы, формирующие фрагменты атоллов-гайотов (в том числе, *3–5* – "шапки" гайотов): *3* – нижне-верхнетриасовые известняки; *4* – кремнисто-карбонатные породы верхней перми лагунного происхождения, вмещающие боросиликатные рудные тела; *5* – вулканомиктовые отложения верхней перми, *6* – базальты вулканического основания океанического острова; *7* – нижнепермские (?) песчано-сланцевые отложения неясного происхождения; *8* – палеогеновые дайки диабазов; *9* – раннемеловые дайки гранитоидов; *10* – разломы.

зами пелитоморфных известняков и известняковых туфоконгломератов. По характеру кремнисто-карбонатного осадконакопления слоистый комплекс соответствует фациям, формирование которых происходило в условиях мелководной лагуны атолла с синхронным проявлением вулканических эксгаляций.

Породы аккреционной призмы участвуют в субмеридиональной складчатости. При этом во включениях кремнисто-карбонатных пород проявлена мелкая интенсивная дисгармоничная складчатость с признаками пластичного течения с характерным гофрированием пород и хаотичным положением осевых плоскостей складок.

В центре рудного поля на глубине присутствует вскрытая скважинами интрузия раннемеловых (110 ± 3 млн лет, по данным [14]) гранитоидов. Все породы на месторождении, за исключением дайковых диабазов палеогеннового возраста, ороговикованы, фельдшпатизированы и скарнированы в контактовом ореоле этой интрузии. Как результат, слоистая толща, формирующая включения позднепермского возраста, проявлена как перемежаемость серых кремнистых сланцев и мелкокристаллических бело-бурых кварц-данбурит-гранатовых скарноидов. При резких четких контактах рудоносных скарноидов с кремнями последние практически не переработаны. Иногда здесь же присутствуют слабо измененные глинистые сланцы и известняки. По составу гранат

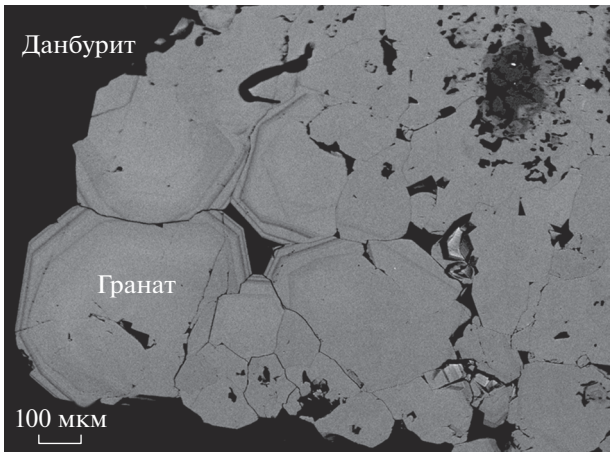

Рис. 3. Данбурит-гранатовый агрегат в рудах месторождения Ак-Архар.

скарноидов соответствует гроссуляру-андрадиту. На микротекстурном уровне наблюдается, что кварц-данбуритовый агрегат, кристаллизовавшийся непосредственно вслед за гранатом, выполняет интерстиции и облекает, практически не корродируя, его кристаллы (рис. 3).

Изученные включения в данбурите скарноидов компактно сгруппированы по зонам роста кристаллов, но широко варьируют по соотношению фаз от существенно газовых до жидких. Газовая фаза включений не содержит, по данным рамановской спектроскопии, ювенильных газов, кроме паров воды. Температура гомогенизации включений близка +410°С. Температура эвтектики газово-жидких включений составляет –20°С и соответствует концентрации солей около 16.0 мас. % экв. NaCl. При этом, по данным [15], кислород данбурита из скарноидов изотопно утяжелен, при значениях $\delta^{18}O$ от +13.6 до +14.3‰. Изотопно утяжеленный кислород характерен и для кварца скарноидов. Значения $\delta^{18}O$ кварца варьируют в интервале от +10.7 до +16.0‰, при средних значениях +13.3‰. То есть преобразование фрагмента лагунных отложений происходило в термальном поле интрузии гранитоидов при крайне низком отношении вода/порода и значениях $\delta^{18}O$ метаморфогенного флюида, с учетом изотопного фракционирования в системе кварц–H_2O [16], на уровне +10.0‰.

В рамках решения постулированной проблемы высококонцентрированного локального источника бора [10] выполненные на месторождении Ак-Архар наблюдения суммируются как вывод об образовании скарноидов с данбуритом *in situ* за счет избирательного замещения соленосных глинисто-карбонатных прослоев с боратами в составе слоистой толщи, сформированной в доаккреционное время в лагуне на вершине гайота.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Н.А. Харитонову за помощь в получении образцов и геологических описаний месторождения Ак-Архар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ханчук А.И.* Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России / В кн. Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука. 2000. С. 5–34.
2. *Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N.* The Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian South East: Terranes and the Formation of Continental Lithosphere Based on Geological and Isotopic Data // Journal of Asian Earth Science. 2016. V. 120. P. 117–138. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.10.023
3. *Ханчук А.И., Никитина А.П., Панченко И.В. и др.* Палеозойские и мезозойские гайоты Сихотэ-Алиня и Сахалина // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 307. № 1. С. 186–189.
4. *Peyrotty G., Rigaud S., Kemkin I., Martini R.* Sedimentology and Biostratigraphy of Upper Triassic Atoll-type Carbonatesfrom the Dalnegorsk Area, Taukha eTrrane, Far East Russia // Global and Planetary Change. 2020. V. 184. 103072. P. 1–24. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103072
5. *Ratkin V.V., Eliseeva O.A., Pandian M.S., et al.* Stages and Formation Conditions of Productive Mineral Associations of the Dalnegorsk Borosilicate Deposit, Sikhote Alin // Geology of Ore Deposits. 2018. V. 60. № 8. P. 672–684. https://doi.org/10.1134/S107570151808007X
6. *Раткин В.В., Хетчиков Л.Н., Гнидаш Н.В, Дмитриев В.Е.* Палеогидротермальный карст – важнейший фактор формирования Дальнегорского боросиликатного месторождения // Тихоокеанская геология. 1993. № 2. С. 97–108.
7. *Дубинина Е.О., Баскина В.А., Авдеенко А.С.* Природа рудообразующих растворов Дальнегорского месторождения: изотопные и геохимические параметры измененных вмещающих пород // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53. № 1. С. 65–82.
8. *Аленичева А.А., Сахно В.Г.* U-Pb датирование экструзивно-интрузивных комплексов рудных районов южной части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (Россия) // ДАН. 2008. Т. 419. № 1. С. 81–85.
9. *Носенко Н.А., Раткин В.В., Логвенчев П.И. и др.* Дальнегорское боросиликатное месторождение – продукт полихронного проявления процессов скарнирования // Доклады АН СССР. 1990. Т. 312. № 1. С. 178–182.
10. *Прокофьев В.Ю., Перетяжко И.С., Смирнов С.З. и др.* Бор и борные кислоты в эндогенных рудообразующих флюидах. М.: НПЭЦ “Пасьва”. 2003. 189 с.
11. *Карась О.А., Раткин В.В.* Дальнегорское скарновое месторождение: этапность и источники вещества боросиликатных руд // ДАН. 2014. Т. 455. С. 444–446. https://doi.org/10.7868/S0869565214100168

12. *Куршакова Л.Д.* Физико-химические условия образования скарново-боросиликатных месторождений. М.: Наука. 1976. 274 с.
13. *Yogibekov D., Sang M., Xiao W., et al.* Late Palaeozoic to Late Triassic Northward Accretion and Incorporation of Seamounts along the Northern South Pamir: Insights from the Anatomy of the Pshart Accretionary Complex // Geological Journal. 2020. V. 55. P. 7837–7857.
https://doi.org/10.1002/gj.3906
14. *Лисицын А.Е.* Геологические основы поисков эндогенных месторождений бора. М. Недра. 1974. 176 с.
15. *Борщевский Ю.А., Борисова С.Л., Медведовская Н.И. и др.* Изотопный состав кислорода и углерода минералов боросиликатных месторождений как индикатор условий их образования и масштабов оруденения // Тез. докл. Всероссийского симпозиума по стабильным изотопам в геохимии. 1982. II том. С. 337–339.
16. *Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.K.* Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water // Jour. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 3057–3067.
https://doi.org/10.7868/S0024497X13060025

ON THE NATURE OF SKARN-BOROSILICATE DEPOSITS–GIANTS OF THE SIKHOTE-ALIN AND PAMIR

Academician of the RAS A. I. Khanchuk[a, b], V. V. Ratkin[a,#], and O. A. Eliseeva[a,##]

[a] *Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*
[b] *Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[#]*E-mail: ratkin@yandex.ru*
[##]*E-mail: okaras@yandex.ru*

It is shown that giant Sikhote-Alin and Pamir deposits of boron are associated with the fragments of boron-bearing evaporite strata of paleoceanic atolls in subduction mélange. Ore formation directly relates both to in situ trans formation of boron-bearing evaporite strata at the Ak-Arkhar deposit, and to boron mobilization and re-deposition some distance away from the evaporite source in course of intensive post-accretionary fluid-magmatic reworking of subduction mélange at the Dalnegorskoe deposit.

Keywords: subduction mélange, atolls, evaporite, skarns, danburite, boron deposit, Dalnegorskoe, Ak-Arkhar