

**СКАРНОВО-БОРОСИЛИКАТНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ-ГИГАНТЫ: ПРОИЗВОДНЫЕ ФЛЮИДНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ФРАГМЕНТОВ АТОЛЛОВ В СУБДУКЦИОННОМ МЕЛАНЖЕ МЕЗОЗОЙСКИХ ОРОГЕННЫХ ПОЯСОВ АЗИИ**

*А.И. Ханчук<sup>1,2</sup>, В.В. Раткин<sup>1</sup>, О.А. Елисеева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022

<sup>2</sup>ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер. 35, г. Москва, Ж-17, 119017; e-mail: [axanchuk@mail.ru](mailto:axanchuk@mail.ru); [ratkin@yandex.ru](mailto:ratkin@yandex.ru); [okaras@yandex.ru](mailto:okaras@yandex.ru)

Поступила в редакцию 4 февраля 2021 г.

Геологические наблюдения в сочетании с геохимическими, изотопными и термобарогеохимическими исследованиями данбуритовых руд уникальных по запасам боросиликатных скарновых месторождений Сихотэ-Алиня (Дальнегорское) и Памира (Ак-Архар) показали, что наиболее вероятным источником бора, предшествующего скарнообразованию, выступают лагунные толщи с эвапоритами в виде фрагментов океанических атоллов в составе субдукционного меланжа мезозойского возраста. На Дальнегорском месторождении прямым подтверждением заимствования бора скарнообразующими растворами из скоплений эвапоритов является изотопно утяжеленный состав бора ( $\delta^{11}\text{B} = +17.7\text{‰}$ ), отвечающий морским эвапоритам, и характерная обогащенность флюида литием.

**Ключевые слова:** субдукционный меланж, атоллы, эвапориты, скарны, данбурит, Сихотэ-Алинь, Памир.

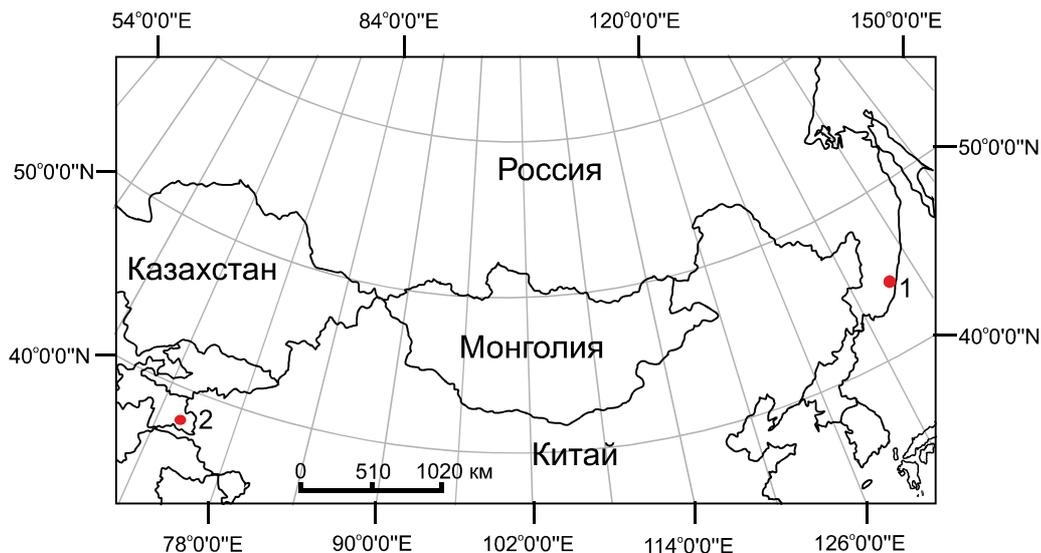
**ВВЕДЕНИЕ**

В мировом балансе борных руд ярко выражено доминирование галогенных и вулканогенно-осадочных месторождений с запасами руд в десятки млн тонн в пересчете на  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Месторождения, ассоциированные с зонами известковых и известково-магнезиальных скарнов многочисленны, но ограничены по запасам (не более нескольких сотен тысяч тонн) и не представляют промышленного интереса в отношении борных руд. Исключением из этой группы месторождений являются только два уникальных объекта: Дальнегорское месторождение в Сихотэ-Алине (44°34' с.ш. и 135°37' в.д.) и месторождение Ак-Архар на Памире (37°58' с.ш. и 73°42' в.д.) (рис. 1).

На Дальнегорском месторождении с зоной скарнирования объемом около 1 км<sup>3</sup> сопряжены залежи боросиликатных руд с достоверными запасами 300–350 млн тонн, при запасах  $\text{B}_2\text{O}_3$  в интервале 35–40 млн тонн [2]. Как итог, на площади менее 3 км<sup>2</sup> сосредоточено более 90 % запасов борных руд России. Месторождение Ак-Архар не столь значительно, но также относится к классу уникальных: запасы

его скарново-боросиликатной залежи объемом около 0.2 км<sup>3</sup> составляют 7.4 млн тонн  $\text{B}_2\text{O}_3$ .

При феноменальных запасах руд месторождения-гиганты проявлены и в Сихотэ-Алине, и на Памире как обособленные точечные объекты, полностью лишенные шлейфа однотипных мелких месторождений и рудопроявлений в их окружении и на прилегающей территории. Эта особенность оказалась вне внимания многочисленных исследователей, детально изучавших руды уникальных объектов [2, 5, 9, 11, 13]. При этом модельные генетические построения развивались исключительно на базе данных о физико-химических условиях минералообразования. Только в региональных металлогенических обобщениях [19] были высказаны представления, предметно учитывающие специфику геологических условий локализации Дальнегорского месторождения в составе аккреционно-складчатого комплекса Сихотэ-Алиня. На базе геологического анализа констатировалось, что наиболее вероятным источником бора скарновых руд этого месторождения выступают бороносные лагунные отложения фрагментов триасовых океанических атоллов в составе позднеюрско-раннемелового



**Рис. 1.** Схема расположения боросиликатных месторождений-гигантов.

1 – Дальнегорское; 2 – Ак-Архар.

субдукционного меланжа, оказавшегося в зоне флюидно-гидротермальной переработки со стороны поздний мел-палеоценовых гранитоидных интрузий. Эти представления нашли подтверждение при изучении изотопного состава руд Дальнегорского месторождения, указывающего на первично эвапоритовый источник бора [8], но не были суммированы.

Современный анализ условий локализации боросиликатных руд месторождения Ак-Архар на основе новейших обобщений геологии Памира определенно указывает на аналогичную сопряженность этого месторождения с поздне триасовым меланжем в составе аккреционно-складчатого комплекса Памирского орогена [27]. При этом сходство месторождений подчеркивается однотипной минералогией, специфической микроэлементного состава руд и рудообразующих флюидов.

В свете этих данных выполненное на основе результатов геологического и изотопно-геохимического изучения месторождений-гигантов обобщение представляется как актуальная работа, раскрывающая фундаментальные особенности минерации бора аккреционно-складчатых комплексов мезозойских орогенных поясов.

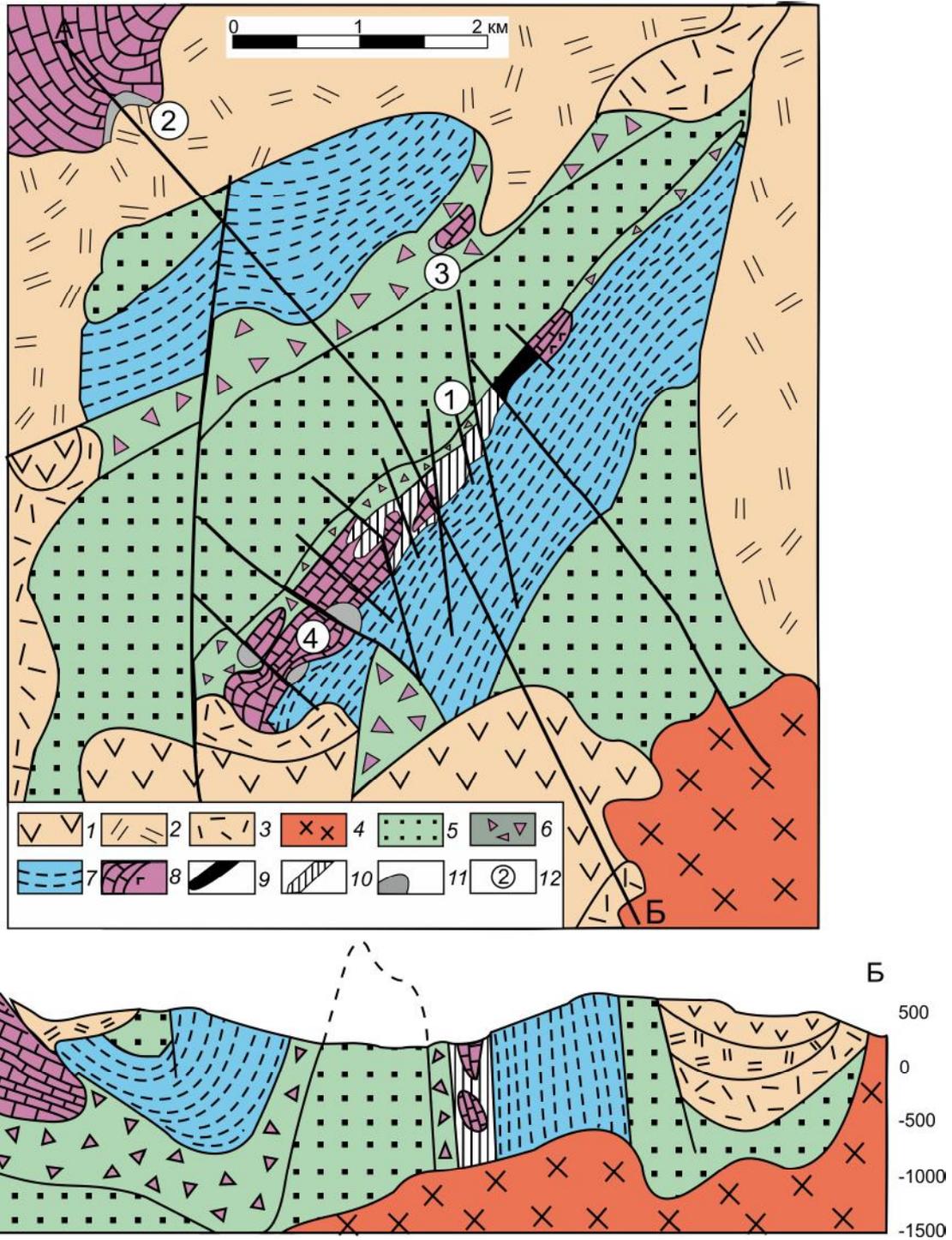
#### ГЕОЛОГИЯ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДАЛЬНЕГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

##### Геология

Дальнегорское месторождение локализовано в центре одноименного рудного района в юго-вос-

точной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса, сформированного как коллаж террейнов юрских и раннемеловых аккреционных призм, турбидитового бассейна и раннемеловой островной дуги [23]. Складчатые комплексы террейнов перекрыты с несогласием верхний мел-кайнозойскими вулканитами и прорваны одновозрастными интрузиями гранитоидов.

Рудовмещающие породы на месторождении представлены толщей субдукционного меланжа в составе аккреционной призмы Таухинского террейна. Призма была сформирована в конце юры–начале мела в южных широтах (южнее 32° с.ш.) и была перемещена в альб-раннесеноманское время вдоль края материка [20]. Характерной особенностью меланжа является обилие пластообразных крупных (до нескольких километров протяженностью) включений известняков триасового возраста, заключенных в песчано-сланцевом юрско-меловом матрикс призмы (рис. 2). Фиксировано [18], что известняки в первичном залегании подстилались океаническими базальтами и являются фрагментами гайотов, в которых выделяются стадии вулканического острова, атолла и подводного поднятия (гайота, симаунта). По данным детального палеонтологического и фациального изучения дальнегорских известняков разработана концептуальная модель осадконакопления, соответствующая системе типа срединно-океанического атолла, состоящей из хорошо развитой лагуны, окаймляющих полос рифов и оолитовых кос. В составе триасовых карбонатных пород, формирующих включения в меланже, преобладает типичная для



**Рис. 2.** Схема геологического строения центральной части Дальнегорского рудного района, по данным [6], 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; 5–6 – 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; 12 – месторождения: 1 – Дальнегорское боросиликатное; 2–4 – свинцово-цинковые: 2 – Верхнее; 3 – Первое Советское; 4 – Партизанское.

тропической зоны Панталассы микро- и макрофауна при фациальном доминировании морских лагунных образований [25]. Указание на лагунный характер формирования карбонатных пород определено согласуется с присутствием, по данным бурения (устное сообщение Н.А. Носенко), горизонтов доломитизированных известняков.

Структурно месторождение проявлено как гигантская ( $2.0 \times 0.5 \times 1.0$  км) зона известковых скарнов, заместивших пластообразное тело триасовых известняков в центре Дальнегорского горста.

### Минеральный состав и этапность образования

Скарнирование в объеме месторождения проявилось дважды [26]. На раннем этапе в теле известняков была образована гигантская колонна гроссуляр-волластонитовых скарнов, практически нацело заместивших известняки в интервале современных глубин от 0.5 до 1.2 км. С глубины 500 м и выше в составе скарнов присутствует также геденбергит с высокими содержаниями MgO (до 8–10 мас. %). Здесь, в центральной части колонны гидротермалитов, были сформированы древообразные ветвящиеся палеогидротермальные полости протяженностью в сотни метров при поперечном сечении в десятки метров. В результате разгрузки рудоносных гидротерм стенки полостей сначала были покрыты датолит-бустамит (дальнегорскит)-геденбергитовыми минеральными почками с ферросилитом [17, 21]. Вслед за этим полости были выполнены кристаллическим агрегатом данбурита. А в завершении гидротермального процесса раннего этапа, в позднекампанское время (78.4 млн лет, по данным [7]), в сохранившемся пространстве полостей инъецировался базальтовый расплав, который облекал друзы крупнокристаллического данбурита [15]. Позже на глубине около 1200 м от современной поверхности гроссуляр-волластонитовые скарны с данбуритом были ограничены секущей зону интрузией гранитоидов дальнегорского комплекса (рис. 2), датированного, по данным [1], U-Pb методом по циркону значениями  $60.45 \pm 0.65$  млн лет.

С поздним, палеоценовым (57.24 млн лет, по данным Ar-Ar датирования ортоклаза [10]) этапом скарнирования связано образование многочисленных месторождений и рудопроявлений скарновых и жильных полиметаллических руд Дальнегорского района. Оказавшаяся на фланге Партизанского месторождения, ранее сформированная залежь данбуритовых руд Дальнегорского месторождения была повторно скарнирована в объеме соразмерной зоны ильваит-андрадит-геденбергитовых скарнов, ассоциированных с интрузией гранитоидов дальнегорского комплекса,

подстилающих месторождение. В результате поздней гидротермальной переработки данбурит был превращен в крупнокристаллический кварц-кальцитовый агрегат, местами, на участках облеkania друзовых агрегатов данбурита базальтами, были образованы идеальные полнотельные псевдоморфозы кристаллов данбурита, сложенные ортоклазом, аксинитом, андрадитом, геденбергитом, датолитом, кварцем и кальцитом. Основной объем мобилизованного бора в процессе гидротермальной переработки ранних руд был связан в той же зоне в виде крупнокристаллического датолита и аксинита в ассоциации с поздними скарнами [12, 15].

Первичные данбуритовые руды сохранились от замещения и переотложения только в северо-восточной части Дальнегорского месторождения на максимально удаленном от Партизанского свинцово-цинкового месторождения участке (рис. 2).

### Условия образования и изотопно-геохимические особенности данбурита

Данные физико-химических исследований условий образования Дальнегорского месторождения со всей очевидностью подтверждают представления об двухэтапности формирования руд. При этом на изотопно-геохимическом уровне зафиксировано исключительное своеобразие ранних руд с данбуритом [26]. В первую очередь это касается специфики и изменения состава флюидов. В отличие от минеральных агрегатов поздних скарнов, ассоциированных с палеоценовой рудно-магматической системой, данбуритовый минеральный комплекс формировался в интервале температур 350–200 °C при участии насыщенных хлоридами натрия и магния растворов с нарастанием их солености от 2.9 до 16.34 мас. % экв. NaCl по мере снижения температуры. Минеральные ассоциации с данбуритом кристаллизовались при участии флюидов, аномально обогащенных бором и литием в интервале содержаний 6.20–53.80 и 0.104 г/кг раствора, соответственно [16]. Литиеносность флюидов раннего этапа подтверждается данными Н.А. Носенко [14]. Гроссуляр-волластонитовые скарны с данбуритом содержат литий и марганец, при средних значениях содержаний – 49.8 и 5629.8 г/т, соответственно. Специфика данбуритовых руд проявлена также в изотопно утяжеленном составе бора данбурита при значениях  $\delta^{11}\text{B} +17.7$  ‰ [8].

По данным изучения изотопного состава кислорода, значения  $\delta^{18}\text{O}$  данбурита Дальнегорского месторождения варьируют в интервале  $+2.5 \div +3.5$  ‰. Особенностью данбурита Дальнегорского месторождения является низкое содержание РЗЭ (3.83–5.83 г/т), с преобладанием (до 60 %) лантана и церия.

## ГЕОЛОГИЯ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-АРХАР

### Геология

Месторождение Ак-Архар расположено в восточной части Базар-Даринского хребта, в верховьях одноименной реки. Рудоносная площадь является частью Rushan-Pshart сутуры, на границе микроконтинентальных блоков Центрального и Южного Памира. Формирование сутуры сопряжено с триасовой субдукцией океанической плиты Палео-Тетиса под блок Южного Памира [27]. Рудовмещающий складчатый комплекс представлен породами поздне триасовой аккреционной призмы, перекрытой с несогласием в северной части территории терригенными породами средней юры. Призма сложена флишеидными отложениями позднего триаса и толщей субдукционного меланжа. Главными типами включений в меланже являются части океанического гайота в виде фрагментов базальтового основания вулканического острова и позднепермских и триасовых карбонатных «шапок» атолла и симаунта (рис. 3).

На месторождении Ак-Архар, включения триасового возраста представлены изометричными телами известняков с прослоями мергелей, доломитовых известняков и кремнистых сланцев. Пластообразные олистолиты сложены позднепермской толщей тонкого равномерного переслаивания (с мощностью прослоев 0.5–5.0 см) оолитовых, детритовых и конгломератовидных, частично доломитизированных известняков, кремней и кремнистых сланцев. Кремнистые разновидности – тонкоплитчатые серые, местами с фиолетовым оттенком. Присутствуют маломощные прослои глинистых сланцев и доломитсодержащих мергелей.

Характерной особенностью толщи является наличие горизонта туфов альбитофиринов, туфосланцев и туфопесчаников с линзами пелитоморфных известняков и известняковых туфоконгломератов. По характеру кремнисто-карбонатного осадконакопления слоистые толщи соответствуют фациям, формирование которых, наиболее вероятно, происходило в условиях мелководной лагуны атолла с синхронным проявлением вулканических эксгаляций.

Породы аккреционной призмы деформированы, участвуя в строении изоклиналиных складок субмеридиональной ориентации. При этом во включениях кремнисто-карбонатных пород проявлена мелкая интенсивная дисгармоничная складчатость с признаками пластичного течения пород и характерным хаотичным положением осевых плоскостей складок причудливой морфологии, от сундучных до изоклиналиных.

На месторождении отчетливо проявлено ороговование и фельдшпатизация пород. Преобразова-

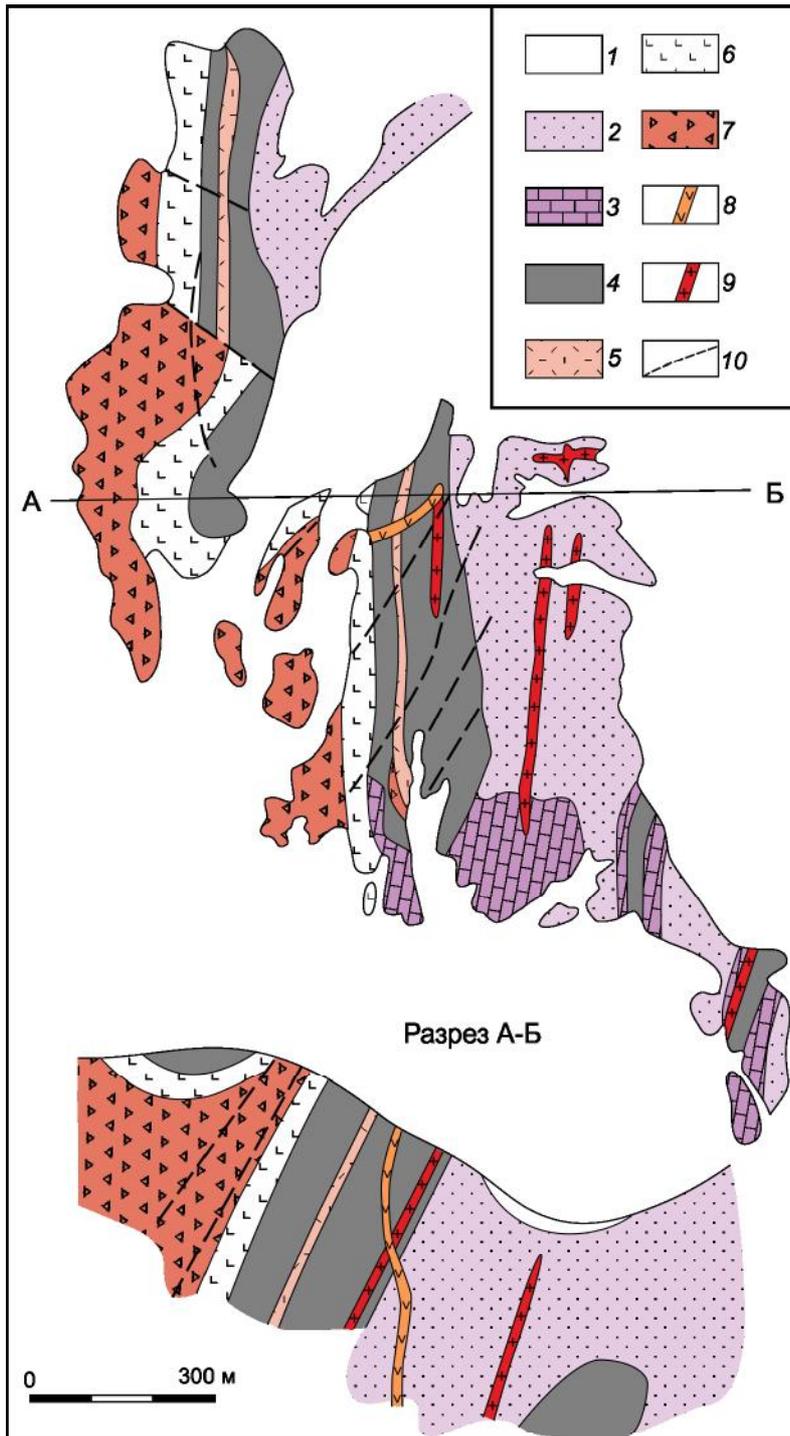
ния связываются с воздействием вскрытой скважины на глубине интрузии раннемеловых гранитоидов. Возраст интрузии оценивается, по данным К-Аг датирования по биотитам, значениями –  $110 \pm 3$  млн лет [11]. С гранитоидами ассоциирует дайковый комплекс гранит-порфиринов раннемелового возраста. Дайки диабазов – палеогенового возраста [11]. Все дайки являются отчетливо постскладчатыми.

### Минеральный состав и этапность образования

На месторождении все породы в ореоле ороговования в той или иной мере подвержены скарнированию. Пермские слоистые кремнисто-карбонатные породы превращены в скарноиды с сохранением полосчатых текстур. В пластовых рудных телах проявлена четкая перемежаемость кремнистых сланцев и кварц-данбурит-гранатовых пород с присутствием прослоев практически не измененных глинистых сланцев и известняков. Для кварц-данбурит-гранатовых образований характерны плотные роговиковые разновидности скарноидного типа. По составу гранат соответствует гроссуляру-андрадиту. Кварц-данбуритовый агрегат выполняет интерстиции и облекает, практически не корродируя, кристаллы граната. В составе скарноидов присутствуют в небольшом объеме полосы мелкокристаллического геденбергита. Тела полосчатых скарноидов с данбуритом пересекаются разломами и сопряженными с ними жилообразными гранат-геденбергитовыми скарнами с крупнокристаллическим данбуритом и датолитом. Представляется, что эти образования отвечают позднему этапу скарнирования, в процессе которого происходили гидротермальные преобразования и перетложение практически *in situ* ранних руд. Это фиксируется в пятнисто проявленном замещении раннего данбурита датолитом и кварцем в виде гнезд и секущих прожилков. В поздних крупнокристаллических скарнах вне зоны полосчатых руд боросиликаты представлены только датолитом и аксинитом. В скарнах также присутствуют сульфиды железа, меди и касситерит.

### Условия образования и изотопно-геохимические особенности данбурита

Предшествующие исследования условий образования данбурита ограничивались изучением крупнокристаллических поздних скарнов [4]. В обильных газово-жидких включениях, присутствующих в данбурите, по оптическим характеристикам определены твердые фазы, представленные галитом, кальцитом, датолитом и волосовидным агрегатом датолита – ботриолитом. Общая соленость растворов определена на уровне 8–10 %, при этом, по данным анализа водных вытяжек [4], фиксированы аномально высокие содержания бора: в интервале 4–8 %  $H_3BO_3$ . Данбурит



**Рис. 3.** Схема геологического строения месторождения Ак-Архар, по данным [9], с изменениями и дополнениями.

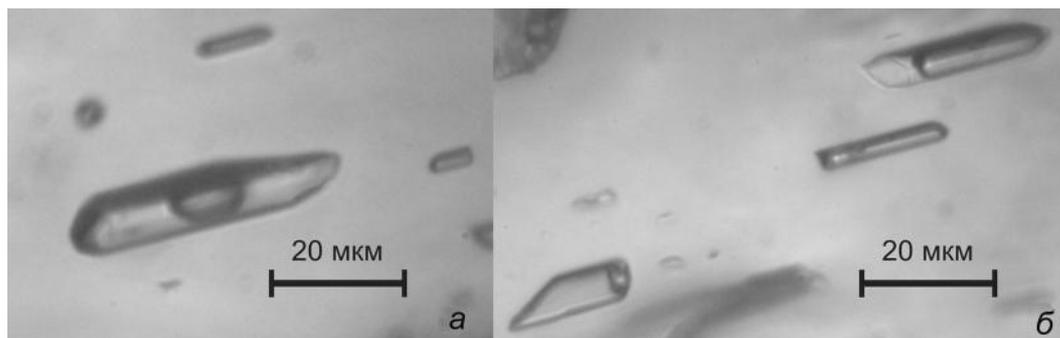
1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники и флишoids матрикса позднепермской (?) аккреционной призмы; 3–6 – породы фрагментов атоллов-гайотов (в том числе, 3–5 – «шапок» гайотов): 3 – нижне-вернетриасовые известняки, 4 – верхнепермские кремнисто-карбонатные породы лагунного происхождения, вмещающие боросиликатные рудные тела, 5 – вулканомитовые 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.

в поздних скарнах кристаллизовался вслед за гранатом и геденбергитом при температуре 250–385 °С.

В отличие от позднего, мелкокристаллический данбуриг из полосчатых скарноидов, по нашим наблюдениям, аномально насыщен мелкими (до микроуровня) включениями с доминированием, по данным рамановской спектроскопии\*, водно-газовой составляющей. Присутствуют также первичные включения

размером 25–35 мкм. Они компактно сгруппированы по зонам роста кристаллов данбуригита, но широко варьируют по соотношению фаз от существенно газовых до жидких (рис. 4).

\*LabRamHR 800, внешний Ar<sup>+</sup> лазер с длиной волны 514 нм, решетка 1800 ш/мм, спектральный диапазон 100–4000 см<sup>-1</sup>



**Рис. 4.** Первичные флюидные включения, сгруппированные по зонам роста кристаллов данбурита месторождения Ак-Архар.

*a* – термометрически изученное газопо-жидкое включение в данбурите; *б* – расшнурованные включения с варьирующим соотношением фаз.

Газовая фаза включений не содержит ювенильных газов, кроме паров воды. Мелкие существенно газовые включения не гомогенизируют до температуры 500 °С. Термометрически изучены лишь единичные газопо-жидкие, чередующиеся с газовыми включениями (рис. 4, *a*). Температура эвтектики таких включений составляет -20 °С, что соответствует системе NaCl–H<sub>2</sub>O. Температура плавления последней фазы во включениях -12 °С, то есть концентрация солей близка 16.0 мас. % экв. NaCl. Температура гомогенизации включений равна +410 °С.

Своеобразие данбурита также проявлено в особенностях его изотопного состава. По данным [3], кислород данбурита из скарноидов изотопно утяжелен, при значениях  $\delta^{18}\text{O}$  от +13.6 до +14.3 ‰. Изотопно утяжеленный кислород характерен и для кварца скарноидов. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  кварца варьируют в интервале от +10.7 до +16.0 ‰, при средних значениях +13.3 ‰.

По данным изучения микроэлементного состава данбурита из скарноидов фиксируется его высокая насыщенность REE (сумма около 31 г/т), при преобладании группы легких элементов над тяжелыми.

#### ОБСУЖДЕНИЕ: ИСТОЧНИКИ БОРА

Своеобразие месторождений гигантов и их отличие от рядовых месторождений боросиликатных руд определяются двумя главными факторами. Во-первых, это приуроченность к субдукционному меланжу с характерными включениями-фрагментами толщ лагунного происхождения. И, во-вторых, это преобладание в составе руд данбурита. По данным экспериментальных работ [9, 24] и данным анализа состава газопо-жидких включений в данбурите [16], его кристаллизация реализуется только при участии растворов, аномально обогащенных бором. Послед-

нее предполагает наличие высоко концентрированного источника бора, предшествующего скарнообразованию. Теоретически, в альтернативе, это могут быть либо очаги глубоко дифференцированной гранитной магмы с характерным проявлением пегматитообразования [16], либо скопления эвапоритов. Но отсутствие на изученных месторождениях-гигантах гранитоидов со сколько-нибудь заметно проявленным пегматитообразованием, при феноменально большом объеме данбуритовых руд, исключает первое. Следовательно, реализовался, с большой вероятностью, вариант участия эвапоритов.

На Дальнегорском месторождении прямым подтверждением заимствования бора скарнообразующими растворами из скоплений соответствующих эвапоритов является изотопно утяжеленный состав бора ( $\delta^{11}\text{B}=+17.7$  ‰), отвечающий морским эвапоритам, и аномальная обогащенность флюида бором и литием. Переотложение эвапоритов, судя по изотопному составу кислорода данбурита скарнов ( $\delta^{18}\text{O}$  от +2.5 до +3.5 ‰), происходило при участии растворов магматического происхождения, разбавленных метеорной составляющей. При этом наличие соленосных отложений в зоне генерации рудообразующих флюидов нашло отражение в весьма необычном повышении солености магматогенного флюида по мере развития процесса кристаллизации данбурита при понижении температуры раствора.

Наличие эвапоритового источника бора месторождения Ак-Архар выражено в признаках формирования скарноидов с данбуритом *in situ* в результате преобразования пластового тела слоистых кремнисто-карбонатных бороносных пород эвапоритовой природы в термальном поле гранитоидов. Особенностью рудовмещающих толщ является их участие в дисгармоничной складчатости, как и следует ожидать

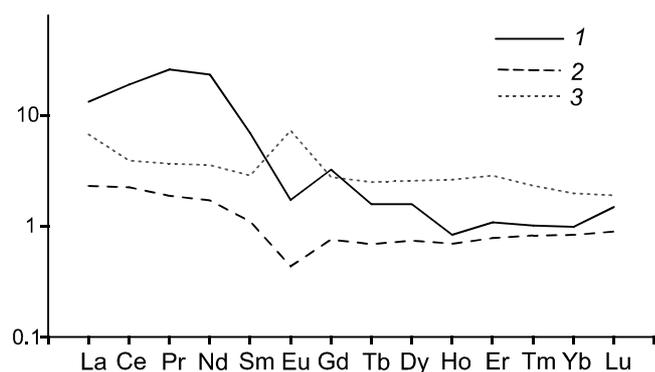


Рис. 5. Спайдерграммы боросиликатов из дальнегорских скарнов и скарноидов месторождения Ак-Архар.

1 – данбурит, Ак-Архар, 2 – данбурит, Дальнегорское, 3 – датолит, месторождение Дальнегорское. Нормировано к хондриту.

для пластов, содержащих соленосные отложения. Для полосчатых скарноидов с мелкокристаллическим данбуритом характерна ассоциированность с прослоями кремнистых пород – вероятных производных радиоларитовых илов лагунного происхождения. При резких четких контактах рудоносных скарноидов с кремнями последние практически не переработаны. Здесь же в перемежаемости со скарноидами присутствуют неизменные осадочные породы в виде маломощных выдержанных прослоев глинистых сланцев и линзы биогенных известняков. По данным геолого-разведочных работ, в объеме пластового рудного тела отсутствует гидротермальная переработка и вулканических пород. Суммированно, указанные особенности являются основанием для вывода об образовании скарноидов с данбуритом за счет избирательного замещения глинисто-карбонатных прослоев с боратами в слоистой толще, сформированной в лагуне на вершине гайота.

По данным термобарогеохимических исследований скарноидов месторождения Ак-Архар, можно также предполагать, что кристаллизация данбурита происходила при участии водного флюида при крайне низком отношении вода/порода в условиях термального метаморфизма соленосных эвапоритов при температуре около 400 °С. Метаморфогенная природа флюида отчетливо проявлена в утяжеленном изотоп-

Таблица. Химический состав (в %) и содержание микроэлементов (г/т) в данбурите дальнегорских скарнов и скарноидов месторождения Ак-Архар.

Оксиды Элементы	Месторождение Ак-Архар Обр. 389/2	Дальнегорское месторождение Обр. 295/3/1
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.98	25.04
SiO <sub>2</sub>	49.27	49.10
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	0.43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	0.10
MnO	<0.01	0.01
MgO	0.04	0.02
CaO	22.01	24.08
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.07
K <sub>2</sub> O	0.1	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.01	0.00
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.04	не обн.
ППП	0.44	0.60
Σ	100	100
Be	10.1	7.89
Sc	0.862	0.36
V	2.42	0.99
Cr	1.28	0.48
Co	0.281	0.33
Ni	3.12	1.47
Cu	25	12.51
Zn	18.4	11.29
Ga	0.769	0.56
Rb	1.47	1.20
Sr	315.3	396.7
Y	1.6	1.08
Zr	3.65	4.18
Nb	0.046	0.101
Mo	0.19	0.04
Cd	0.0649	0.027
Sn	2.79	0.15
Cs	0.2193	0.05
Ba	32.6	18.11
La	3.15	0.550
Ce	11.6	1.38
Pr	2.47	0.180
Nd	10.9	0.801
Sm	1.06	0.169
Eu	0.1	0.025
Gd	0.666	0.156
Tb	0.0593	0.026
Dy	0.402	0.189
Ho	0.0474	0.040
Er	0.18	0.130
Tm	0.0259	0.021
Yb	0.168	0.142
Lu	0.0379	0.023
Hf	0.157	0.129
Ta	0.0145	0.009
W	0.82	0.15
Pb	2.8	0.93
Th	0.261	0.15
U	0.322	0.07

Примечание. Анализы выполнены в ДВГИ ДВО РАН. Определение содержаний H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>, ППП, SiO<sub>2</sub> осуществлено методом гравиметрии, петрогенных элементов – методом атомно-эмиссионной спектроскопии, микроэлементов – масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7500c (Agilent Techn., США). Содержания B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приведены в пересчете суммы оксидов, с учетом H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> и потери при прокаливании на 100.0 %.

ном составе кислорода кварца и данбурита скарновидов. С учетом изотопного фракционирования в системе кварц–H<sub>2</sub>O [22], значения δ<sup>18</sup>O флюида превышали в период кристаллизации данбурита +10.0 ‰.

Представляется, что ассоциированность изученных скарновых данбуритовых месторождений-гигантов с точечными седиментогенными эвапоритовыми источниками бора, несмотря на различия условий его мобилизации и переотложения, находит свое подтверждение в высокой насыщенности минералообразующих флюидов бором и в однотипности микроэлементного состава данбурита (рис. 5). Относительная обогащенность редкоземельными элементами данбурита месторождения Ак-Архар (табл.) отражает его формирование за счет переработки бороносных эвапоритовых отложений практически *in situ*, исключая, как это случилось на Дальнегорском месторождении, мобилизацию и перемещение бора гидротермальным потоком из эвапоритового источника в обособленную зону скарнообразования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Боросиликатные месторождения-гиганты Сихотэ-Алиня и Памира сопряжены с толщами субдукционного меланжа, важнейшими компонентами которых являются фрагменты бороносных эвапоритовых толщ, сформированных на океанических атоллах. Формирование руд связано как собственно с преобразованием бороносных эвапоритовых толщ, так и с мобилизацией и переотложением бора на некотором удалении от эвапоритового источника в условиях интенсивной постаккреционной флюидно-магматической переработки субдукционного меланжа.

Гигантские объемы месторождений, их локальность и особенности минерального состава, при преобладании данбурита, отражают особенности точечного высококонцентрированного источника бора в виде соизмеримых скоплений бороносных эвапоритов в составе обособленных блоков дезинтегрированного в процессе субдукции океанического атолла.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аленичева А.А., Сахно В.Г. U-Pb датирование экстрезивно-интрузивных комплексов рудных районов южной части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (Россия) // Докл. АН. 2008. Т. 419, № 1. С. 81–85.
- Баскина В.А., Прокофьев В.Ю., Лебедев В.А., Добровольская М.Г., Якушев А.И., Горбачева С.А. Состав рудоносных растворов и источники бора Дальнегорского скарново-боросиликатного месторождения (Приморье, Россия) // Геология руд. месторождений. 2009. Т. 51, № 3. С. 203–221.
- Борщевский Ю.А., Борисова С.Л., Медведовская Н.И., Воронина Э.В., Попова Н.К., Бельков Е.И., Лисицын А.Е., Малинко С.В., Руднев В.В. Изотопный состав кислорода и углерода минералов боросиликатных месторождений как индикатор условий их образования и масштабов оруденения // Тезисы докладов Всерос. симпоз. по стабильным изотопам в геохимии. 1982. Т. II. С. 337–339.
- Владимирская Н.И. Генетические черты боросиликатов по результатам исследования газово-жидких включений // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1973. Ч. СII. Вып. 4. С. 394–401
- Говоров И.Н. Малые интрузии щелочных пород и боросиликатные скарны Дальнегорского района Приморья // Докл. АН СССР. 1976. Т. 230, № 1. С. 186–189.
- Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
- Дубинина Е.О., Баскина В.А., Авдеенко А.С. Природа рудообразующих растворов Дальнегорского месторождения: изотопные и геохимические параметры измененных вмещающих пород // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53, № 1. С. 65–82.
- Карась О.А., Раткин В.В. Дальнегорское скарновое месторождение: этапность и источники вещества боросиликатных руд // Докл. АН. 2014. Т. 455. С. 444–446. DOI: 10.7868/S0869565214100168
- Куршакова Л.Д. Физико-химические условия образования скарново-боросиликатных месторождений. М.: Наука, 1976. 274 с.
- Лейер П., Раткин В.В. Первое прямое <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar – определение возраста скарнов Дальнегорского рудного района на юге Дальнего Востока России // Докл. АН СССР. 1997. Т. 352, № 2. С. 222–225.
- Лисицын А.Е. Геологические основы поисков эндогенных месторождений бора. М.: Недра, 1974. 176 с.
- Малинко С.В. Происхождение уникальных скоплений боросиликатных руд Дальнегорского месторождения в Приморье // Минерал. журн. 1992. Т. 14, № 5. С. 3–11.
- Малинко С.В., Лисицын А.Е., Шергина Ю.П. Изотопно-геохимические параметры формирования скарново-борного оруденения в активных континентальных окраинах // Зап. ВМО. 1994. № 4. С. 10–20.
- Носенко Н.А. Геологическое строение и условия образования Дальнегорского борного месторождения, оценка запасов датолитовых и волластонитовых руд глубоких горизонтов по состоянию на 01.01.1996 год // Отчет геологоразведочной партии ОАО «Бор» по результатам поисков борных руд на глубоких горизонтах Дальнегорского борного месторождения в 1974–1989 гг. Дальнегорск, 1996.
- Носенко Н.А., Раткин В.В., Логвенчев П.И., Полохов В.П., Пустов Ю.К. Дальнегорское боросиликатное месторождение – продукт полихронного проявления процессов скарнирования // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312, № 1. С. 178–182.
- Прокофьев В.Ю., Перетяжко И.С., Смирнов С.З., Тагиров Б.Р., Грознова Е.О., Самсонова Е.А. Бор и борные кислоты в эндогенных рудообразующих флюидах. М.: НПЭЦ «Пасва», 2003. 189 с.
- Раткин В.В., Хетчиков Л.Н., Гнидаш Н.В., Дмитриев В.Е. Палеогидротермальный карст – важнейший фактор фор-

- мирования Дальнегорского боросиликатного месторождения // Тихоокеан. геология. 1993. № 2. С. 97–108.
8. Ханчук А.И., Никитина А.П., Панченко И.В., Бурый Г.И., Кемкин И.В. Палеозойские и мезозойские гайоты Сихотэ-Алиня и Сахалина // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307, № 1. С. 186–189.
  19. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–34.
  20. Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманские окраинно-континентальный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 3. С. 4–29.
  21. Щипалкина Н.В., Пеков И.В., Ксенофонтов Д.А., Чуканов Н.В., Белаковский Д.И., Кошлякова Н.Н. Дальнегорскит  $\text{Ca}_3\text{Mn}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$  – новый пироксеноид со структурой бустамита, породообразующий минерал известковых скарнов Дальнегорского боросиликатного месторождения (Приморский край, Россия) // Зап. РМО. 2020. Ч. CXLVIII. № 2. С. 61–75. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1482.04
  22. Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.K. Oxygen isotope exchange between quartz and water // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 3057–3067. DOI: 10.7868/S0024497X13060025
  23. 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 // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 120. P. 117–138. DOI: 10.1016/j.jseas.2015.10.023
  24. Morgan G.V., London D. Experimental reactions of amphibolites with boron-bearing aqueous fluids at 200 Mpa: implications for tourmaline stability and partial melting in mafic rocks // Contrib. Mineral. & Petrol. 1989. V. 102, N 3. P. 281–297.
  25. Peyrotty G., Martini R., Rigaud S., Kemkin I. Sedimentology and biostratigraphy of Upper Triassic atoll-type carbonates from the Dalnegorsk area, Taukha terrane, Far East Russia // Global and planetary change. 2020. V. 184, 103072. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.103072
  26. Ratkin V.V., Eliseeva O.A., Pandian M.S., Orekhov A.A., Mohapatra M., Vishnu Priya S.K. Stages and formation conditions of productive mineral associations of the Dalnegorsk borosilicate deposit, Sikhote Alin // Geol. Ore Deposits. 2018. V. 60, N 8. P. 672–684. DOI: 10.1134/S107570151808007X
  27. Yogibekov D., Sang M., Xiao W., Windley B.F., Mamadjanov Y., Yang H., Huang P., Aminov J., Vatanbekov F. 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 // Geol. J. 2020. V. 55. P. 7837–7857. DOI: 10.1002/gj.3906

*Рекомендована к печати В.Г. Хомичем*

после доработки 30.03.2021 г.

принята к печати 26.09.2021 г.

*A.I. Khanchuk, V.V. Ratkin, O.A. Eliseeva*

### **Skarn-borosilicate giant deposits: derivatives of the fluid-hydrothermal reworking of atoll fragments in a subduction mélange of Mesozoic orogenic belts of Asia**

Geological observations coupled with geochemical, isotopic and thermobaric-geochemical research of danburite ores of skarn-borosilicate deposits unique in their reserves in the Sikhote-Alin (Dalnegorskoe) and in the Pamir (Ak-Arkhar) indicated lagoonal strata and evaporites in the form of atoll fragments within the Mesozoic subduction mélange as the most probable boron source, which preceded the skarn formation. At the Dalnegorskoe deposit, the fact that boron is mobilized by skarn-forming solutions from evaporite accumulations is directly confirmed by isotopically heavier composition of boron ( $\delta^{11}\text{B}=+17.7\text{‰}$ ) corresponding to marine evaporites, and a typical enrichment of fluid in lithium.

**Key words:** subduction mélange, atolls, evaporites, skarns, danburite, Sikhote-Alin, Pamir.