2019 ZAPISKI RMO (PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY) Pt CXLVIII, N 1

DOI: 10.30695/zrmo/2019.1481.00

© И. С. КИРИЧЕНКО,* Е. В. ЛАЗАРЕВА,* С. М. ЖМОДИК,* почетный член Н. Л. ДОБРЕЦОВ,** Д. К. БЕЛЯНИН,* Л. В. МИРОШНИЧЕНКО*

СОВРЕМЕННОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ТЕРМАЛЬНОМ ОЗЕРЕ ФУМАРОЛЬНОЕ (КАЛЬДЕРА УЗОН, КАМЧАТКА) — КЛЮЧ К ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИИ

 Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Акад. Коптюга, 3; e-mail: iskirichenko@igm.nsc.ru
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука, Новосибирск, 630090, пр. Акад. Коптюга, 3

На основании минерального состава колонки донных отложений IV озерка оз. Фумарольное проведена палеореконструкция условий формирования осадков. Нижние горизонты отложений сложены преимущественно смектитом в ассоциации с гипсом и ярозитом и перекрыты смектит-каолинитовыми отложениями с большим количеством фрамбоидального пирита и створок диатомовых водорослей. Присутствует слой натечных опал-пиритовых образований и кальцита. Сделан вывод о том, что изначально озерко IV представляло собой грязевой котел с сульфидсодержащими растворами. Затем при снижении уровня воды и выведении донных отложений на поверхность произошло их окисление. Последовавший фреатический взрыв привел к перекрытию окисленных отложений восстановленным веществом нижних горизонтов котла. Далее обстановка осадконакопления сначала соответствовала источнику с развивающимся вокруг грифона циано-бактериальным сообществом, затем сменилась обстановкой мелководного озерка, аналогичной современной. В осадке наблюдаются два слоя пирокластического материала от извержений недалеко расположенных вулканов.

Ключевые слова: донные осадки, термальный водоем, кальдера Узон, Камчатка.

I. S. KIRICHENKO,* E. V. LAZAREVA,* S. M. ZHMODIK,* N. L. DOBREZOV,** D. K. BELYANIN,* L. V. MIROSHNICHENKO.* MODERN MINERAL FORMATION IN THE THERMAL LAKE FUMAROLNOE (USON CALDERA, KAMCHATKA) IS THE KEY TO PALEORECONSTRUCTION

* Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia, ** Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia

Paleoreconstruction of events involved in the bottom sedimentation has been carried out on the base of mineral composition of a section of bottom sediments in the Lake IV (the Lake Fumarolnoe). The lower levels are composed there mainly of smectite in association with gypsum and jarosite; they are overlapped by smectite-kaolinite depositions with the large amount of diatom algae shells and the fraboidal pyrite. There is also a layer of sinter opal-pyrite structures and calcite. It is assumed that initially the lake IV was a mud pit with sulfide-bearing solutions, then, after the lowering of water level and the partial exposure of bottom sediments of the surface, the substance has been oxidized. The subsequent phreatic explosion has provided the covering of oxidized substance by the matter of lower layers of the pit. The further situation corresponded to the source, with the cyano-

bacterial community developing around the griffin, and it was replaced by the site of a shallow-water lake similar to the contemporary one. The studied sedimentary formation includes two layers of pyroclastic material originated from neighbouring eruptions.

Key words: bottom sediments, the thermal lake, Uzon caldera, Kamchatka.

Донные отложения водоемов содержат большое количество информации об истории самого водоема и окрестных территорий. Широко используются осадки для реконструкции глобальных и локальных климатических циклов. Осадки термальных озер вулканических областей содержат также летопись ближайших извержений, изменения глубины водоема, физико-химических характеристик растворов и условий формирования и т. д. Кальдера вулкана Узон является одной из пяти крупных кальдерных структур Восточно-Камчатского пояса и представляет западную (преобладающую) часть Узон-Гейзерной депрессии, дно которой заполнено озерными отложениями мощностью более 50 м (Вулканизм.., 1974; Карпов и др., 1976; Migdisov, Bychkov, 1998; Бычков, 2009; Добрецов и др., 2015, и др.). В кальдере современная гидротермальная деятельность проявлена выходами на поверхность вод, нагретых от 30 до 100 °С. Насчитывается пять крупных термальных полей, лишенных растительности — Южное, Западное, Северное, Оранжевое и Восточное, а также большое количество мелких термальных выходов и площадок (рис. 1).

Главные термальные аномалии (Восточное термальное поле и оз. Фумарольное), насыщенные крупными фреатическими воронками, располагаются в субширотной зоне, которая маркирует на поверхности крупный глубинный разлом. В пределах Восточного термального поля располагается главное рудное тело, сложенное реальгаром, аурипигментом, антимонитом, пиритом, киноварью и метациннабаритом (Вулканизм.., 1974; Карпов, 1988; Бычков,



Рис. 1. Схема расположения термальных полей кальдеры Узон: С — Северное; З — Западное; Ю — Южное; О — Оранжевое; Б — термопроявление у горы Белой; В — Восточное.

Fig. 1. Scheme of location of thermal fields in the Uzon caldera: C — Severnoe (Northern); 3 — Zapadnoe (Western); IO — Yuzhnoe (Southern); O — Oranzhevoe (Orange); Б — thermal occurrence near the Belaya mountain; B — Vostochnoe (Eastern).



Рис. 2. Схематический план оз. Фумарольное, береговых термальных площадок (Вулканизм.., 1974) и место отбора колонки донного осадка.

1 — термальные источники (а — водяные воронки с видимым стоком, б — выходы из трещины или высачивание); 2 — водяной бессточный котел; 3 — грязевой котел; 4 — парящие площадки; 5 — мелкие кипящие грифоны (а — мелкие водяные котлы, б — грязевые котлы); 6 — контур водной поверхности озера; 7 — контур термальных площадок; 8 — место отбора колонки донных отложений.

Fig. 2. Schematic plan of the Lake Fumarolnoe, coastal thermal sites (Volcanism., 1974) and the place of the bottom sediment core sampling.

2009). Озеро Фумарольное (N 54°30'7.40", Е 159°59'16.85"), самое большое термальное озеро кальдеры Узон (рис. 1, 2), образовалось на месте нескольких крупных фреатических воронок диаметром до 150 м и глубиной до 25 м, разделенных узкими перемычками, в настоящее время скрытыми под водой и образующими систему небольших слабо изолированных озер (I, II, IV) (рис. 2). На дне и в стенках воронок происходит разгрузка перегретых Na-Cl вод. Температура поверхностного слоя воды колеблется от 23 до 36 °C, а вблизи термальных выходов повышается до 71 °C. В пляжной полосе располагается несколько аномально прогретых площадок (рис. 2). Большая группа источников сосредоточена на площадке Грязевой (IV озерко). В донных отложениях оз. Фумарольное установлены горизонты с высокими содержаниями As (Yeroshchev-Shak et al., 1985). К сожалению, это чуть ли не единственная работа, посвященная изучению минерального состава донных отложений этого уникального водоема. Данное исследование направлено на выявление особенностей минералов, слагающих осадок оз. Фумарольное для последующей реконструкции истории развития водоема.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Колонка осадка (39 см) отобрана недалеко от берега (N 54°30'7.40", Е 159°59'16.85") вблизи небольшой воронки (рис. 2) с помощью цилиндрического пробоотборника из нержавеющей стали с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун» (диаметр 82 мм, длина 40 см). Верхние жидкие, насыщенные водой, слабо консолидированные слои осадка (0—10 см) опробованы дополнительно с применением алюминиевого цилиндра (рис. 3). Вещество колонки на месте упаковывалось в герметичную пленку, доставлялось в лабораторию. Затем колонка разрезалась по длине, и образцы вещества отбирались в небольшие контейнеры с сохранением структуры осадка для изготовления аншлифов. Часть вещества сушилась и изучалась без полировки. Главные минералы, слагающие осадок, были диагностированы с помощью рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-4, Си-анод) в ИГМ СО РАН. Состав и микроморфология минералов исследованы на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа Aztec Energy/INCA Energy 450+ XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd), позволяющими изучать наноразмерные частицы (Аналитический центр ИГМ СО РАН).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Осадочные слои различаются по цвету, плотности, гранулометрическому и минеральному составу (рис. 3). Верхняя часть (до 20 см) колонки представлена илистым материалом, имеющим красноватый оттенок, местами оранжевый. Осадок неоднородно окрашен в темный, почти черный цвет и имеет пятнистый облик. В интервалах 10—11 и 23.5—26.5 см наблюдаются резко отличающиеся по консистенции и цвету слои, содержащие более крупный об-



Рис. 3. Фотография и схема колонки донного осадка IV озерка оз. Фумарольное с указанием горизонтов отложения минералов.

Fig. 3. Photograph and scheme of the bottom sediment column in the IV lakelet in the Lake Fumarolnoe, with indicated horizons of deposition of minerals.



Рис. 4. Минеральный состав различных слоев донного осадка оз. Фумарольное по данным рентгенофазового анализа.

Fig. 4. Mineral composition of different layers in bottom sediments of the Lake Fumarolnoe.

ломочный материал (рис. 3, С-2, 5). В интервале 26.5—35 см цвет вещества меняется от серого до почти черного, плотность увеличивается, снижается пластичность и вязкость. Ниже отметки 35 см осадок имеет светло-желтый цвет и менее влажный.

По минеральному составу выделено 7 слоев осадка. Верхние 9 см (рис. 3, C-1) сложены преимущественно смектитом, каолинитом (с преобладанием



Continuation of Fig. 4.

последнего, рис. 4), створками диатомовых водорослей и пиритом. В осадке встречаются обломки вулканических пород и отдельные минеральные зерна, диагностированные как плагиоклаз и кварц. Наличие на рентгенограмме пика 9.9° говорит о присутствии в осадке некоторого количества цеолитов (гейландита и/или клиноптилолита), пика 17.97° — минерала группы ярозита—минамиита. Пирит в виде фрамбоидов и россыпи мелких кристаллов (рис. 5, *a*) распределен в слое неравномерно. Интервал 1—2 см обогащен



Рис. 5. Типичные минералы слоя С-1 осадка оз. Фумарольное.

а — фрамбоиды пирита (Руг) и створки диатомовых водорослей (Di) в каолинит-смектитовой массе; б — сульфиды As (As-S).

Fig. 5. Typical minerals in the layer C-1 of Lake Fumarolnoe sediments: pyrite framboids (Pyr) and valves of diatoms (Di) in kaolinite-smektite mass (a); As sulfides (As-S) (δ).



Рис. 6. Минералы донных отложений оз. Фумарольное, слой С-3.1.

а — натечный пирит (Руг) с повышенным содержанием As и Sb; б — кальцит (Cat); в — опал (Op), обогащенный по зонам натечным пиритом, эта структура ограничена слоем фрамбоидального пирита в нижней и верхней частях и слоем диатомовых створок (Di).

Fig. 6. Minerals in bottom sediments of the Lake Fumarolnoe, layer C-3.1.

Химический состав (мас. %) реальгара, антимонита и пирита из осадка IV озерка оз. Фумарольное

Минерал	Образец	Si	Fe	Sb	As	S	0	Сумма
Реальгар	1-1	0.22	0.19	Н. о.	65.0	28.5	1.26	95.2
»»	1-2	0.28	0.24	То же	66.5	29.3	1.41	97.8
»	1-3	0.22	0.33	» »	64.2	28.2	1.24	94.2
Антимонит	2-1	1.59	Н. о.	66.1	2.37	26.9	6.27	103.4
»	2-2	0.25	0.6	70.6	1.47	27.6	1.37	101.9
»	2-3	0.65	0.86	60.8	3.64	25.8	3.6	95.4
Пирит I	3-1	0.33	42.8	1.02	1.78	49.7	Н. о.	95.6
То же	3-2	0.21	43.6	1.14	1.72	50.4	То же	97.2
Пирит II	4-1	0.39	44.4	Н. о.	Н. о.	51.7	3.42	100.0
То же	4-2	0.41	42.5	То же	1.05	49.8	3.79	97.6
» »	4-3	0.16	45.9	» »	Н. о.	53.8	Н. о.	99.8
» »	4-4	Н. о.	46.1	» »	То же	53.3	То же	99.4
» »	4-5	0.34	44.3	» »	0.62	48.8	3.34	97.5
Пирит III	5-1	0.5	45.3	» »	Н. о.	53.8	Н. о.	99.6
То же	5-2	0.35	44.3	» »	То же	53.4	То же	98.1
» »	5-3	Н. о.	45.8	» »	» »	53.2	» »	99.0
» »	5-4	0.23	46.2	» »	» »	52.7	» »	99.2

Chemical composition (wt %) of realgar, antimonite and pyrite of the sediment in the IV lakelet in the Lake Fumarolnoe

сульфидами мышьяка (реальгаром и/или аурипигментом), которые, как правило, наблюдаются в виде скопления нитчатых выделений.

Вещество слоя C-3 схоже с таковым слоя C-1, но смектит преобладает над каолинитом и значительно выше содержание цеолитов (рис. 4). Диагностирован ярозит (2 Θ 17.01°, рис. 4). По соотношению смектита и каолинита, а также содержаниям кварца и плагиоклаза слой C-3.1 близок к слою C-3. Но рентгенофазовый анализ показывает резкое увеличение содержания пирита (рис. 4). Кроме фрамбоидального пирита в слое наблюдается значительное содержание натечного пирита (рис. 6, *a*), содержащего примесь As (до 1.9 мас.%) и Sb (до 1.8 мас.%).

В верхней части слоя C-3.1 встречаются небольшие обособления кальцита (рис. 6, δ), это единственное место в колонке, где установлен карбонат. Ниже на большом интервале распространены сульфиды As (рис. 3), их выделения подобны тем, что наблюдаются в верхней части колонки (рис. 5, δ). Выделения сульфидов мышьяка очень тонкие и мелкие, что ограничило число достоверных анализов (таблица). Судя по соотношению мышьяка и серы, можно предположить, что среди этих сульфидов присутствует реальгар. Наличие других элементов в анализе объясняется малыми размерами частиц и захватом электронным пучком элементов из окружающих минералов. В нижней части слоя развит гипс (рис. 4). На границе слоев C-3.1 и C-4 обнаружено много «скорлупок», сложенных опалом и пиритом. Натечный пирит, с повышенным содержанием As и Sb (таблица, пирит I) образует механическую примесь в опале (рис. 6, ϵ), что придает последнему черный цвет. Нижняя и верхняя части «скорлупок» сложены створками диатомей. Между створками и опалом расположен слой фрамбоидов пирита (рис. 6, ϵ). Фрамбоидальный пирит в от-



Рис. 7. Минералы слоев С-6, С-7 и С-7.1 осадка оз. Фумарольное.

а — слой 6: игольчатые кристаллы и сферолиты антимонита (Ant) и фрамбоиды пирита (Руг); б — слой С-7: округлые фрагменты глинистого осадка с натечным и кристаллическим пиритом, калиевого полевого шпата, частично замещенного плагиоклаза; в — слой С-7.1: округлые выделения ярозита (Jar), кристаллы пирита (Руг) и гипса (Gy).



личие от натечного, как правило, не содержит примеси Sb и As, хотя встречаются отдельные фрамбоиды, в которых содержание As заметно выше (таблица, пирит II).

Лежащий ниже слой C-4 более всего по составу близок слою C-3, но содержит большее количество обломков и минералов вулканических пород.

Слой С-6 по составу (рис. 4) сходен со слоем С-3.1 (рис. 3) и характеризуется примерно одинаковым соотношением смектита и каолинита, бо́льшим количеством пирита и незначительным — цеолитов и обломочного материала (кварца, плагиоклаза). В отличие от слоя С-3.1, он содержит много антимонита. Рентгенофазовым анализом минерал не распознается, но легко устанавливается с помощью электронного микроскопа. Игольчатые выделения антимонита размером не более 20 мкм в длину, иногда образующие сферолиты, в большом количестве развиты в плотном глинистом осадке (рис. 7, *a*). Помимо обломков вулканических пород и минералов в осадке присутствует фрамбоидальный пирит и створки диатомовых водорослей (рис. 7, *a*). Слой С-6.1 очень схож по составу со слоем С-6, но не содержит антимонита.



Рис. 8. Слои 2 и 6 осадка оз. Фумарольное. Слои 2 и 6 обогащены: *а* — пирокластическим материалом, представленным обломками полевошпатовых пород (Fsp); *б* — кристаллами пироксена (Px), но также содержат глинистые минералы, фрамбоидальный пирит (Pyr) и створки диатомовых водорослей (Di).

Fig. 8. Layers 2 and 6 of Lake Fumarolnoe sediments. Layers 2 and 6 are enriched (*a*) in pyroclastic material (Fsp), (*ó*) pyroxene crystals (Px), but contain also clayey minerals, framboidal pyrite (Pyr) and valves of diatoms (Di).

Слои С-7 и С-7.1 хотя и отличаются по цвету, но значительно ближе друг к другу по составу, чем вышележащие (рис. 4). Основу обоих составляет смектит, доминирующий над всеми другими минералами (рис. 4). Слой С-7 состоит из отдельных округлых фрагментов плотного глинистого осадка с большим количеством пирита (рис. $7, \delta$), который встречается в виде натечных корок, отдельных шарообразных выделений, и кристаллов кубического и куб-октаэдрического габитуса размером до 20 мкм. Кристаллы пирита не содержат Sb и As (таблица, пирит III). В осадке также присутствуют обломки вулканических пород и минералов, главным образом калиевого полевого шпата и плагиоклаза. Лежащий ниже слой С-7.1 также сложен преимущественно смектитом, ярозитом и гипсом, с незначительным количеством пирита (рис. 4). К-Na-ярозит представлен шарообразными выделениями, очень похожими на выделения натечного пирита, вероятно, это результат замещения. Однако, в веществе сохранился пирит в виде кристаллов (рис. 7, в). Гипса в осадке достаточно много, он встречается как в виде крупных (длиной до 200 мкм) хорошо ограненных кристаллов, так и в виде удлиненных выделений неправильной формы (рис. 7, в).

Особое внимание привлекают слои С-2 и С-5, которые сложены преимущественно пирокластическим материалом. Доминируют обломками плагиоклазовых пород (рис. 8, *a*), часто со значительным количеством титаномагнетита. Наблюдаются крупные (200—300 мкм) кристаллы пироксена с округлыми, оплавленными краями (рис. 8, δ). Некоторые обломки плагиоклазовых пород одеты в рубашку натечного пирита. В осадке также установлено значительное количество фрамбоидального пирита (рис. 8, δ), немного створок диатомовых водорослей, немного смектита, каолинита и цеолита (рис. 4). Под каждым пирокластическим слоем обнаружены плотные пластинчатые выделения, состоящие из кристобалита и натроалунита (рис. 3). Местами в пластинах кристобалита встречаются включения антимонита и фрамбоиды пирита.

Разрез донных отложений IV озерка оз. Фумарольное очень разнообразен по составу. Выделяются три основные группы слоев: нижние (С-7 и С-7.1), верхние (С-1—С-6.1) и пирокластические горизонты (С-2 и С-5). Подобный вещественный состав отражает историю формирования данного участка кальдеры Узон.

В нижней части колонки резко доминирует смектит, который ассоциирует с гипсом (С-7.1), натечным пиритом (С-7) и псевдоморфозами ярозита по натечному пириту. Вещество слоя С-7 представлено округлыми микрофрагментами осадка. Близким по составу веществом сложен осадок Сизого грязевого котла в кальдере Узон (Кириченко и др., 2014). В кальдере Узон установлено несколько основных типов термальных проявлений — источники, озера со щелочными или близнейтральными водами на месте фреатических воронок, грязевые котлы, грязевые вулканы, термальные озера с кислыми водами и сопутствующими площадками, где происходит окисление сульфидных минералов (Вулканизм., 1974; Газогидротермы., 2013; Добрецов и др., 2015). Нижняя часть изученной колонки соответствует окисленному веществу отложений грязевого котла с растворами, насыщенными HS-, а над ним лежит дезинтегрированное вещество, аналогичное по составу этим отложениям. Следовательно, в определенный момент времени IV озерко было грязевым котлом, вещество которого находилось на поверхности, подверглось окислению, а затем было перекрыто неокисленным веществом. Такая последовательность может быть следствием фреатического взрыва. После взрыва весь осадок оказался под водой, состав которой со временем стал аналогичен современному, о чем свидетельствует слабо меняющийся смектит-каолинитовый состав осадков с большим количеством створок диатомей и фрамбоидального пирита. Фрамбоиды сформировались, скорее всего, в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий (Рора et al., 2004). Тесная ассоциация фрамбоидов со створками диатомовых водорослей является дополнительным доказательством их биогенного происхождения. В интервалах С-6, С-6.1 количество створок диатомовых водорослей снижается.

Интервал С-3.1 очень неоднороден по составу. В нижней части интервала наблюдается много натечных пирит-опаловых образований. Аналогичные наблюдаются в грифонах, или возле грифонов источников, таких как Термофильный (Лазарева и др., 2012). Вероятно, в этот период здесь существовал аналогичный источник. Выше расположен слой, обогащенный гипсом, что свидетельствует об эвапоритовой обстановке. В слое С-3 много натечного пирита, а выше него наблюдается слой, обогащенный кальцитом. Ранее кальцит был встречен только в микробном сообществе источника Термофильный. Предполагается, что его образование стало возможным при значительном повышении рН раствора в результате деятельности микробного сообщества (Лазарева и др., 2012). Таким образом, на определенном этапе (скорее всего, кратковременном) условия осадконакопления на участке пробоотбора на оз. Фумарольное были сходны с условиями осадконакопления в Термофильном источнике. Отложение минералов происходило в результате гидрохимического осаждения минералов из раствора при его выходе на поверхность и испарении. Внутри основного интервала до глубины 27.5 см есть несколько слоев обогащенных антимонитом (С-6) и сульфидами As (С-1 и С-3.1). Расположение слоев полностью соответствует описанной ранее зональности «современной приповерхностной ртутно-мышьяково-сурьмяной минерализации» (Карпов и др., 1976; Бычков, 2009), которая формировалась под влиянием фактора охлаждения горячих парогазовых выделений в приповерхностных условиях и, следовательно, могла быть наложенной в результате более позднего поступления сурьмы и мышьяка. В колонке содержатся два пирокластических горизонта (С-2 и С-5), которые маркируют произошедшие в окрестностях вулканические извержения. Под ними установлены плотные корки кристобалита, ассоциирующего с минамиитом (антроалунитом). На данном этапе авторы полагают, что эти образования сформировалась в результате взаимодействия горячего пепла и осадка.

Работа выполнена в рамках госзадания № VIII.72.2.3(0330-2016-0011) в «ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН» и при поддержке гранта Междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН № 51.

Список литературы

Бычков А. Ю. Геохимическая модель современного рудообразования в кальдере Узон (Камчатка). М.: ГЕОС, **2009**. 124 с.

Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование / Под ред. С. И. Набоко. Л.: Недра, 1974. 178 с.

Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / Под ред. О. Л. Гаськовой и А. К. Манштейна. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, **2013**. 270 с.

Добрецов Н. Л., Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Брянская А. В., Морозова В. В., Тикунова Н. В., Пельтек С. Е., Карпов Г. А., Таран О. П., Огородникова О. Л., Кириченко И. С., Розанов А. С., Бабкин И. В., Шуваева О. В., Чебыкин Е. П. Гидрогеохимические и микробиологические особенности «нефтяной площадки» кальдеры Узон (Камчатка) // Геология и геофизика. **2015.** Т. 56. № 1—2. С. 56—88.

Карпов Г. А., Павлов А. Л., Кузнецов В. А. Узон-Гейзерная гидротермальная рудообразующая система Камчатки. Физико-химический очерк. Новосибирск: Наука, **1976**. 88 с.

Кириченко И. С., Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Белянин Д. К., Огородникова О. Л., Мирошниченко Л. В. Геохимические и минералогические особенности донного осадка грязевого котла «Сизый» (кальдера Узон, Камчатка) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с. Ч. 2. С. 80—85.

Лазарева Е. В., Анисимова Н. С., Брянская А. В., Огородникова О. Л., Жмодик С. М. Особенности минералообразования в микробных сообществах, развивающихся по изливу источника Термофильный (кальдера Узон, Камчатка) // Тр. Кроноцкого государственного биосферного заповедника. Вып. 2 / отв. ред. В. И. Мосолов. Петропавловск-Камчаткий: Камчатпресс, **2012**. С. 143—156.

References

Bychkov A. Yu. Geochemical model of the modern ore formation in the Uzon caldera (Kamchat-ka). Moscow: GEOS, **2009**. 124 p. (*in Russian*).

Dobretsov N. L., Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Bryanskaya A. V., Morozova V. V., Tikunova N. V., Peltek S. E., Karpov G. A., Taran O. P., Ogorodnikova O. L., Kirichenko I. S., Rozanov A. S., Babkin I. V., Shuvaeva O. V., Chebykin E. P. Geological, hydrogeochemical, and microbiological characteristics of the Oil site of the Uzon caldera (Kamchatka). Russian Geol. Geophys. 2015. Vol. 56. P. 39–63.

Gas and hydrothermal fluids of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, and genesis / Eds O. L. Gaskova, A. K. Manshtein. Novosibirsk, **2013**. 270 p. (*in Russian*).

Karpov G. A., Pavlov A. L., Kuznetsov V. A. Uzon-geyser hydrothermal ore-forming system of Kamchatka. Physico-chemical essay. Novosibirsk: Nauka, **1976.** 88 p. (*in Russian*).

Kirichenko I. S., Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Belyanin D. K., Ogorodnikova O. L., Miroshnichenko L. V. Geochemical and mineralogical features of the bottom sediment of the mud pit «Sizy» (caldera Uzon, Kamchatka). Geol. Miner. Res. Siberia. **2014**. N 1. Part 2. P. 80—85. (in Russian).

Lazareva E. V., Anisimova N. S., Bryanskaya A. V., Ogorodnikova O. L., Zhmodik S. M. Features of mineral formation in microbial communities developing along the outflow source Thermophilic (Uzon caldera, Kamchatka). In: Proc. Kronotsky State Biosphere Reserve. № 2. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, **2012**. P. 143—156 (in Russian).

Migdisov A. A., Bychkov A. Y. The behaviour of metals and sulphur during the formation of hydrothermal mercury—antimony—arsenic mineralization, Uzon caldera, Kamchatka, Russia. J. Volcan. Geotherm. Res. 1998. Vol. 84. N 1. P. 153—171.

Popa R., Kinkle B. K., Badescu A. Pyrite framboids as biomarkers for iron-sulfur systems. *Geomicrobiol. J.* **2004**. Vol. 21. N 3. P. 193—206.

Volcanism, hydrothermal process and ore formation. Ed. by S. I. Naboko. Leningrad: Nedra, 1974. 178 p. (in Russian).

Yeroshchev-Shak V. A., Karpov G. A., Kireyev F. A., Bochko R. A. Thermal Lake Fumarol'noye: A basin of active ore deposition in Kamchatka. Int. Geol. Rev. 1985. Vol. 27. N 10. P. 1135–1148.

Поступила в редакцию 29 мая 2018 г.