

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 553.637

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-104-118>Изотопный состав кислорода борных минералов  
из курчатовит-сахайтовых руд месторождения СолонгоСветлана Юрьевна Избродина<sup>a</sup>, Виктор Федорович Посохов<sup>b</sup><sup>a,b</sup>Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Автор, ответственный за переписку: Избродина Светлана Юрьевна, izbrodina@mail.ru

**Резюме.** Борно-магнетитовое скарновое месторождение Солонго (Западное Забайкалье, Россия) обладает промышленными запасами редких курчатовит-сахайтовых руд. Целью данной работы являлось изучение изотопного состава кислорода борных минералов из курчатовит-сахайтовых руд месторождения. Исследование образцов проводилось с помощью современных методов электронной микроскопии, масс-спектрометрии. На оригинальных фотоснимках прозрачных шлифов, изображениях образцов в обратно отраженных электронах приведены минеральные ассоциации сахаита и курчатовита: полиминеральный ссайбелиит-сибирскит-кальцитовый агрегат, роуит, федоровскит, людвицит, форстерит, серпентин, титанит, сфалерит, магнетит, якобит, апатит, турнорит. Приведена характеристика эволюции борных минералов на месторождении Солонго. Были получены следующие показатели изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  v-SMOW в минералах: в сахаите – +1 ‰, в роуите – +2,7 ‰, в курчатовите – +1,9 ‰, в магнетите – -0,3 ‰. В результате сравнения изотопных данных по сахаиту с уже имеющимися литературными данными обнаружено, что сахаит борных руд месторождения имеет относительно облегченный состав кислорода. Такие показатели могут объясняться участием метеорных вод, в том числе талых вод снежников и многолетней мерзлоты, в процессе формирования месторождения, а также пониженными показателями изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  доломитов Озернинского рудного узла, с преобразованием которых связывается формирование сахаита.

**Ключевые слова:** сахаит, курчатовит, эндогенные бораты, изотопы кислорода, магнезиальные скарны, Солонго, Озернинский рудный узел

**Финансирование:** Работы проводились в рамках базовой темы Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН. Номер государственной регистрации – АААА-А21-121011390003-9.

**Благодарности:** Работы выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Гео-спектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ). Авторы выражают особую благодарность аналитику Е. А. Хромовой, а также огромную благодарность Г. И. Дорошкевичу, Г. С. Риппу и музею Бурятского научного центра СО РАН за предоставленные образцы.

**Для цитирования:** Избродина С. Ю., Посохов В. Ф. Изотопный состав кислорода борных минералов из курчатовит-сахайтовых руд месторождения Солонго // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 104–118. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-104-118>.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION  
OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Oxygen isotopic composition of boron minerals  
from kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo depositSvetlana Yu. Izbrodina<sup>a</sup>, Viktor F. Posokhov<sup>b</sup><sup>a,b</sup>Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Corresponding author: Svetlana Yu. Izbrodina, izbrodina@mail.ru

© Избродина С. Ю., Посохов В. Ф., 2022



**Abstract.** The Solongo boron-magnetite skarn deposit (Western Transbaikalia, Russia) features industrial reserves of rare kurchatovite-sakhaite ores. The purpose of the work is to study the oxygen isotopic composition of boron-bearing minerals from the kurchatovite-sakhaite ores of the deposit. The samples were studied using modern methods of electron microscopy, mass spectrometry. The original photographs of transparent thin sections and images of the samples in backscattered electrons show mineral associations of sakhaite and kurchatovite including polymineral szaibeliite-sibirskite-calcite aggregate, roweite, fedorovskite, ludwigite, forsterite, serpentine, titanite, sphalerite, magnetite, jacobsonite, apatite, turneauite. The evolution of the Solongo deposit boron minerals is described. The following indicators of the oxygen isotopic composition  $\delta^{18}\text{O}$  v-SMOW in minerals have been obtained: sakhaite – +1 ‰, roweite – +2.7 ‰, kurchatovite – +1.9 ‰, magnetite – -0.3 ‰. The comparison of isotopic data on sakhaite with the available literature data has shown that the sakhaite of Solongo boron ores has a relatively light oxygen composition. The indicators obtained are attributed to the participation of meteoric waters including melt waters of firn basins and permafrost, in the formation process of the deposit, as well as reduced index of the oxygen isotope composition  $\delta^{18}\text{O}$  of the dolomites of the Ozerninsky ore cluster, whose transformation is associated with the sakhaite formation.

**Keywords:** sakhaite, kurchatovite, endogenic borates, oxygen isotopes, magnesian skarns, Solongo, Ozerninsky ore cluster

**Funding:** The research was carried under the core theme of the Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. State registration number is AAAA-A21-121011390003-9.

**Acknowledgements:** The research works were conducted using the equipment of the Shared Research Facilities "Geospectrum" of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (Ulan-Ude). The authors pay special tribute to the analyst E. A. Khromova, acknowledge the assistance of G. I. Doroshkevich, G. S. Ripp and thank the museum of the Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for providing the samples.

**For citation:** Izbrodina S. Yu., Posokhov V. F. Oxygen isotopic composition of boron minerals from kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):104-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-104-118>.

## Введение

Кальциево-магниевый борат курчатовит и карбонатоборат сахаит являются типоморфными минералами для скарновых месторождений бора, в которых магнезиальные скарны подверглись известково-скарновому замещению. Сложность генезиса подобных месторождений определяется сочетанием процессов, сопутствующих скарнообразованию, и процессов, связанных с наложением более позднего метаморфизма и гидротерм, что приводит к формированию разнообразных, зачастую уникальных минералов и руд.

Такие месторождения часто являются комплексными, сочетая борные руды с магнетитовой, оловянной, свинцово-цинковой, вольфрамовой минерализацией. Месторождение Солонго первоначально было открыто в 1960 году как «Магнетитовое» при проверке аэромагнитных аномалий, и только при дальнейшем исследовании здесь были обнаружены богатые курчатовит-сахаитовые борные руды. Оно является местом первой находки шести боросодержащих минералов: курчатовита  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}^{2+})[\text{B}_2\text{O}_5]$  [1], солонгоита  $\text{Ca}_2\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_4\text{Cl}$  [2], федоровскита  $\text{Ca}_2\text{Mg}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_6$  [3], гексагидроборита  $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [4], ви-

тимита  $\text{Ca}_6\text{B}_{14}\text{O}_{19}(\text{SO}_4)(\text{OH})_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  [5], бурятита  $\text{Ca}_3(\text{Si}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})\text{SO}_4\text{B}(\text{OH})_4(\text{OH}, \text{O})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  [6]. Активно изучавшееся в 60–70-х годах прошлого столетия, в настоящий момент месторождение является объектом для исследования с целью расширения существующих представлений о минеральном и изотопном составе борных минералов, условиях их образования и составе рудообразующих флюидов.

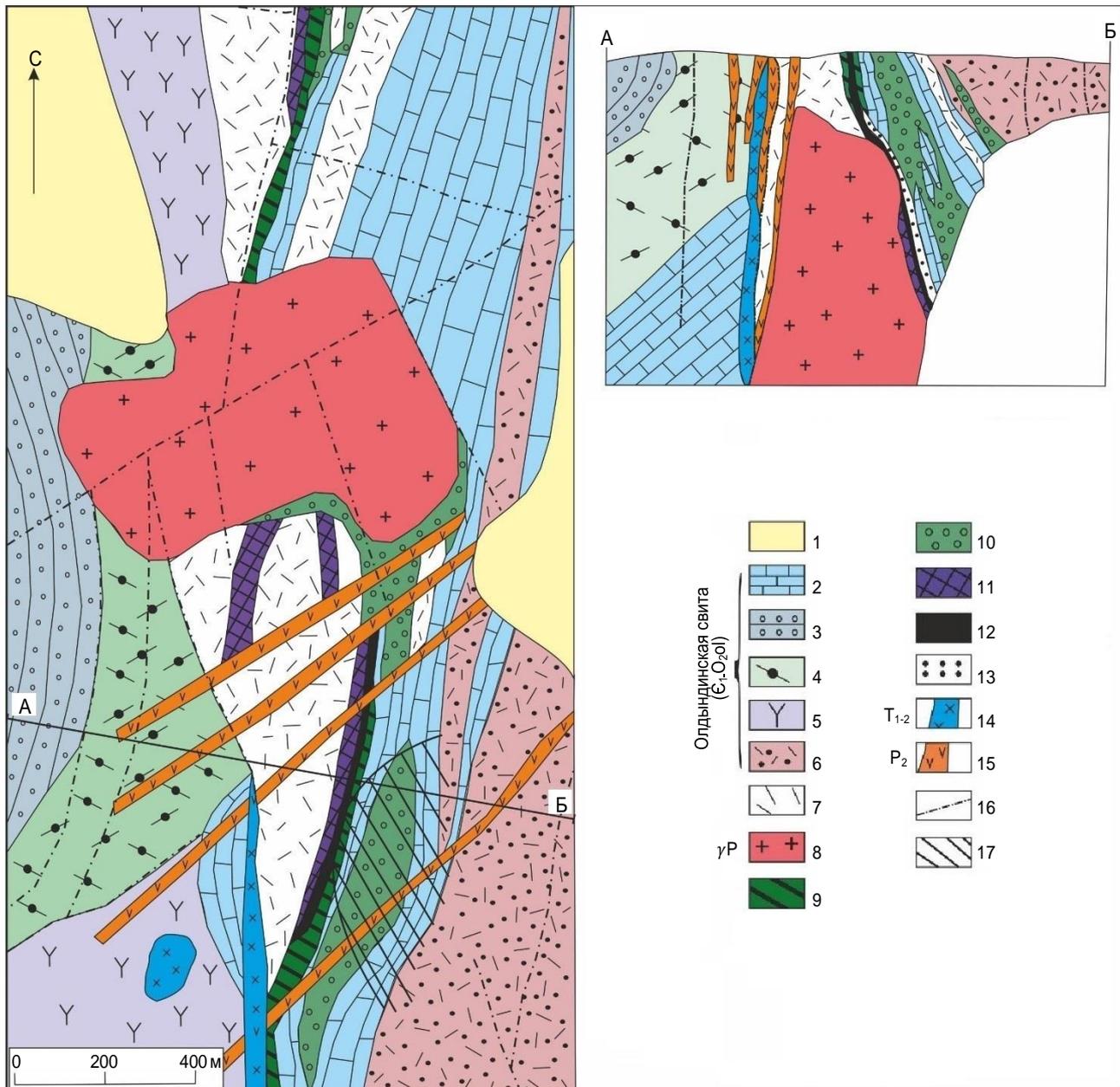
Месторождение Солонго находится в восточной части Озернинского рудного узла на юге Еравнинского района Республики Бурятии. Рудный узел представляет собой крупный останец палеозойской Удино-Витимской островодужной системы в поле развития гранитоидов Ангаро-Витимского батолита [7]. Здесь выявлено более 20 различных месторождений и рудопроявлений: в западной зоне распространены месторождения железа и полиметаллов, а в восточной – месторождения сфалеритовых, железных, борных, оловянных руд.

Месторождение расположено между пачками вулканогенных пород среднего и кислого состава и карбонатных пород – известняков и доломитов (рис. 1). Возраст пород оценивается как нижнепалеозойский<sup>1</sup>. В центре место-

<sup>1</sup> Виноградов Б. К., Дорошкевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

рождения на дневную поверхность в виде штока выходит массив лейкократовых высококальциевых гранитов, абсолютный возраст кото-

рых по данным уран-свинцового метода (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией) составляет



**Рис. 1. Схематическая геологическая карта и геологический разрез месторождения Солонго [9] (с изменениями авторов):**

1 – четвертичные отложения; 2 – известняки мраморизованные; 3 – туфоалевролиты; 4 – туфы средних эффузивов; 5 – эффузивы среднего состава; 6 – туфы кислых эффузивов; 7 – ороговикованные эффузивы и роговики; 8 – лейкократовые граниты (Зазинский комплекс); 9 – кальцифиты; 10 – скарны известковые; 11 – руды магнетитовые с реликтами магнезиальных скарнов; 12 – руды людвигит-магнетитовые; 13 – руды сахаит-курчатовитовые; 14 – дайки долеритовых порфиров; 15 – дайки граносиенит-порфиров; 16 – тектонические нарушения; 17 – проекция залежи сахаит-курчатовитовых руд на дневную поверхность

**Fig. 1. Schematic geological map and a geological section of the Solongo deposit [9] (amended by the authors):**

1 – Quaternary deposits; 2 – marmorized limestones; 3 – tuff siltstones; 4 – medium effusive tuffs; 5 – effusives of medium composition; 6 – acid volcanic tuffs; 7 – hornfelsed effusives and hornfels; 8 – leucocratic granites (Zazinsky complex); 9 – calciphyres; 10 – calcareous skarns; 11 – magnetite ores with magnesian skarn relics; 12 – ludwigite-magnetite ores; 13 – sakhaite-kurchatovite ores; 14 – dolerite porphyrite dikes; 15 – granosyenite-porphyry dikes; 16 – tectonic faults; 17 – projection of the sakhaite-kurchatovite ore deposit on the daylight surface



287,1 ± 4,2 млн лет [8]. Гранитный массив относится к Зазинскому комплексу и входит в состав Ангаро-Витимского батолита. Содержание бора и урана в гранитах месторождения Солонго несколько повышены по сравнению с содержаниями этих элементов в ближних частях Зазинского плутона. Интрузив вытянут в субмеридиональном направлении и формирует основание удлиненного гребневидного выступа в южной части месторождения, а в северной части круто погружается на глубину. Вдоль контакта с гранитной интрузией наблюдается ореол ороговикованных, скарнированных пород. Интрузивный магматизм проявлен на месторождении также дайками позднепалеозойских граносиенитов и мезозойских долеритов<sup>2</sup>.

Скарнирование особенно проявлено в юго-восточной части месторождения. Магнезиальные скарны характеризуются клиногумитовым, форстеритовым, пироксен-форстеритовым, форстерит-флогопитовым составом. В настоящее время они представлены реликтами и практически полностью замещены известковыми скарнами и магнетитом. Замещение известковыми скарнами выражается в развитии пироксена, граната, везувиана по магнезиально-скарновым породам. Датировка флогопита из магнезиальных скарнов, проведенная калий-аргоновым методом, выявила широкий диапазон значений (155–337 млн лет), что не позволяет однозначно трактовать время их формирования<sup>3</sup>. К магнезиально-скарновой зоне со стороны карбонатных пород примыкает зона кальцифиоров. Известковые скарны широко развиты на месторождении в виде линзо- и пластообразных тел в зоне переслаивания карбонатных и эффузивных пород, имеют преимущественно пироксен-гранат-везувиановый состав.

Кроме ороговикования и скарновых процессов на месторождении отмечаются признаки более низкотемпературных метасоматических процессов, в частности грейзенизации, пропилитизации, окварцевания.

Наиболее широко представлена на месторождении магнетитовая минерализация, приуроченная большей частью к магнезиальным скарнам и эффузивам. Магнетитовые руды представлены несколькими линзо- и пластообразными телами, отличающимися по минеральному составу и содержанию железа (от 20 до 60 %). Сфалеритовое оруденение распространено в известняках, скарнах и кальцифиорах, но представлено бедными рудами. В грейзенах локализуется молибденовая, вольфрамовая и оловянная минерализация. Основную ценность месторождения представляют борные руды.

Борные руды Солонго расположены в магнезиальных и известковых скарнах, а также в кальцифиорах, которые примыкают к магнезиально-скарновой зоне со стороны карбонатных пород. Уникальное разнообразие минералов бора объясняется тем, что на месторождении развиты магнезиальные скарны, известковые скарны, а также известковые скарны, развитые с замещением магнезиальных (апомагнезиальные). Соответственно, развиты три минеральных типа эндогенного борного оруденения<sup>4</sup> [10]:

1. Железо-магниевого (людвигит, варвикит) и магниевого (суанит, ссайбелиит, котоит, флюоборит) бораты, характерные для кальцифиоров и магнезиальных скарнов. Борная минерализация данного типа на Солонго достаточно распространена, локализуется в кальцифиорах, прилегающих к магнетитовым рудам.

2. Боросиликаты, характерные для известковых скарнов (датолит). Минерализация этого типа на Солонго отмечается в гранат-везувиановых скарнах и не имеет практического значения.

3. Специфический типоморфный комплекс кальциево-магневых боратов (курчатовит, клинокурчатовит, бораты серии роуита-федоровскита), карбонатоборатов (сахайт, боркарит) и кальциевых боратов (фроловит, сибирскит, вимсит, пентагидроборит, солонгоит,

<sup>2</sup> Виноградов Б. К., Дорошкевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

<sup>3</sup> Малинко С. В. Вещественный состав и условия образования боратовой минерализации, генетически связанной с известковыми скарнами. М.: Изд-во ВИМС, 1970. 259 с.

<sup>4</sup> Там же.



гексагидроборит), характерный для апомагнезиальных скарнов. Скарны данного типа образуют линзовидную залежь мощностью до 10 м с простиранием и падением не менее чем 600 м, которая приурочена к внешним частям магнезиально-скарновых зон и кальцифирам. Уникальность состава борной минерализации третьего типа определяется присутствием в ассоциации железо-магниевого, магниевого, кальциевого, магниевое-кальциевого и магниевое-марганцево-кальциевого боратов. Несмотря на неравномерное распределение различных боратов, выделяют курчатовит-сахайтовый и лювигит-сахайтовый типы руд. При этом первые являются более богатыми и содержат от 5 до 26 % борного ангидрида [10].

Курчатовит  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}^{2+})[\text{B}_2\text{O}_5]$  представляет собой кальциево-магниевый аналог суанита. Следует отметить, что выделения курчатовита и его модульного полиморфа – клинокурчатовита – известны на месторождениях России (Титовское, Тас-Хаяхта, Ново-Фроловское Турьинского рудного поля), Казахстана (Саяк-IV), Японии (рудник «Фука» в префектуре Окаяма), Афганистана (Гбаргей) [11, 12].

Сахайт  $\text{Ca}_{12}\text{Mg}_4[\text{Cl}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_4(\text{BO}_3)_7]$  – карбонато-борат кальция и магния – является менее распространенным минералом. Он образует изоморфную серию с харкеритом  $\text{Ca}_{12}\text{Mg}_4\text{Al}(\text{CO}_3)_5(\text{BO}_3)_3(\text{SiO}_4)_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , в котором позиции  $[\text{BO}_3]^{3-}$  изоморфно замещаются пентамером  $\{\text{Al}[\text{SiO}_4]_4\}^{13-}$  и частично ионами  $\text{Cl}^-$  и  $\text{OH}^-$ . Кроме месторождения Солонго, расположенного в Бурятии, тела сахайтовых пород были обнаружены на месторождениях и рудопроявлениях Эфкачан, Чыбагалах Селенянского кряжа и Снежное, Керел, Докучан, Титовское (участки Моральный, Лагерный, Лю-Лю) хребта Тас-Хаяхта, входящих в систему хребта Черского (Якутия), а также на месторождениях Саяк-IV (Казахстан) и Килипин (Китай)<sup>5</sup> [13].

В данной статье представлены результаты изучения изотопного состава кислорода для курчатовит-сахайтовых руд месторождения Солонго.

## Материалы и методы исследования

В рамках исследования был проведен анализ образцов борных руд с месторождения Солонго. Некоторые из них представляют собой части керны из скважины 32б, другие не имеют четкой привязки.

Аналитические данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ). Образцы пород и руд исследовались в прозрачных шлифах и аншлифах с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51. Микроструктурные особенности, взаимоотношения минералов исследованы на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионной приставкой для количественного анализа Inca-Energy. Измерения изотопного состава кислорода выполнялись в виде  $\text{O}_2$  на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт – образец). Подготовка образцов для определения величин  $\delta^{18}\text{O}$  проводилась с использованием метода лазерного фторирования на опции «лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов» в присутствии в качестве реагента пентафторида брома по методу, описанному в статье [14]. Для изотопного анализа кислорода использовались только чистые минералы (в виде осколков) общим весом 1,5–2,5 мг. Расчеты  $\delta^{18}\text{O}$  были выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Правильность полученных значений контролировалась регулярными измерениями собственного внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного стандарта Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва) Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин  $\delta^{18}\text{O}$  находилась на уровне  $(1\sigma) \pm 0,2 \%$ .

Для идентификации борных минералов был проведен рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре D8 Advance фирмы BRUKER AXS (Германия):  $\text{CuK}\alpha$ -излу-

<sup>5</sup>Малинко С. В., Халтурина И. И., Озол А. А., Бочаров В. М. Минералы бора: справочник. М.: Недра, 1991. 231 с.



чение,  $2\theta = 10-70^\circ$ , выдержка – 0,1 с в точке, шаг  $\sim 0,021^\circ$ , детектор Vantec-1. На данном этапе было использовано оборудование Центра коллективного пользования Байкальского института природопользования СО РАН (г. Улан-Удэ).

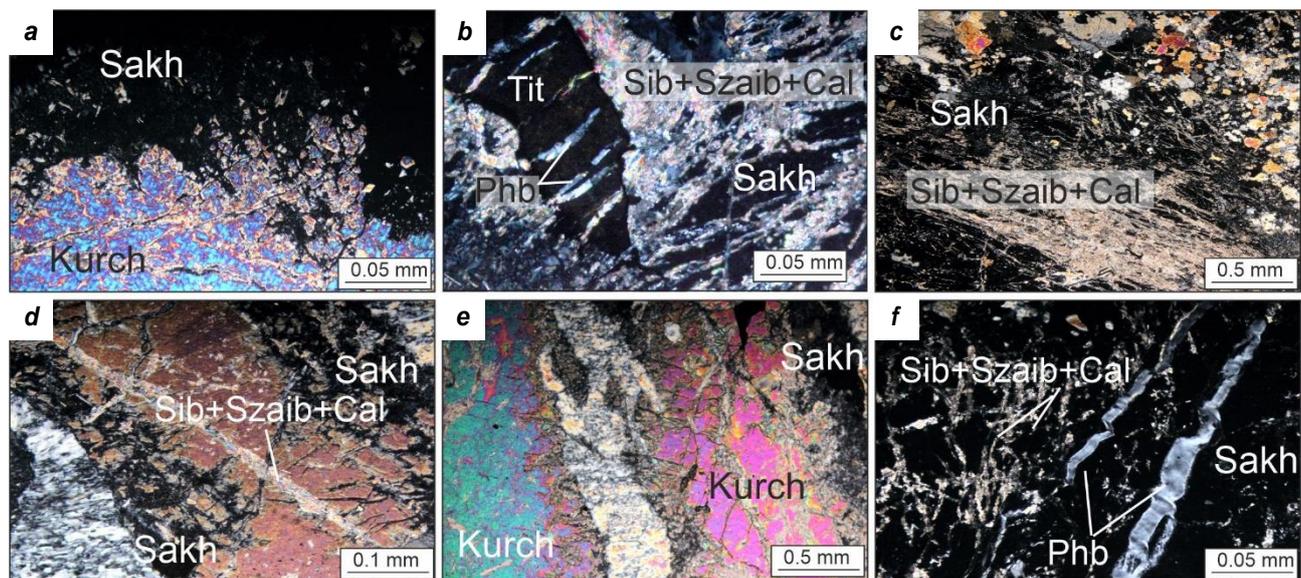
### Результаты исследования и их обсуждение

В статье представлены результаты исследования образцов курчатовит-сахайтовой руды месторождения Солонго. Макроскопически сахайт-курчатовитовые руды представляют собой серые или буровато-зеленые породы. Образцы имеют преимущественно сахайтовый состав с содержанием минерала 50–60 %. В меньшем объеме наблюдается курчатовит (до 15–30 %). В переменных количествах наблюдаются ссайбелиит, сибирскит, кальцит, титанит, якобсит, сфалерит, форстерит, людвицит, роуит, пентагидроборит.

Сахайт образует мелкозернистую массу оливково-зеленого цвета. Единичные зерна

бесцветные и прозрачные, блеск стеклянный вплоть до слабожирного. Излом раковистый. В шлифах минерал легко идентифицируется благодаря изотропности (рис. 2, а). При анализе образца на электронном микроскопе было определено, что сахайт содержит небольшое количество кремния ( $\text{SiO}_2$  от 1,45 до 3,59 масс. %), железа (1,76–2,17 масс. %) и марганца (0,52–0,85 масс. %).

Курчатовит образует изометричные зерна размером от нескольких долей миллиметра до 2 см в длину светло-серого цвета. В шлифе характерны яркие от сине-зеленого до малинового цвета интерференции (см. рис. 2, а, е). Зерна курчатовита часто трещиноватые, имеют корродированные границы, а также покрыты сетью мелких (от сотых до десятых долей миллиметра) прожилков вторичных борных минералов. Минерал наиболее часто образует тесные сростания с сахайтом (см. рис. 2, а, е; рис. 3, а, б). Наблюдается замещение курчатовита сахайтом, в сахайте остаются мirmekитовые реликтовые включения курча-

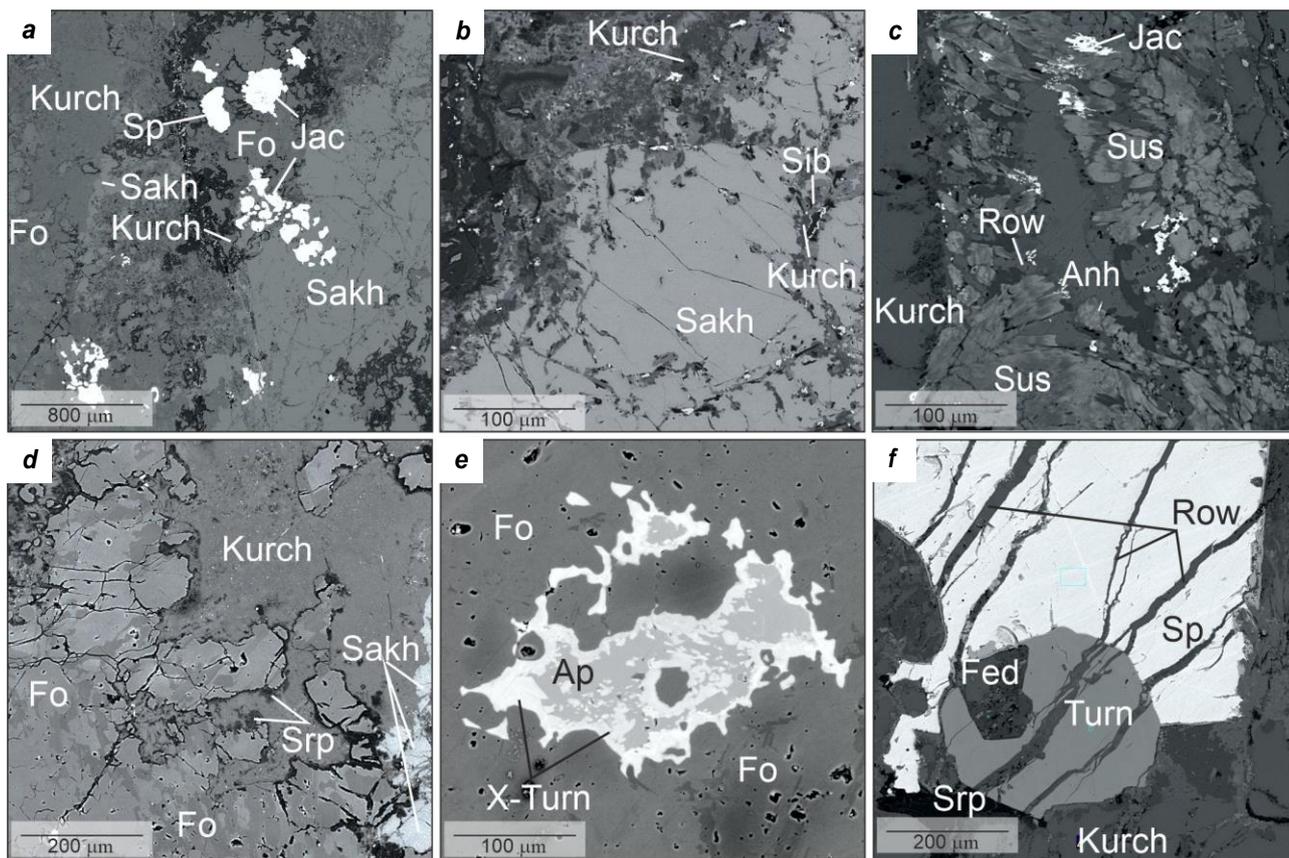


**Рис. 2. Петрографические особенности и взаимоотношения минералов курчатовит-сахайтовых руд месторождения Солонго (фотографии прозрачных шлифов, перекрестно поляризованный свет):**

- а – взаимоотношения курчатовита и сахайта; б, с – замещение сахайта сибирскит-ссайбелиит-кальцитовым агрегатом; д – сибирскит-ссайбелиит-кальцитовый прожилок в курчатовите; е – курчатовит, секущийся прожилком вторичного борного минерала; ф – прожилки пентагидроборита в сахайтовой породе, замещаемой полиминеральным агрегатом
- Sakh – сахайт; Kurch – курчатовит; Sib – сибирскит; Szaib – ссайбелиит; Cal – кальцит; Phb – пентагидроборит

### Fig. 2. Petrographic features and relationships of kurchatovite-sakhaite ore minerals of the Solongo deposit (images of transparent thin sections under the cross polarized light):

- a – kurchatovite and sakhaite relationships; b, c – sakhaite substitution by the sibirskite-szaibeliite-calcite aggregate; d – sibirskite-szaibeliite-calcite veinlet in kurchatovite; e – kurchatovite cut by a veinlet of a secondary boron mineral; f – veinlets of pentahydroborite in the sakhaite rock replaced by a polymineral aggregate
- Sakh – sakhaite; Kurch – kurchatovite; Sib – sibirskite; Szaib – szaibeliite; Cal – calcite; Phb – pentahydroborite



**Рис. 3. Характер взаимоотношений минералов в курчатовит-сахайтовых рудах месторождения Солонго, образец Сол-844 (изображение в обратно отраженных электронах):**  
 а – взаимоотношения сахаита, курчатовита и форстерита; б – курчатовит и сибирскит в обрамлении выделения сахаита; с – взаимоотношения суссексита, роуита и курчатовита; д – замещение форстерита серпентином; е – развитие минерала, близкого по составу к турнориту, по апатиту; ф – турнорит и сфалерит, секущиеся прожилками роуита  
 Sakh – сахаит; Kurch – курчатовит; Sp – сфалерит; Fo – форстерит; Jac – яacobсит;  
 Sib – сибирскит; Sus – суссексит; Anh – ангидрит; Row – роуит; Srp – серпентин;  
 Ap – апатит; Turn – турнорит; Fed – федоровскит

**Fig. 3. Relationship nature of minerals in the kurchatovite-sakhaite ores of the Solongo deposit, sample Sol-844 (backscattered electron image):**

а – sakhaite, kurchatovite and forsterite relationships; б – kurchatovite and sibirskite framed by the sakhaite excretion; с – sussexite, roweite, and kurchatovite relationships; д – forsterite substitution by serpentine; е – development of a mineral similar in composition to turneaureite in terms of apatite; ф – turneaureite and sphalerite cut by roweite veinlets  
 Sakh – sakhaite; Kurch – kurchatovite; Sp – sphalerite; Fo – forsterite; Jac – jacobsite; Sib – sibirskite; Sus – sussexite; Anh – anhydrite; Row – roweite; Srp – serpentine; Ap – apatite; Turn – turneaureite; Fed – fedorovskite

товита (см. рис. 2, а). Иногда реликты курчатовита наблюдаются в обрамлении выделений сахаита (см. рис. 3, б).

Сахаит и курчатовит подвергаются интенсивному преобразованию под воздействием гидротермальных процессов. Результатом этого является развитие прожилков полиминерального агрегата, состоящего из ссайбелиита  $Mg_2[(OH)B_2O_4(OH)]$ , сибирскита  $CaHBO_3$  и кальцита (см. рис. 2, б; рис. 3, б). Иногда сахаит полностью замещается таким полиминеральным агрегатом (рис. 2, с). Ветвящиеся микропрожилки, гнезда и прожилки подобного

состава были обнаружены также по курчатовиту и недиагностированному борному минералу (см. рис. 2, д, е). В целом можно отметить, что курчатовит более устойчив к гидротермальным преобразованиям.

Кроме отмеченных ссайбелиита и сибирскита к более поздним боратам, образованным с замещением курчатовита и сахаита и содержащим воду в гидроксильной или молекулярной форме, относятся суссексит и пентагидроборит. Прожилки пентагидроборита  $Ca[B_2O(OH)_6] \cdot 2H_2O$  приурочены к участкам замещения сахаита ссайбелиит-сибирскит-



кальцитовым агрегатом и рассекают сахаит, а также залечивают трещинки в титаните (рис. 2, *b, f*). Суссексит  $Mn_2[(OH)B_2O_4(OH)]$  обнаружен в виде волокнистого агрегата в ассоциации с курчатовитом (3, *c*). Суссексит является марганцевым аналогом ссайбелиита и конечным членом изоморфного ряда ссайбелиит – суссексит, его образование связано с повышенным количеством марганца на месторождении.

Людвигит встречается в виде редких скопленных игольчатых кристаллов в курчатовите.

Титанит и форстерит являются реликтовыми минералами магнезиальных скарнов. В исследуемых образцах титанит имеется в большом количестве и наблюдается как в виде зерен деформированной, но приближенной к конвертообразной форме (см. рис. 2, *b*), так и в виде зерен неправильной формы различной величины. Оливин форстерит-тефритового ряда встречается в ассоциации с сахаитом, курчатовитом и интенсивно замещается серпентином (см. рис. 3, *a, d*). Для него свойственно повышенное содержание марганца ( $MnO$  – 13,54 масс. %).

В форстерите встречен апатит, по которому развивается минерал, близкий по составу к турнориту (рис. 3, *e*). По химическому составу в нем отмечаются наличие  $Al_2O_3$  (от 2,66 до 3,04 масс. %),  $SiO_2$  (от 1,48 до 2,5 масс. %) и повышенное содержание  $P_2O_5$  (от 15,15 до 16,5 масс. %). Зерно турнорита, обладающего максимально приближенным к теоретическому химическим составом, отмечено в ассоциации с курчатовитом и серпентином (рис. 3, *f*). Турнорит образует сростание со сфалеритом, федоровскитом  $Ca_2(Mg, Mn^{2+})_2[B_4O_7](OH)_6$  и рассекается прожилками роуита  $Ca_2Mn^{2+}_2[B_4O_7](OH)_6$ .

Из рудных минералов как в сахаите, так и в курчатовите и в ассоциирующихся с ними минералах установлена вкрапленность сфалерита, магнетита и якобсита ( $MnFe_2O_4$ ) (см. рис. 3, *a, f*). Магнетит является наиболее распространенным акцессорным минералом всех пород и руд на Солонго, а примесь мар-

ганца в том или ином объеме характерна для магнетитовых руд месторождения [9]. По данным наших исследований, только в борных рудах содержания  $MnO$  в объеме более 17 масс. % позволяют определить акцессорный рудный минерал как якобит.

По мнению С. М. Александрова, образование боратов серии сахаита-харкерита генетически связано с гипабиссальными и приповерхностными месторождениями и происходит в условиях метасоматизма доломитов в контактах интрузий широкого петрохимического спектра составов, а также в зонах декомпрессии [13]. Курчатовит и сахаит развиваются на этапе ранней щелочной стадии постмагматического этапа эволюции магнезиально-скарнового месторождения, причем в отношении Солонго исследователь придерживается мнения об образовании сахаита путем замещения более ранних боратов, в том числе курчатовита [11]. По мнению зарубежных коллег [15, 16], образование скарнов с курчатовитом предполагает условия высокого давления, а скарны с сахаитом образуются при низком давлении и высоких температурах.

На основании петрологических наблюдений, а также данных, представленных в тематических отчетах<sup>6,7</sup> и в работах С. М. Александрова [11, 17, 18], эволюцию минеральных форм нахождения бора в процессе формирования гипабиссального магнезиально-скарнового месторождения Солонго можно охарактеризовать последовательностью нескольких этапов.

1. На магматическом этапе бор находится в кристаллизующемся кислом расплаве. Вероятнее всего, повышенные содержания бора в гранитах Солонго определяются контаминацией расплава веществом осадочных пород, богатых бором.

2. На постмагматическом этапе на ранней щелочной стадии образуются бораты – суанит  $Mg_2B_2O_5$  и котоит  $Mg_3(BO_3)_2$ . Их состав определяется составом замещаемых ими карбонатных пород и метасоматитов. Степень перегрева внедряющейся гранитной интрузии

<sup>6</sup> Виноградов Б. К., Дорошкевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

<sup>7</sup> Малинко С. В. Вещественный состав и условия образования боратовой минерализации, генетически связанной с известковыми скарнами. М.: Изд-во ВИМС, 1970. 259 с.



определяет масштабы ассимиляции приконтактовых скарнов и минеральный состав зон, слагающих метасоматические ореолы по доломитам. С изменением доломитов образуются скарны, кальцифиры и котоитовые мраморы. Далее при поступлении в котоитовые мраморы постмагматических железосодержащих растворов вследствие неравновесности ассоциации котоит – магнетит в мраморах появляется людвигит.

3. На следующем этапе ранней щелочной стадии происходит снижение химической активности бора, показателя кислотности и температуры гидротермальных растворов. Магнезиальные скарны претерпевают известково-скарновое замещение. Курчатовит образуется позже котоита, суанита, людвигита и гумитов в форстеритовых кальцифирах по доломитам. Впоследствии сахаитовые породы могут замещать курчатовитовые руды, наследуя заключенный в них бор, а также якобит, марганецсодержащий людвигит.

В то же время сахаит может развиваться самостоятельно по котоитовым мраморам с людвигитом с образованием избыточного магния и бора. Сахаитовые породы полностью наследуют бор котоита, сохраняя текстурные особенности исходных мраморов и вкрапленность магнезиальных минералов, включая магнезиолюдвигит.

Образование сахаита завершает ранний, высокотемпературный этап формирования боратного оруденения. Все последующие минералы бора имеют гистерогенный характер вследствие перераспределения бора при замещении его более ранних минералов. Здесь хотелось бы отметить, что экспериментальные данные И. Я. Некрасова и С. В. Малинко показали, что образование сахаита происходит при температуре более 300 °С [19]. По мнению С. М. Александрова, вариация температур от ранних эндогенных боратов до минералов бора, сингенетичных известково-скарновым и грейзеновым ассоциациям магнезиально-скарновых месторождений, варьирует от 600 до 300 °С [17]. При этом данный ученый отмечает возможность «пульсации теплового потока», что может проявляться в виде повто-

рения и соналожения минеральных ассоциаций. В целом ретроградное изменение температуры является одним из факторов эволюционной смены минеральных форм.

4. Следующим этапом эволюции является «среднетемпературный» этап, для которого характерны грейзенизация и формирование «наложенного» оруденения в виде отложения сульфидов. С переходом от ранней щелочной к кислотной стадии эндогенного процесса связано появление малых количеств фосфатов (апатита), арсенатов (свабита) и сульфатов (ангидрита).

5. Следующий этап – минералообразование поздней щелочной стадии. Этот этап завершает эндогенное формирование магнезиально-скарновых месторождений. Эндогенные изменения сахаита выражаются в появлении псевдоморфоз кальцит-сибирскит-ссайбелиит состава. Часть новообразуемых минералов отлагается по формирующимся трещинам. На заключительных фазах эндогенного процесса и курчатовит, и сахаит замещаются ссайбеллитом, сибирскитом, кальцитом и другими вторичными боратами (фроловитом, пентагидроборитом и др.).

6. На заключительных фазах гидротермального процесса гистерогенные бораты (ссайбелиит, сибирскит и др.), в свою очередь, замещаются силикатами и карбонатами, частично или полностью утрачивая бор.

В целом предложенная последовательность этапов эволюции минералов бора на Солонго может быть подтверждена с применением как материалов данного исследования, так и некоторых данных предшественников. Исследователи Борной партии на основании расшифровки тектонического строения месторождения Солонго и движений отдельных его блоков оценили глубину формирования руд месторождения в 3–3,6 км<sup>8</sup>. Поскольку борная минерализация на месторождении развивается по участкам замещения магнезиальных скарнов и форстерит-диопсидовых кальцифиров известковыми скарнами, в борных рудах были обнаружены минералы, являющиеся реликтами магнезиальных скарнов, такие как форстерит и титанит. Парагенезис

<sup>8</sup> Виноградов Б. К., Дорошкевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.

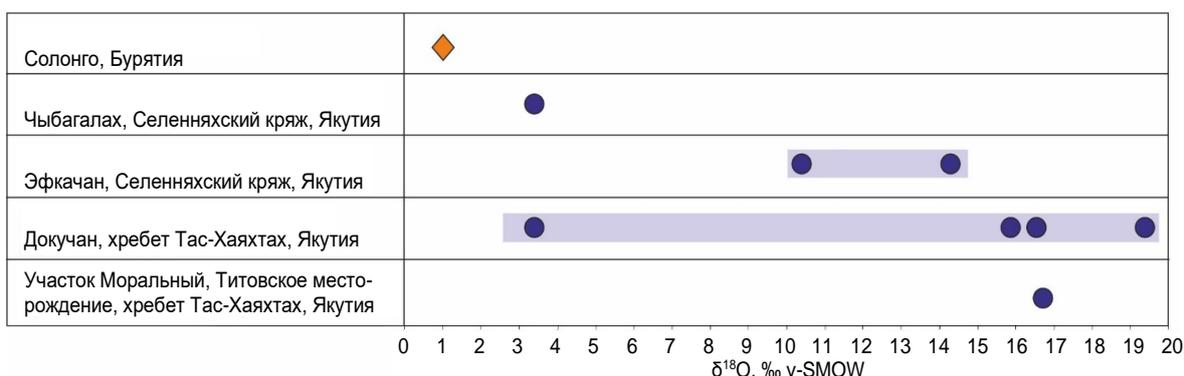


сахайта с форстеритом проявлен также в рудах Чыбагалахского месторождения, в дополнение к ним обнаруживаются диопсид и людвигит [20]. С. В. Малинко в сростании с сахайтом отмечала гранаты, пироксены, магнетит, свабит, указывая на их более раннее выделение относительно сахайта. Первичные борные минералы – суанит и котоит – нами обнаружены не были. Тем не менее С. В. Малинко в своем исследовании по Солонго отмечает наличие суанита и котоита в образцах: суанит был отмечен ей в курчатовите в виде мелких идиоморфных кристаллов, отделенных реакционной каймой кальцита, а котоит спорадически присутствовал в сахайтовых рудах, обнаруживая признаки более раннего выделения [10], что соответствует представлениям о замещении сахайтом котоитовых мраморов. Сахайт и курчатовит, являющиеся непосредственными рудообразующими минералами исследуемых пород, формируются на этапе известково-скарнового замещения магнезиальных скарнов. Следующей стадией является переход от ранней щелочной стадии к кислотной, что, по мнению С. М. Александрова, фиксируется выделением арсенатов, апатита, ангидрита. Нами были обнаружены апатит, турнорит, ангидрит (см. рис. 3, е, ф). С. В. Малинко отмечала выделения свабита, турнорита и джонбаумита в борных рудах Солонго<sup>9</sup> [10, 21]. Дальнейшее замещение сахайта и в меньшей степени курчатовита на гидротермальном этапе характеризуется развитием гистерогенных ссайбелиита и суссек-

сита, развитием ссайбелиит-сибирскит-кальцитового агрегата. Указанные минералы и полиминеральные агрегаты интенсивно развиты в изученных образцах. Фроловит, вимсит, уралборит, гексагидроборит, отмечаемые С. В. Малинко [10], как и пентагидроборит, который мы наблюдали в своих образцах, свидетельствуют о развитии гидротермального процесса на месторождении. Также тот факт, что рудные залежи на Солонго были подвержены гидротермальной переработке, отмечен Н. В. Чуконовым с соавторами [5]. Таким образом, борные руды на Солонго в определенной степени претерпели изменение и замещение вследствие гидротермальных процессов.

Изотопный состав кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  был исследован в минералах из образцов сахайт-курчатовитовых руд Солонго. Получены следующие результаты: в сахайте – +1 ‰, в роуите – +2,7 ‰, в курчатовите – +1,9 ‰, в магнетите (якобсите) – -0,3 ‰  $\delta^{18}\text{O}$  v-SMOW.

Сравнение данных показало, что сахайт борных руд Солонго имеет более облегченный состав кислорода по сравнению с имеющимися в литературе показателями для сахайта из месторождений и рудопроявлений Якутии (рис. 4). Наиболее близкими показателями изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$ , равными 3,4 ‰, обладают образцы сахайта из месторождений Чыбыгалах и Докучан. Для остальных борных минералов литературных данных по изотопии кислорода обнаружено не было.



**Рис. 4. Систематика изотопного состава кислорода в сахайте месторождения Солонго**  
Литературные данные по месторождениям Якутии приведены по источнику [17]  
**Fig. 4. Systematics of the oxygen isotopic composition in sakhaite from the Solongo deposit**  
Literature data on the Yakutian deposits are given according to the source [17]

<sup>9</sup> Малинко С. В. Вещественный состав и условия образования боратовой минерализации, генетически связанной с известковыми скарнами. М.: Изд-во ВИМС, 1970. 259 с.



Согласно данным Борной партии<sup>10</sup>, формирование магнезиально-скарнового месторождения Солонго связывается с внедрением лейкократовой гранитной интрузии. Если принять это положение, то достаточно низкие значения изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в сахайте Солонго можно объяснить функционированием гидротермальной системы с участием метеорных вод в ореоле остывающей интрузии.

В соответствии с типологией, предложенной в работе [22], ореолы флюидов, взаимодействующих с интрузией, делят на «закрытые» ореолы, флюиды в которых происходят из интрузий, и «открытые» ореолы, которые на протяжении какой-либо части своего функционирования взаимодействовали с флюидами внешнего происхождения. Глубина, до которой могут проникать метеорные воды, оценивается в 6 км, а по некоторым данным даже до 12 км [23]. Учитывая тот факт, что месторождение Солонго образовалось в гипабиссальных условиях, вероятность существования открытой гидротермальной системы очень высока.

По мнению С. М. Александрова [17], изотопный состав кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в карбонатах серии сахайта – харкерита формируется последовательно в процессе образования минералов начиная с замещения доломитов и может быть охарактеризован следующим образом. Первоначальный изотопный состав кислорода осадочных карбонатных пород соответствует величинам  $\delta^{18}\text{O}$  от 30 до 20–22 ‰. На магматической стадии и ранних стадиях постмагматического процесса изотопный состав карбонат-иона под влиянием флюидов глубинного происхождения последовательно изменяется к мраморизованным карбонатам, метаморфогенным карбонатам мраморов и далее в карбонатах кальцифиров и в карбонатах пироксеновых скарнов, достигая по величинам  $\delta^{18}\text{O}$  до 16 ‰. В момент образования сахайта на раннем постмагматическом этапе изотопный состав кислорода в нем также варьирует в пределах 15–17 ‰  $\delta^{18}\text{O}$  v-SMOW. В дальнейшем при вовлечении в процесс минералообразования метеорных вод и

кислорода атмосферы величина изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов серии сахайта – харкерита и всех видов выделенных по ним псевдоморфоз (агрегатов сибиридита, ссайбелиита, кальцита, ольшанскита и др.) уменьшается до 7,5 ‰, а в условиях воздействия талых вод многолетней мерзлоты и снежников, наиболее обогащенных легкими изотопами кислорода, – до 3,5 ‰  $\delta^{18}\text{O}$  v-SMOW [17].

Не исключено, что под влиянием гидротермальной переработки борных руд показатели изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в борных минералах могут опускаться и до более низких значений. При рассмотрении сахайтсодержащих борных руд месторождения Солонго мы не фиксируем значений изотопного состава кислорода по минералам выше значений +2,7 ‰  $\delta^{18}\text{O}$  v-SMOW, что также может указывать на существенную роль в их формировании флюидов метеорного происхождения. При этом гидротермальная система могла действовать не только на поздних постмагматических этапах формирования месторождения, что может быть обусловлено изменением теплового потока в зоне рудообразования, например в связи с внедрением мезозойских граносиенитовых и долеритовых даек, но и непосредственно на магматическом и раннем постмагматическом этапе. Это могло вызвать снижение показателей изотопного состава кислорода уже в неизменном сахайте.

Кроме того, еще одним фактором, который мог повлиять на существенное снижение показателей изотопного состава кислорода в сахайте уже на стадии его образования, является тенденция обогащения доломитов Озернинского рудного узла легким изотопом кислорода, отмеченная в работе [24]. Данное обстоятельство объясняется авторами названной работы колебаниями физико-химических условий бассейна седиментации и вариацией окислительно-восстановительного потенциала.

Полученные данные свидетельствуют об участии метеорных вод в формировании месторождения Солонго, а также подтверждают сложность и многоэтапность развития магне-

<sup>10</sup> Виноградов Б. К., Дорошкевич Л. С., Ковальская В. Н., Никитина М. А., Михайлов В. М. Месторождение Солонго. Отчет Борной партии о результатах поисковых и разведочных работ за 1970–1975 гг. Улан-Удэ, 1975. 311 с.



зиально-скарновых месторождений эндогенных боратов.

### Заключение

Комплексное железо-борное магнезиально-скарновое месторождение Солонго, расположенное в Озернинском рудном узле (Республика Бурятия), включает в себе залежи редких борных сахаит-курчатовитовых руд, которые в перспективе могут рассматриваться в качестве источника сырья для минеральных удобрений. Борные рудные тела, включающие данные минералы, расположены по внешним частям магнезиальных скарнов и в зоне кальцифиров. Образование сахаита на Солонго связывается с замещением более ранних котоитовых мраморов и курчатовита на раннем постмагматическом этапе формирования скарнового месторождения сингенетично с процессом известково-скарнового замещения магнезиальных скарнов.

Сахаит и курчатовит в рудах замещаются полиминеральным ссайбелиит-сибирскит-кальцитовым агрегатом и отмечены в ассоциации с федоровскитом, роуитом, суссекситом, пентагидроборитом. Также борные минералы в сахаит-курчатовитовых рудах ассоциируют с форстеритом, серпентином, титанитом, сфалеритом, якобитом. Про этом образование

якобсита, суссексита, роуита определяется повышенным содержанием марганца на месторождении. Также в рудах в небольших объемах найден редкий арсенат кальция турнорит.

При сравнении изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в сахаите из месторождения Солонго была выявлена его обогащенность легким изотопом кислорода по сравнению с сахаитом из месторождений и рудопроявлений Якутии. На формирование пониженных показателей изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  сахаита на Солонго могло повлиять несколько факторов. Возможно изначальное образование сахаита с пониженными показателями изотопного состава кислорода в связи с общей обогащенностью легким изотопом кислорода доломитов Озернинского рудного узла и деятельностью гидротермальной системы с участием метеорных вод в окружении остывающей лейкократовой гранитной интрузии, с которой связывается формирование месторождения на этапе. Также понижение показателей изотопного состава кислорода в сахаите Солонго возможно благодаря гидротермальной переработке борных руд с участием метеорных вод, в том числе талых вод многолетней мерзлоты и снежников, на позднем постмагматическом этапе развития месторождения.

### Список источников

1. Малинко С. В., Лисицын А. Е., Дорофеева К. А., Островская И. В., Шашкин Д. П. Курчатовит – новый минерал // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1966. Ч. 95. Вып. 2. С. 203–209.
2. Малинко С. В. Новый минерал бора – солонгоит // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1974. Ч. 103. Вып. 1. С. 117–121.
3. Малинко С. В., Шашкин Д. П., Юркина К. В. Федоровскит – новый минерал бора и изоморфный ряд роуит – федоровскит // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1976. Ч. 105. Вып. 1. С. 71–85.
4. Симонов М. А., Малинко С. В., Белов Н. В., Казанская Е. В., Егоров-Тисменко Ю. К., Федоренко М. Б. [и др.]. Новый минерал гексагидроборит  $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1977. Ч. 106. Вып. 6. С. 688–691.
5. Чуканов Н. В., Пеков И. В., Малинко С. В., Задов А. Е., Дубинчук В. Т. Витимит  $\text{Ca}_6\text{V}_{14}\text{O}_{19}[\text{SO}_4](\text{OH})_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – новый минерал и условия его образования на месторождении Солонго (Бурятия) // Записки Всероссийского минералогического общества. 2002. Ч. 131. Вып. 4. С. 41–47.
6. Малинко С. В., Чуканов Н. В., Дубинчук В. Т., Задов А. Е. Бурятит  $\text{Ca}_3(\text{Si}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})[\text{SO}_4][\text{B}(\text{OH})_4](\text{OH})_5 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  – новый минерал // Записки Всероссийского минералогического общества. 2001. Ч. 130. Вып. 2. С. 72–78.
7. Гордиенко И. В., Булгатов А. Н., Руженцев С. В., Минина О. Р., Климук В. С., Ветлужских Л. И. [и др.]. История развития Удино-Витимской островодужной системы Забайкальского сектора Палеоазиатского океана в позднем рифее-палеозое // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 589–614.
8. Избродина С. Ю., Хубанов В. Б. Роль гранитизации в формировании магнезиально-скарнового железо-борного месторождения Солонго (Озернинский рудный узел, Республика Бурятия) // Новое в познании процессов рудообразования: сб. тр. X Рос. молодежн. науч.-практ. школы с междунар. уч. (г. Москва, 29 ноября – 3 декабря 2021 г.). М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2021. С. 116–119.
9. Лисицын А. Е., Виноградов Б. К., Малинко С. В. Скарны месторождения Солонго в Бурятии и их рудоносность // Советская геология. 1974. № 3. С. 116–123.



10. Малинко С. В., Лисицын А. Е. Экзотические борные руды месторождения Солонго в Бурятии // Руды и металлы. 1997. № 5. С. 63–71.

11. Александров С. М. Генезис и состав рудообразующих магнезиальных боратов, их аналогов и модификаций // Геохимия. 2003. № 5. С. 492–512.

12. Pankova Yu. A., Krivovichev S. V., Pekov I. V., Grew E. S., Yapaskurt V. O. Kurchatovite and clinokurchatovite, ideally  $\text{CaMgB}_2\text{O}_5$ : an example of modular polymorphism // *Minerals*. 2018. Vol. 8. Iss. 8. P. 332. <https://doi.org/10.3390/min8080332>.

13. Александров С. М. Генезис и изоморфизм в боратах серии сахаита-харкерита на магнезиально-скарновых месторождениях северо-востока России // Геохимия. 2005. № 9. С. 966–989.

14. Sharp Z. D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. Vol. 54. Iss. 5. P. 1353–1357. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90160-M](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90160-M).

15. Marincea Ş., Dumitraş D.-G. Contrasting types of boron-bearing deposits in magnesian skarns from Romania // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 112. P. 102952. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102952>.

16. Evans R. J., Groat L. A., Cempirek J., Škoda R., Grew E. S., Bernard C. The crystal chemistry of the sakhite-harkerite solid solution // *American Mineralogist*. 2018. Vol. 103. Iss. 11.

P. 1749–1760. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6563>.

17. Александров С. М. Геохимия скарно- и рудобразования в доломитах. М.: Наука, 1990. 343 с.

18. Александров С. М. Эндогенные изменения коитоита в кальцифирах магнезиально-скарновых месторождений бора // Геохимия. 2007. № 7. С. 733–752.

19. Некрасов И. Я., Малинко С. В. Экспериментальное изучение условий образования сахаита // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 210. № 6. С. 1427–1430.

20. Александров С. М., Малинко С. В. Геохимические особенности эндогенных и экзогенных изменений карбонатоборатов // Геохимия. 1975. № 1. С. 3–16.

21. Малинко С. В., Чуканов Н. В. Арсенатные аналоги апатита – турнорит и джонбаумит из месторождения Солонго, Бурятия // Записки Всероссийского минералогического общества. 1998. № 3. С. 92–95.

22. Nabelek P. I. Stable isotope monitors // *Contact metamorphism* / ed. D. M. Kerrick. Berlin – Boston: De Gruyter, 1991. P. 395–435.

23. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin: Springer, 2009. 285 p.

24. Ковалев К. Р., Рипп Г. С., Дистанов Э. Г., Байлина М. В. Железисто-магнезиальные карбонаты и вариации изотопов углерода и кислорода на гидротермально-осадочном колчеданно-полиметаллическом месторождении Озерное (Забайкалье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 4. С. 383–397.

## References

1. Malinko S. V., Lisitsyn A. E., Dorofeeva K. A., Ostrovskaya I. V., Shashkin D. P. A new mineral kurchatovite. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1966;95(2):203-209. (In Russ.).

2. Malinko S. V. A new boron mineral – solongoite. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1974;103(1):117-121. (In Russ.).

3. Malinko S. V., Shashkin D. P., Yurkina K. V. Fedorovskite as a new mineral of boron and as an isomorphic series of roweite. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1976;105(1):71-85. (In Russ.).

4. Simonov M. A., Malinko S. V., Belov N. V., Kazanskaya E. V., Egorov-Tismenko Yu. K., Fe-dorenko M. B., et al. New mineral hexahydroborite  $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1977;106(6):688-691. (In Russ.).

5. Chukanov N. V., Pekov I. V., Malinko S. V., Zadov A. E., Dubinchuk V. T. A new mineral vitimite  $\text{Ca}_6\text{B}_{14}\text{O}_{19}[\text{SO}_4](\text{OH})_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  and its formation conditions at the Solongo deposit (Buryatia). *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2002;131(4):41-47. (In Russ.).

6. Malinko S. V., Chukanov N. V., Dubinchuk V. T., Zadov A. E. A new mineral buryatite  $\text{Ca}_3(\text{Si}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})[\text{SO}_4][\text{B}(\text{OH})_4](\text{OH})_5 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2001;130(2):72-78. (In Russ.).

7. Gordienko I. V., Bulgatov A. N., Ruzhentsev S. V., Minina O. R., Klimuk V. S., Vetluzhskikh L. I., et al. The late riphean-paleozoic history of the Uda-Vitim Island Arc System in the Transbaikalian sector of the Paleasian Ocean.

*Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):589-614. (In Russ.).

8. Izbrodina S. Yu., Khubanov V. B. The role of granitization in the formation of the Solongo magnesian-skarn iron-boron deposit (Ozerninsky ore cluster, Republic of Buryatia). In: *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: sb. tr. X Ros. molodezhn. nauch.-prakt. shkoly s mezhdunar. uch. = New in ore formation processes perception: Collected works of the 10<sup>th</sup> Russian youth scientific and practical school with international participation*. 29 November – 3 December 2021, Moscow. Moscow: Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences; 2021, p. 116–119. (In Russ.).

9. Lisitsyn A. E., Vinogradov B. K., Malinko S. V. Skarns of the Solongo deposit in Buryatia and their ore content. *Sovetskaya geologiya*. 1974;3:116-123. (In Russ.).

10. Malinko S. V., Lisitsyn A. E. Exotic boron ores from the Solongo deposit in Buryatia. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 1997;5:63-71. (In Russ.).

11. Aleksandrov S. M. Genesis and composition of ore-forming magnesian borates, their analogues, and modifications. *Geokhimiya*. 2003;5:492-512. (In Russ.).

12. Pankova Yu. A., Krivovichev S. V., Pekov I. V., Grew E. S., Yapaskurt V. O. Kurchatovite and clinokurchatovite, ideally  $\text{CaMgB}_2\text{O}_5$ : an example of modular polymorphism. *Minerals*. 2018;8(8):332. <https://doi.org/10.3390/min8080332>.

13. Aleksandrov S. M. Borates of the sakhite-harkerite series at magnesian skarn deposits in the north-east of Russia: genesis and isomorphism. *Geokhimiya*.



2005;9:966-989. (In Russ.).

14. Sharp Z. D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990;54(5):1353-1357. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90160-M](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90160-M).

15. Marincea S., Dumitraş D.-G. Contrasting types of boron-bearing deposits in magnesian skarns from Romania. *Ore Geology Reviews*. 2019;112:102952. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102952>.

16. Evans R. J., Groat L. A., Cempirek J., Škoda R., Grew E. S., Bernard C. The crystal chemistry of the sakhite-harkerite solid solution. *American Mineralogist*. 2018;103(11):1749-1760. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6563>.

17. Aleksandrov S. M. *Geochemistry of skarn and ore formation in dolomites*. Moscow: Nauka; 1990. 343 p. (In Russ.).

18. Aleksandrov S. M. Endogenous transformations of kotoite in calciphyres at magnesian-skarn deposits of boron. *Geokhimiya*. 2007;7:733-752. (In Russ.).

19. Nekrasov I. Ya., Malinko S. V. Experimental study of sakhite formation conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1973;210(6):1427-1430. (In Russ.).

20. Aleksandrov S. M., Malinko S. V. Geochemical features of endogenous and exogenous changes in borate carbonates. *Geokhimiya*. 1975;1:3-16. (In Russ.).

21. Malinko S. V., Chukanov N. V. Arsenate analogs of apatite –turneaureite and johnbaumite from the Solongo deposit, Buryatia. *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva = Proceedings of the All-Russian Mineralogical Society*. 1998;3:92-95. (In Russ.).

22. Nabelek P. I. Stable isotope monitors. In: Kerrick D. M. (ed.). *Contact metamorphism*. Berlin – Boston: De Gruyter; 1991, p. 395–435.

23. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin: Springer; 2009. 285 p.

24. Kovalev K. R., Ripp G. S., Distanov E. G., Baulina M. V. FE-Mg carbonates and variations in isotopic compositions of carbon and oxygen at the Ozernoe hydrothermal-sedimentary pyrite-polymetallic deposit (Transbaikalia). *Geologiya i geofizika*. 2005;46(4):383-397. (In Russ.).

### Информация об авторах / Information about the authors



**Избродина Светлана Юрьевна,**

инженер Лаборатории металлогении и рудообразования,  
Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН,  
г. Улан-Удэ, Россия,  
izbrodina@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-3797-4939>.

**Svetlana Yu. Izbrodina,**

Engineer of the Laboratory of Metallogeny and Ore Formation,  
Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ulan-Ude, Russia,  
izbrodina@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-3797-4939>.



**Посохов Виктор Федорович,**

старший научный сотрудник Лаборатории инструментальных методов анализа,  
Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН,  
г. Улан-Удэ, Россия,  
vitaf1@yandex.ru.

**Viktor F. Posokhov,**

Senior Researcher of the Laboratory of Instrumental Methods of Analysis,  
Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ulan-Ude, Russia,  
vitaf1@yandex.ru.

### Вклад авторов / Contribution of the authors

Избродина С. Ю. выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати; Посохов В. Ф. выполнил исследование изотопного состава кислорода в минералах и интерпретацию полученных данных.

Izbrodina S. Yu. carried out the research, summarized the results obtained, prepared the manuscript for publication. Posokhov V. F. conducted the study of the isotopic composition of oxygen in minerals and interpreted the data obtained.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.



*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 25.02.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принята к публикации 11.05.2022.

The article was submitted 25.02.2022; approved after reviewing 07.04.2022; accepted for publication 11.05.2022.