

УДК 574.24:579.26

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА КУЛЬДУРСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ИХ УЧАСТИЕ В НАКОПЛЕНИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИИ

Лебедева Елена Геннадьевна¹,
microbiol@mail.ru

Харитоновна Наталья Александровна²,
tchenat@mail.ru

Брагин Иван Валерьевич¹,
bragin_ivan@mail.ru

Кузьмина Татьяна Вениаминовна¹,
tkuzmina@mail.ru

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1.

Актуальность исследований продиктована тем, что несмотря на многолетние режимные наблюдения за температурой и химическим составом термальных вод, сведения о населяющих термальные воды и бактериальные маты микроорганизмах и их биогеохимической роли практически отсутствуют.

Цель: изучить состав, численность функциональных групп бактерий в воде и в микробных матах, формирующихся в различных температурных зонах, и исследовать их роль в накоплении микроэлементов и образовании минералов в термальных источниках Кульдур.

Объектами исследования являлись термальные подземные воды месторождения Кульдур следующих скважин № 1-87, 2-87, 3-87, 3-51, 5-51, а также микробные маты, формирующиеся в озерах и ручьях по изливу термальных источников Кульдур.

Методы: химические и микробиологические методы. Для анализа содержания в воде микроэлементов пробы анализировали с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой. Определение содержания хлорофилла а в микробных матах проводили спектрофотометрически в этанольных экстрактах. Численность различных физиологических групп бактерий определяли на различных селективных средах методом Коха и предельных разведений. Культуры чистили методом истощающего штриха. Элементный анализ микробных матов проводили методом ICP-MS на спектрометре. Фазовый состав минералов определяли с помощью рентгено-фазового анализа на дифрактометре.

Результаты. Показано, что термальные воды исследуемых скважин являются щелочными, низкоминерализованными, в составе катионов преобладает натрий, среди анионов преобладает хлор, фтор и сульфат-ион. Среди микроэлементов доминируют литий, мышьяк и стронций. В изученных скважинах термальных вод отмечена низкая численность бактерий различных физиологических групп, при этом их количество было выше в более низкотемпературных водах. В микробных матах различных термальных зон отмечен разный состав физиологических групп бактерий, при этом преобладали микроорганизмы геохимического цикла серы, железа и марганца. Показано присутствие в составе всех отобранных матов цианобактерий, для которых характерно наличие хлорофилла а. Выявлено значительное накопление микробными сообществами многих редкоземельных элементов (особенно легких) – ванадия, а также урана и тория. В микробных матах отмечено преимущественное осаждение кремния в виде кварца и плагиоклаза.

Ключевые слова:

Термальные источники, Кульдур, микробный мат, физиологические группы, численность бактерий, накопление микроэлементов, осаждение минералов.

Введение

Наземные горячие источники являются экстремальными природными системами, которые характеризуются высокой температурой и поступлением восстановленных глубинных веществ. На выходе термальных вод формируются уникальные сообщества – цианобактериальные маты, которые считают аналогами древних фототрофных сообществ. Бактериальные маты – это высокоструктурированные слоистые сообщества с существенными физико-химическими градиентами. В состав микробных матов входят разнообразные консорциумы, состоящие в основном из прокариот (эубактерий и архей). Различные функциональные группы в микробных сообще-

ствах связаны тесными трофическими отношениями, позволяющими им эффективно участвовать в преобразовании органических и неорганических веществ. Микробные сообщества матов играют важную роль в геохимическом круговороте элементов и приводят в движение биогеохимические циклы, которые намного превосходят по скорости неорганические реакции [1]. Исследования последних лет показывают, что микробные сообщества, формирующиеся на выходе подземных вод, играют важную роль в процессах концентрирования различных микроэлементов и минералообразования [2]. Так, многими авторами показана возможность накопления кадмия, таллия, никеля, бериллия, бора и многих редкоземельных элементов

(РЗЭ) альгобактериальными матами, а также водными растениями (ряска), некоторыми макрофитами и микроскопическими грибами рода *Penicillium*, *Penidiella* sp. [3–7]. Также показана важная роль бактерий в осаждении сульфатных, карбонатных и силикатных минералов в бактериальных матах озер и термальных источников. Микроорганизмы участвуют в процессах осаждения минералов либо непосредственно, либо косвенным путем, предоставляя твердые поверхности для гетерогенной нуклеации [8–10].

На Дальнем Востоке в Амурской области расположено месторождение термальных вод Кульдур. За прошедшее столетие на Кульдурском месторождении было пробурено несколько десятков скважин, изучено геологическое строение района, определен общий химический, микроэлементный, газовый состав вод, состав органических соединений, показано присутствие бактерий различных функциональных групп в термальных водах [11–13]. Однако отсутствуют данные о роли микробных сообществ в процессах концентрирования различных микроэлементов и образования минералов в микробных матах, формирующихся на выходе термальных вод. В связи с этим целью данной работы является изучить состав, численность функциональных групп бактерий в воде и в микробных матах, формирующихся в различных температурных зонах, и исследовать их роль в накоплении микроэлементов и образовании минералов в термальных источниках Кульдур.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись термальные воды Кульдурского месторождения (скважины № 1-87, 2-87, 3-87, 3-51, 5-51), а также микробные маты, формирующиеся в озерах и ручьях по изливу термальных вод (рис. 1). На термальной площадке образовано искусственное трехсекционное озеро. В первой секции озера при температуре 65° С формировался тонкий (не более 1 см толщиной) микробный мат зелено-желто-коричневого цвета (Kuld-1). В ручье, образованном из стекающих термальных вод озера второй секции, при температуре 54° С развивались микробные маты преимущественно темно-зеленого цвета толщиной до 2 см (Kuld-2). В ручье, формирующемся из вод скважины 3-87, при температуре 45° С были выявлены микробные маты коричнево-зеленого цвета с белыми прожилками толщиной до 3 см (Kuld-3).

При отборе проб термальных вод со скважин нестабильные параметры, такие как температура и pH, измерялись непосредственно на месте. Образцы термальных вод подвергали фильтрованию через целлюлозные фильтры (0,45 мкм), которые затем собирались в пластиковые пробирки. Для определения микрокомпонентов в пробы воды дополнительно вводили азотную кислоту. Определение микрокомпонентов в термальных водах выполнено в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500c (Agilent Technologies, Inc., USA).

Пробы воды и бактериальных матов для микробиологического анализа отбирали в стерильные емкости в августе 2018 г.

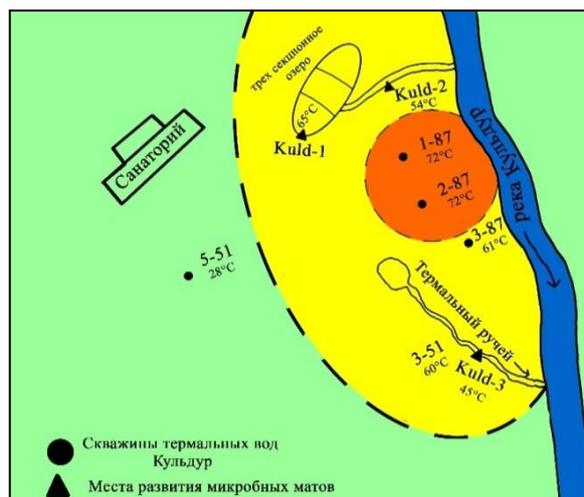


Рис. 1. Карта-схема расположения скважин термальных вод месторождения Кульдур и мест отбора проб микробных матов

Fig. 1. Schematic map of the location of wells of thermal waters of the Kuldur deposit and sampling sites for microbial mats

Пробы микробных матов для изучения накопления микроэлементов, морфологии и качественного состава минеральных фаз отбирали с сохранением структуры. Для определения пигментного состава пробы микробных матов отбирали стерильным пробочным сверлом площадью 1 см² и фиксировали 96 % раствором этилового спирта. В условиях лаборатории образцы микробных матов подвергали разрушению на ультразвуковом дезинтеграторе УЗДН Soniprep 150 plus при 14,5 кГц. Затем полученный состав осаждали центрифугированием при 7000 g в течение 5 мин, надосадочную жидкость использовали для спектрофотометрии. Спектры поглощения пигментов снимали на спектрофотометре Shimadzu UV-2550 (Япония). Определение содержания хлорофилла *a* в микробных матах гидротерм проводили спектрофотометрически в этанольных экстрактах. Для расчетов содержания хлорофилла *a* использовали формулу:

$$\text{мг (хл } a) = 11,9 \times OD_{665} \times (v/l),$$

где OD_{665} – оптическая плотность при длине волны 665 нм; v – объем экстракта в мл; l – длина кюветы. Бактериохлорофилл *c* в образцах бактериальных матов определяли по наличию длинноволнового максимума на спектрах *in vivo* при 740 нм. Химический анализ образцов термальных вод и микробных матов выполнен в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Количество микроорганизмов разных экологотрофических групп определяли методом предельных разведений, для чего использовали различные селективные среды [14]. Микроорганизмы выращивали в термостате при температуре 25, 60 °С (подземные воды), 40, 50, 60 °С (микробные маты). Для изучения накопления элементов пробы матов промывали в термальной воде от грунтов, высушивали и тщательно растирали в мелкодисперсный порошок для химического анализа. После

этого биоматы подвергали микроволновому разложению в системах закрытого типа. Элементный анализ методом ICP-MS выполнен на спектрофотометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, Japan). Для выявления и оценки биогеохимических особенностей накопления элементов микробным сообществом использовался коэффициент биологического накопления (Кб), который рассчитывался по формуле:

$$K_b = C1/C2,$$

где Кб – коэффициент биологического накопления; С1 – концентрация элемента в микробном мате; С2 – концентрация элемента в воде.

Для определения накопления элементов микробными сообществами использовался следующий подход: считалось, что элементы не концентрируются, если $\lg K_b < 1$, относительно слабо накапливаются при $\lg K_b = 1-3$, в небольшой степени накапливаются при $\lg K_b = 3-5$, в значительной степени концентрируются, если $\lg K_b = 5-6$ и элементы сильно концентрируются при $\lg K_b > 6$.

Для изучения образования минералов микроорганизмами пробы матов сушили в лабораторных условиях и тщательно перетирали в агатовых ступках. Навеску образца (1 г) помещали в кювету и снимали дифрактограммы. Интенсивность отражений оценивали из дифрактограмм по высоте пиков. Фазовый состав минералов определяли с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре D-8 Advance, Bruker.

Результаты и обсуждение

Химический состав термальных вод Кульдур

Результаты исследования показали, что воды Кульдурского термального поля являются щелочными, низкоминерализованными (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические параметры термальных вод Кульдур

Table 1. Physical and chemical parameters of Kuldur thermal waters

Показатели Parameters	Скважины подземных вод Groundwater wells				
	1-87	2-87	3-87	3-51	5-51
Температура Temperature, °C	72,0	72,0	61,0	60,0	28,0
pH	9,11	9,13	9,07	9,24	9,53
*Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	524,71	520,25	498,99	492,50	509,88

*Данные литературы/Literature data [12].

Преобладающими катионами являются натрий (87,7–94,3 мг/л), калий и кальций (1,71–2,24 мг/л). Концентрация магния низка и близка к нулю (0–0,03 мг/л). Среди анионов преобладают хлор-ион (31,5–34,9 мг/л), фтор-ион (17,7–18,9 мг/л) и сульфат-ион (16,1–18,5 мг/л). Среди микроэлементного состава значительно превалирует литий (351,8–369,7 мкг/л), мышьяк (79,2–113,1 мкг/л), стронций (65,3–83,3 мкг/л) и алюминий (24,22–53,92 мкг/л). Содержание железа в термальных водах было распределено неравномерно (3,56–356,8 мкг/л), его наибольшие количества отмечали в скважине № 3-87. Марганец и барий присут-

ствуют в термальных водах в низких количествах (0,28–11,46 мкг/л). Содержание общего углерода органического имеет невысокие значения и колеблется в пределах 0,3–3,7 мг/л, причем минимальные его значения наблюдаются в воде из центральных скважин (1-87, 2-87), а максимальные – в воде из скважины 3-51 [12].

Структура, численность функциональных групп бактерий в термальных водах и микробных матах месторождения Кульдур. Состав пигментов в микробных матах

В обследованных термальных подземных водах различных скважин выявлено низкое количество бактерий различных функциональных групп и их неравномерное распределение. Среднее число бактерий составляло от $0,2 \times 10^2$ (скв. 1-87) – $1,9 \times 10^2$ кл/мл (скв. 3-87). Более низкая численность функциональных групп микроорганизмов обнаружена в более горячих подземных водах центральных скважин (№ 1-87, 2-87), что коррелировало с низкими концентрациями общего органического углерода, выявленными в водах этих скважин [12]. В термальных водах скважин № 3-87, 3-51 и 5-51, отличающихся более низкими температурами вод (28–61 °C), обнаружена более высокая численность и состав эколого-трофических групп микроорганизмов. В подземных водах изученных скважин преобладали бактерии геохимического цикла серы (особенно тионовые $0,9 \times 10^2$ (3-51) – $2,5 \times 10^3$ кл/мл (3-87)), что согласуется с ранее полученными данными [13] и указывает на происходящие в термальных водах процессы окисления восстановленных соединений серы с участием микроорганизмов.

В микробных сообществах, формирующихся в различных температурных зонах (табл. 2), выявлены существенные различия в распределении, численности и составе доминирующих физиологических групп бактерий. В микробном мате Kuld-1, развивающемся при температуре 65 °C, отмечено наименьшее количество функциональных групп бактерий и их низкая средняя численность (табл. 2), что, вероятно, определялось высокой температурой вод, которая могла ингибировать рост бактерий. В составе микробных сообществ преобладали сульфатредуцирующие, марганец- и железовосстанавливающие, гетеротрофные железокисляющие микроорганизмы, что свидетельствует о протекающих в микробных матах процессах восстановления сульфатов до сульфидов, а также окисления и восстановления соединений железа и марганца. С уменьшением температуры термальных вод до 45 °C количество развивающихся функциональных групп бактерий и их средняя численность увеличивается, достигая максимума в мате Kuld-3, при этом наблюдается смена доминирующих микроорганизмов (табл. 2). В микробном мате Kuld-2, формирующемся при температуре 54 °C, отмечалось обильное развитие многих физиологических групп бактерий, при этом в составе микробного сообщества значительно преобладали сульфатредуцирующие, тионовые и силикатные бактерии (табл. 2). В микробном мате Kuld-3 при температуре воды 45 °C отмечено наибольшее количество функциональных групп

микроорганизмов и их наиболее высокая средняя численность (табл. 2). Доминирующими физиологическими группами были сапрофитные и гидролитические бактерии (табл. 2), которые являются первичными деструкторами органического вещества и принимают активное участие в разложении белков, жиров, сахаров, целлюлозы и крахмала. Также широко были представлены сульфатредуцирующие и бесцветные

серобактерии, которые обладали способностью восстанавливать сульфат до сероводорода и затем окислять его, откладывая серу внутри клеток. Появлению в составе микробного мата бесцветных серобактерий, вероятно, способствовало развитие мата в условиях проточной воды и более низких температур (45 °С), что необходимо для создания градиента сероводорода и кислорода.

Таблица 2. Физико-химические и микробиологические показатели развивающихся микробных матов в термальных источниках Кульдур

Table 2. Physicochemical and microbiological parameters of developing microbial mats in the Kuldur thermal springs

Точки отбора проб Sampling points	Описание микробных матов Description of microbial mats	T °С	pH	M*	Преобладающие физиологические группы, кл/см ³ Prevailing physiological groups, cells/cm ³	Хлорофилл <i>a</i> , мкг/см ² Chlorophyll <i>a</i> , µg/cm ²
Kuld-1 1-я секция термального озера first section of the thermal lake	Тонкая зелено-желто-коричневого цвета биопленка толщиной до 1 см Thin green-yellow-brown biofilm up to 1 cm thick	65	9,15	514,2	Железо и марганец восстанавливающие (3,6–4,0×10 ²), железокисляющие iron-oxidizing (3,3×10 ²), сапрофитные/saprophytic (2,8×10 ³)	8,1
Kuld-2 Выход терм из второй секции, ручей Therm exit from the second section, stream	Мат темно-зеленого цвета толщиной до 2 см Dark green mat up to 2 cm thick	54	9,11	518,4	Сульфатредуцирующие Sulfate reducing (6,8×10 ⁴), тионовые/thionic (1,2×10 ⁴), силикатные/silicate (7,4×10 ³), сапрофитные/saprophytic (5,4×10 ³)	11,2
Kuld-3 Ручей из водскв. 3-87 Stream from the waters of the well. 3-87	Мат коричнево-зеленого цвета с белыми обрастаниями толщиной до 3 см Brown-green mat with white fouling up to 3 cm thick	45	8,89	501,5	Сапрофитные/saprophytic (1,5×10 ³), гидролитические/hydrolytic (6,4×10 ³ –5,9×10 ⁴), сульфатредуцирующие/sulfate-reducing (1,2×10 ⁴), бесцветные серобактерии/colorless sulfur bacteria (8,9×10 ²)	12,4

*M – минерализация, мг/л/mineralization, mg/l.

Таким образом, результаты показывают, что температура термальных вод в местах формирования микробных матов оказывает значительное влияние на распределение, численность и состав доминирующих физиологических групп бактерий.

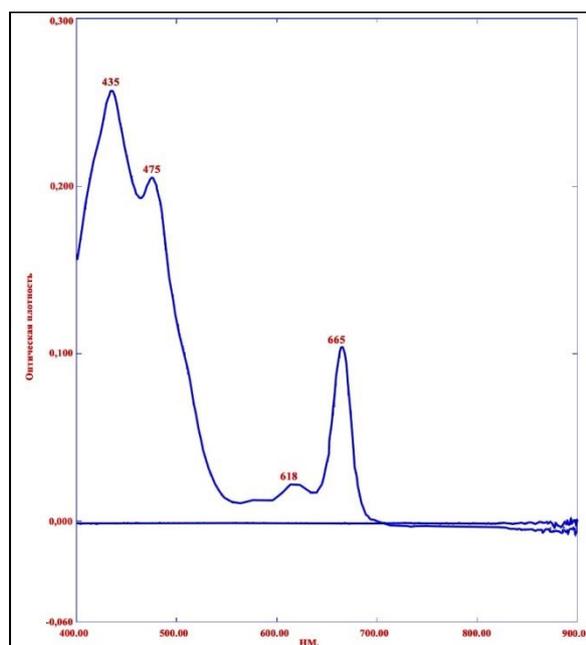


Рис. 2. Спектры поглощения образца микробного мата (точка Kuld-3, 45 °С)

Fig. 2. Absorption spectra of a microbial mat sample (Kuld-3 point, 45 °С)

Исследование содержания пигментов в микробных матах источников Кульдур показало, что во всех исследуемых образцах микробных матов в спектрах присутствуют четыре ярко выраженных пика поглощения: 435, 475, 618 и 665 нм (рис. 2). Пики 435, 475 нм указывают на содержание каротиноидов спирилло-ксантиновой серии в микробных матах. Каротиноиды – широкая группа пигментов, синтезируемая фототрофными микроорганизмами. Наличие пика 665 нм указывает на присутствие в составе матов цианобактерий, для которых характерно наличие хлорофилла *a* с максимумом при 665 нм. Измерение содержания хлорофилла *a* в этанольных экстрактах показывает, что с понижением температуры содержание пигмента в матах постепенно возрастает. В точке Kuld-1 (65 °С) содержание хлорофилла *a* составляет 8,1 мкг/см², тогда как в точках Kuld-2 (54 °С), Kuld-3 (45 °С) достигает 11,2 и 12,4 мг/м² соответственно (табл. 2). Наличие пика 618 нм, видимо, обусловлено наличием фикоцианина, характерного для большинства цианобактерий. Бактериохлорофилл *a* и *c* (750–758, 800–856 нм) в исследуемых образцах обнаружен не был, что указывает на отсутствие в матах зеленых серобактерий и пурпурных бактерий.

Накопление микроэлементов и образование минералов в микробных сообществах месторождения термальных вод Кульдур

Микроэлементный анализ термальных вод и микробных матов показал присутствие щелочных, щелочноземельных металлов, переходных металлов, метал-

лоидов и неметаллов, редкоземельных и радиоактивных элементов (табл. 3). Наибольшую концентрацию в воде имели Li (351,8–369,7 мкг/л) и As (109,8–113,1 мкг/л), также отмечено довольно высокое содержание Sr (до 68,8 мкг/л), Cs (до 31,58 мкг/л), Rb (до 31,10 мкг/л), Ga (до 12,4 мкг/л), Zn (до 11,3 мкг/л). В микробных матах выявлено высокое содержание таких элементов, как: Sr, Cs, V, Li и Ce, концентрация которых превышала их количество в воде в 118 (Li) – 4×10^6 раз (Ce) (табл. 3). Значения lg КБН в исследованных микробных сообществах варьировали от 1,64 (Kuld-2, Li) до 6,99 (Kuld-3, Pr), при этом элементов, не накапливающихся в матах, отмечено не было (табл. 4). Во всех изученных микробных матах относительно слабо концентрировались щелочные металлы Li, Rb, Cs, а также As и Ga, при этом средние значения lg КБН составляли 1,84 (Li) – 2,99 (Cs) (рис. 3).

Таблица 3. Микроэлементный состав минеральных вод и микробных матов месторождения Кульдур

Table 3. Trace element composition of mineral waters and microbial mats from the Kuldur deposit

Элементы Elements	Kuld-1 (65 °C)		Kuld-2 (54 °C)		Kuld-3 (45 °C)	
	Вода, мкг/л Water, µg/l	Мат № 1, мкг/кг Mat no. 1, mcg/kg	Вода, мкг/л Water, µg/l	Мат № 2, мкг/кг Mat no. 2, mcg/kg	Вода, мкг/л Water, µg/l	Мат № 3, мкг/кг Mat no. 3, mcg/kg
Li	369,7	24924,10	351,8	15487,37	355,0	42108,77
Be	0,123	2305,43	0,117	1265,43	0,0772	931,04
Sc	0,104	2195,94	0,124	1071,98	0,1161	2570,88
V	0,042	28758,58	0,041	17879,04	0,024	48587,05
Cr	0,064	2305,43	0,046	1265,43	0,061	931,04
Co	0,0052	4280,17	0,0067	1371,57	0,016	5151,91
Ni	0,852	8133,17	0,617	4379,45	0,274	9154,01
Cu	1,54	11274,22	0,63	15597,56	1,552	9167,52
Zn	11,3	105425	5,82	57175,0	3,53	73050,0
Ga	12,06	9048,61	12,4	5485,24	11,71	14742,21
As	110,2	19531,37	113,1	25395,07	109,8	10711,34
Rb	30,14	19631,96	30,315	13790,29	31,1	32323,67
Sr	68,8	125225,0	68,6	188350	68,5	159675,0
Y	0,0018	6184,23	0,0015	2223,80	0,017	6568,22
Ag	0,0476	49,28	0,0923	222,93	0,0561	49,75
Cd	0,0338	274,64	0,0027	168,92	0,0252	153,61
Cs	31,05	27518,87	31,34	20434,35	31,58	51042,60
Ba	0,67	61300,0	0,82	46525,0	0,58	71100,0
La	0,003	16731,17	0,0026	6881,32	0,0028	15623,84
Ce	0,0081	33692,56	0,056	14000,40	0,0074	28164,39
Pr	0,0007	4017,78	0,0004	1600,30	0,0004	3913,09
Nd	0,0031	14857,00	0,0019	4811,27	0,0018	14823,72
Sm	0,0005	2150,04	0,0006	799,35	0,0006	2254,09
Eu	0,0003	293,43	0,0002	118,96	0,0002	331,01
Gd	0,0007	1606,06	0,0007	620,12	0,0006	1846,80
Tb	0,0001	247,01	0,0001	87,89	0,0001	259,57
Dy	0,0004	1140,29	0,0005	413,87	0,0005	1211,67
Ho	0,0001	209,58	0,0001	76,55	0,0001	218,77
Er	0,0002	571,59	0,0004	208,19	0,0002	585,68
Tm	0,0001	70,79	0,0001	27,37	0,0001	72,46
Yb	0,0003	433,64	0,0003	161,61	0,0004	424,62
Lu	0,0001	61,48	0,0001	23,48	0,0001	60,72
Ti	0,021	226,26	0,0023	119,01	0,0028	174,58
Pb	0,118	14744,41	0,076	10654,24	0,096	13896,45
Th	0,001	5516,70	0,0007	1778,13	0,0009	5598,11
U	0,0016	484,45	0,0012	209,60	0,0011	485,27

По-видимому, одним из факторов, снижающих их накопление микробными матами, является сравни-

тельно высокое содержание этих элементов в воде (табл. 3). Низкая биоаккумуляция лития клетками микроводорослей и бактериальными матами минеральных вод показана ранее нами и другими авторами [15, 16]. В небольшой степени в микробных матах накапливались тяжелые металлы Cu, Cd, Zn, Ni (4,00–4,16), а также Ag, Ti, Cr (3,78–4,51), щелочноземельные Sr, Be, Ba (3,35–4,93) и редкоземельные элементы (РЗЭ) Sc (4,20) (рис. 3). При этом среднее содержание элементов в микробных матах превышало их концентрацию в воде в 1600 (Ag) – 86000 (Ba) раз (табл. 3). В значительной степени концентрировался в микробных матах Co и РЗЭ (Lu, Tm, Eu, Yb), а также V и радиоактивный U, при этом средние значения lg КБН изменялись от 5,39 (Co) до 5,99 (Eu) (рис. 3).

Таблица 4. Распределение значений lg КБН микроэлементов в микробных матах Кульдурских термальных источников

Table 4. Distribution of log values of biological accumulation coefficient (CBA) of microelements in microbial mats of Kuldur thermal springs

Элементы Elements	Kuld-1	Kuld-2	Kuld-3	Элементы Elements	Kuld-1	Kuld-2	Kuld-3
	65	54	45		65	54	45
°C							
Li	1,82	1,64	2,07	La	6,74	6,42	6,74
Be	4,28	4,02	4,06	Ce	6,61	5,39	6,58
Sc	4,34	3,95	4,33	Pr	6,75	6,60	6,99
V	5,85	5,65	6,38	Nd	6,68	6,40	6,91
Cr	4,58	4,40	4,19	Sm	6,63	6,12	6,57482
Co	5,63	5,13	5,41	Eu	5,99	5,77	6,21
Ni	3,98	3,84	4,53	Gd	6,36	5,94	6,48
Cu	3,86	4,39	3,77	Tb	6,39	5,94	6,41
Zn	3,96	3,99	4,31	Dy	6,45	5,91	6,38
Ga	2,87	2,64	3,10	Ho	6,32	5,88	6,33
As	2,24	2,35	1,98	Er	6,45	5,71	6,46
Rb	2,81	2,65	3,01	Tm	5,84	5,43	5,86
Sr	3,26	3,43	3,36	Yb	6,16	5,73	6,02
Y	6,53	6,17	5,59	Lu	5,78	5,37	5,78
Ag	3,01	5,38	2,94	Ti	4,03	4,71	4,79
Cd	3,90	4,79	3,78	Pb	5,09	5,14	4,15
Cs	2,94	2,81	3,20	Th	6,74	6,40	6,79
Ba	4,961	4,75	5,08	U	5,48	5,24	5,64

О значительном накоплении кобальта бактериальными матами термальных источников Хойто-Гол (Восточные Саяны), а также клетками цианобактерий рода *Oscillatoria sp.* указывают другие авторы [2, 17]. В работах японских коллег указывается на преимущественное накопление в чистых бактериальных культурах, биопленках и микробных матах горячих источников Накафуса (Япония) тяжелых РЗЭ, таких как Tm, Yb, Lu [18, 19]. В исследовании [20] сообщается о более значительной сорбции Eu (*Microbacterium sp.*), Tb (*Bacillus sp.*) и Yb (*Bacillus sp.*) чистыми культурами грамположительных бактерий при pH=4. О высоком накоплении V микробными сообществами сообщается другими авторами [1, 21]. Такое высокое концентрирование V в микробных матах, вероятно, связано с тем, что элемент хорошо концентрируется многими живыми организмами и его высокие количества находят в захороненных и ча-

стично метаморфизированных остатках органического вещества. Высокое накопление радиоактивного урана в микробных матах (5,24–5,64) нашло подтверждение в работах других исследователей. Так, в [22, 23] сообщается о существенной сорбции (>20 %)

радиоактивного урана одноклеточными зелеными водорослями *Scenedesmus quadricauda* и клетками грамотрицательных аэробных бактерий рода *Pseudomonas sp.* Показано, что в сорбции урана клетками бактерий участвуют органические фосфаты.

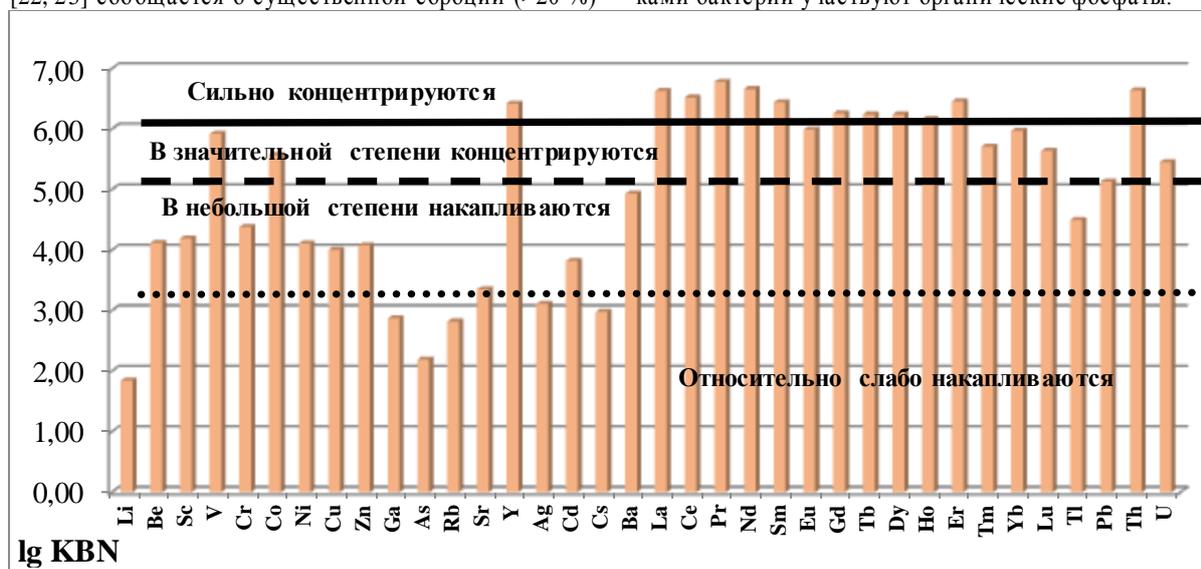


Рис. 3. Распределение средних значений КБН микроэлементов в микробных матах термальных источников Кульдур
 Fig. 3. Distribution of average CBA values of microelements in microbial mats of Kuldur thermal springs

Способность к высокой биосорбции урана также показана для бактерий рода *Rhizopus sp.*, *Sphingomonas sp.*, *Stenotrophomonas sp.* [24]. В наибольшем количестве накапливались в микробных матах термальных вод Кульдур многие РЗЭ и радиоактивный Th (рис. 3). Наиболее сильно концентрировались в матах легкие РЗЭ, особенно Ce (5,39–6,61), La (6,42–6,74), Nd (6,40–6,91), Pr (6,60–6,99), а также Th (6,40–6,79), при этом их содержание в матах достигало 4297,64 (Th) – 25285,78 (Ce) мкг/кг, тогда как в воде концентрация этих элементов была ниже в 4–5 млн раз (табл. 3). В литературе отмечается способность некоторых водных растений (ряска), микроскопических грибов рода *Penicillium sp.* и микробных матов минеральных источников Приморья к накоплению легких РЗЭ (Ce, La, Nd, Pr и др.) [3, 15, 16]. Возможной причиной преимущественной концентрации легких РЗЭ в микробных матах является образование комплексных соединений РЗЭ с гидроксильными группами и фосфат-содержащими соединениями микробных клеток, такими как: фосфаты, полифосфаты, фосфолипиды, нуклеиновые кислоты и фосфорилированные полисахариды. Количество данных, характеризующих накопление организмами радиоактивного тория, в литературе ограничено. Работы свидетельствуют о значительной биосорбции Th бактериями вида *Micrococcus luteus*, а также актиномицетами *Streptomyces sporoverrucosus* [24, 25].

Для микробных матов, отобранных из низкотемпературных зон (Kuld-3, 45 °C) более высокие значения lg КБН были характерны для большинства изученных элементов. Значения КБН таких элементов, как As (2,35), Ag (3,38), Sr (3,43) и Cu (4,39), были выше в микробных матах, выделенных из средней температурной зоны (Kuld-2, 54 °C). В термофильных

микробных сообществах высокотемпературных зон (Kuld-1, 65 °C) особенно эффективно концентрировались некоторые тяжелые металлы (Cd, Co), элементы (Be, Cr) и РЗЭ (Lu, Yb, Dy, Ce, Sm, La) (табл. 4).

В микробных сообществах термальных источников Кульдур также происходили процессы биогенного минералообразования. По результатам рентгенофазового анализа показано, что в матах происходило преимущественное осаждение кремния в виде кварца и плагиоклаза (табл. 5).

Таблица 5. Состав минералов в микробных матах термальных источников Кульдур

Table 5. Composition of minerals in microbial mats from Kuldur thermal springs

Минералы Minerals	Kuld-1 (65 °C)	Kuld-2 (54 °C)	Kuld-3 (45 °C)
Хлорит/Chloite (Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	+	+	+
Слюда/Mica Na ₂ (Al,Mg,Fe,Li) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH,F) ₂	+	++	++
Кварц/Quartz SiO ₂	+++	+++	+++
Плагиоклаз/Plagioclase NaAlSi ₃ O ₈	+++	++	++
Кальцит/Calcite CaCO ₃	-	-	+
Элементарная сера/Elemental sulfur S ₈	-	-	+

«-» – отсутствие; «+» – небольшие количества минерала; «++» – средние; «+++» – высокие (оператор Н.В. Грудя).
 «-» – absence; «+» – small amounts of the mineral; «++» – medium; «+++» – high (specialist N.V. Gruda).

Наиболее высокие концентрации кварца и плагиоклаза выявлены в микробном мате Kuld-1, отобранном из высокотемпературной зоны (65 °C). Отложение минералов кремния часто наблюдаются в микробных матах различных горячих источников и часто

связаны с деятельностью микроорганизмов [26, 27]. Также в микробных матах отлагались минералы хлорит и слюда (табл. 5). Из литературных данных известно, что микроорганизмы могут участвовать в образовании и трансформации таких глинистых минералов, как хлорит, и в их присутствии ход процессов значительно ускоряется [28]. В микробных матах, формирующихся в низкотемпературных зонах (Kuld-3, 45 °C) отмечено образование небольших количеств минералов кальцита и элементарной серы (табл. 5). Известно, что кальцит формируется внутри микробных сообществ в тех источниках, где содержание кальция в термальных водах достаточно высоко [29]. Так как термальные воды Кульдур содержат кальция не более 2 мг/л, формирование существенных количеств кальцита не происходит. Необходимыми предпосылками для образования кальцита является активная деятельность цианобактерий, которые в процессе своей жизнедеятельности могут повышать pH среды и поступление необходимого количества катиона Ca^{2+} [9]. Формированию кальцита в микробных матах может также способствовать деятельность гетеротрофных бактерий, способных создавать щелочную микросреду в результате их физиологической активности. Организмы, способные это делать, включают сапрофитные, сульфатредуцирующие (выделяют бикарбонат), нитритоксилирующие (восстанавливают нитраты) и аммонифицирующие бактерии (разлагающие мочевину, выделяют ионы аммония) [28, 30]. В микробном мате Kuld-3 отмечены наибольшие количества сапрофитных ($1,5 \times 10^5$ кл/см³) и аммонифицирующих бактерий ($8,4 \times 10^2$ кл/см³), что, вероятно, могло повлиять на образование кальцита только в этом образце. Образование элементарной серы в микробном мате Kuld-3, вероятно, связано с жизнедеятельностью бесцветных серобактерий, обнаруженных только в этом мате в средних количествах. Образованию минералов микроорганизмами способствует крайне низкая проницаемость матов, которая предполагает молекулярную диффузию в мате и сводит к минимуму эффект разбавления. В результате резкие изменения pH и Eh,

связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов, приводят к изменению равновесия раствора и вызывают осаждение тех соединений, которые не способны находиться в растворе в этих условиях [2].

Заключение

Проведенные исследования показали, что экологические условия среды обитания микробных сообществ являются благоприятными для развития и функционирования бактерий различных физиологических групп. В термальных водах отмечен небольшой состав и низкая численность функциональных групп микроорганизмов, при этом преобладали тионовые бактерии, осуществляющие окисление соединений серы. В микробных матах наибольший состав физиологических групп микроорганизмов и их наиболее высокая численность выявлена в сообществах, развивающихся в более низкотемпературных источниках (45 °C). В микробных матах хемотрофные и органотрофные аэробные и анаэробные прокариоты принимают наиболее активное участие в биогеохимических циклах углерода и серы, что подтверждается высокими численностями сапрофитных, гидролитических, а также тионовых, сульфатредуцирующих и бесцветных серобактерий. Отмечена высокая интенсивность бионакопления микробными матами различных щелочных, щелочноземельных, радиоактивных элементов, РЗЭ и металлов. Микробные сообщества термальных источников Кульдур играют важную роль в осаждении силикатных минералов, кальцитов, серы и аморфных твердых веществ. Формированию этих минералов может способствовать физиологически индуцированное подщелачивание микросреды клетками цианобактерий или гетеротрофных микроорганизмов. Присутствие бактериальных клеток необходимо для минерализации. Бактерии обеспечивают центры зародышеобразования для отложения минералов. Полученные результаты позволяют рассматривать альго-бактериальные сообщества Кульдурских термальных источников в качестве активного преобразователя термальных вод и важного фактора биогеохимической миграции микроэлементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование распределения элементов между цианобактериальным сообществом и карбонатной постройкой термального источника методом РФА СИ / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, И.В. Петрова, Ю.П. Колмогоров, М.А. Федорин, А.В. Брянская, О.П. Таран // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 5. – С. 77–85.
2. Минералого-геохимические особенности бактериальных матов и травертинов термального источника Хойто-Гол (Восточные Саяны) / А.В. Татарин, Л.И. Яловик, Е.С. Кашкак, Э.В. Данилова, Е.А. Хромова, В.В. Хахинов, Б.Б. Намсараев // Геология и геофизика. – 2017. – № 1. – С. 60–73.
3. The accumulation of rare-earth yttrium ions by *Penicillium* sp ZD 28 / W. Wang, C. Xu, Y. Jin, Z. Zhang, R. Yan, D. Zhu // *AMB Express*. – 2020. – V. 10 (25). – P. 1–11.
4. Horiike T., Yamashita M. A new fungal isolate, *Penidiella* sp strain T9, accumulates the rare earth element Dysprosium // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2015. – V. 81 (9). – P. 3062–3068.
5. Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. The accumulation of La, Ce and Y by *Lemna minor* and *Lemna gibba* in the Keban gallery water, Elazig Turkey // *Water and environment journal*. – 2018. – V. 32. – P. 75–83.
6. Sasmaz M., Senel G., Obek E. Boron bioaccumulation by the dominant macrophytes grown in various discharge water environment // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. – 2021. – V. 106. – P. 1050–1058. DOI: 10.1007/s00128-021-03222-7.
7. Chemical component depositions in the microbial mats and travertine in the Khoito-Gol thermal spring (Eastern Sayan) / E.S. Kashkak, V.V. Khakhinov, E.V. Danilova, U.S. Oorzhak, O.P. Dagurova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 908.
8. Douglas S., Beveridge T.J. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities // *FEMS microbiology ecology*. – 1998. – V. 26. – P. 79–88.
9. Hoffmann T.D., Reeksting B.J., Gebhard S. Bacteria-induced mineral precipitation: a mechanistic review // *Microbiology*. – 2021. – V. 167. – № 4. – P. 1–13.
10. Porta G.D., Hoppert M., Hallmann C. The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy) // *The Depositional record*. – 2022. – V. 8. – № 1. – P. 165–209.
11. Химический и изотопный состав азотных термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) / Н.А. Харитонова,

- Л.А. Лямина, Г.А. Челноков, И.В. Брагин, А.А. Карабцов, И.А. Тарасенко, Х. Накамура, Х. Ивамори // Вестник Московского университета. Сер. 4 Геология. – 2020. – № 5. – С. 77–91.
12. Компаниченко В.Н., Потурай В.А. Вариации состава органического вещества в водах Кульдурского геотермального месторождения (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2015. – № 4. – С. 96–107.
13. Калитина Е.Г., Харитонов Н.А., Вах Е.А. Распространение бактерий различных эколого-трофических групп в подземных термальных водах Кульдурского месторождения (Дальний Восток России) // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – С. 351.
14. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
15. Selective bioaccumulation of rubidium by microalgae from industrial wastewater containing rubidium and lithium / P. Kastanek, F. Kastanek, O. Kronusova, I. Branyikova // Journal of applied phycology. – 2022. – V. 30. – № 1. – P. 461–467.
16. Microorganisms of various ecological-trophic groups in the saline ground waters of Primorsky Region (distribution, number, participation in accumulation of microelements) / E.G. Lebedeva, G.A. Chelnokov, I.V. Bragin, N.A. Kharitonova // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – № 020061.
17. Maimulyati A., Prihadi A.R., Nurhidayati I. Adsorption of cobalt ion from aqueous solution using biomaterial of microalgae *Oscillatoria* sp isolated from Teluk Jakarta // Research journal of applied sciences, engineering and technology. – 2020. – V. 17. – № 1. – P. 7–12.
18. Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for REE sorption onto natural microbial mats / Y. Takahashi, X. Chatellier, K. Hattori, K. Kato, D. Fortin // Chemical geology. – 2005. – V. 219. – P. 53–67.
19. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? / Y. Takahashi, T. Hirata, H. Shimizu, T. Ozaki, D. Fortin // Chemical geology. – 2008. – V. 244. – P. 569–583.
20. Биосорбция редкоземельных элементов и иттрия в водной среде гетеротрофными бактериями / Е.С. Казак, Е.Г. Калитина, Н.А. Харитонов, Г.А. Челноков, Е.В. Еловский, И.В. Брагин // Вестник Московского университета. Сер. 4 Геология. – 2018. – № 2. – С. 73–80.
21. Mechanism of vanadium (IV) resistance of the strains isolated from a vanadium titanomagnetite mining region / Y.Q. Yu, H.Q. Luo, W.Y. Tang, C.P. Yu, L. Lu, J.W. Li, J.Y. Yang // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2020. – V. 195. – № 1. – P. 110463.
22. Сорбция радионуклидов микроорганизмами из глубинного хранилища жидких низкоактивных отходов / Е.А. Лукьянова, Е.В. Захарова, Л.И. Константинова, Т.Н. Назина // Радиохимия. – 2008. – Т. 50. – С. 75–80.
23. Биосорбция ^{99}Tc и ^{238}U одноклеточными зелеными водорослями *Scenedesmus quadricauda* / Е.А. Максимова, Т.Г. Попова, Н.Н. Попова, А.М. Сафиулина, И.Г. Танаев // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 2. – С. 85–92.
24. Microbial interaction with and tolerance of radionuclides: underlying mechanisms and biotechnological applications / M. Lopez-Fernandez, F. Jroundi, M. Ruiz-Fresnedo, M. Merroun // Microbial Biotechnology. – 2021. – V. 14. – № 3. – P. 810–828.
25. Nakajima A. Competitive biosorption of thorium and uranium by *Micrococcus luteus* // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2004. – V. 260. – P. 13–18.
26. Inagak F., Motomura X., Ogata S. Microbial silica deposition in geothermal hot waters // Applied microbiology and biotechnology. – 2003. – V. 60. – P. 605–611.
27. Ikeda T. Bacterial biosilicification: a new insight into the global silicon cycle // Bioscience, biotechnology and biochemistry. – 2021. – V. 85. – № 6. – P. 1324–1331.
28. Fomina M., Skorochod I. Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications // Minerals. – 2020. – V. 10. DOI: 10.3390/min10100861
29. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats / C. Dupraz, O. Braissant, A. Decho, R.S. Norman, P. Visscher, R.P. Reid // Earth-science reviews. – 2009. – V. 96. – № 3. – P. 141–162.
30. Arias D., Cisternas L.A., Rivas M. Biomineralization mediated by ureolytic bacteria applied to water treatment: a review // Crystals. – 2017. – V. 345. – № 7. DOI: 10.3390/cryst7110345

Поступила 02.08.2022 г.

Прошла рецензирование 20.09.2022 г.

Информация об авторах

Лебедева Е.Г., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии гипергенных процессов Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Харитонов Н.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Брагин И.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии гипергенных процессов Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Кузьмина Т.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории аналитической химии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

UDC 574.24:579.26

MICROBIAL COMMUNITIES OF THE KULDUR THERMAL SPRINGS AND THEIR PARTICIPATION IN THE ACCUMULATION OF MICROELEMENTS AND MINERAL FORMATION

Elena G. Lebedeva¹,
microbiol@mail.ru

Natalya A. Kharitonova²,
tchenat@mail.ru

Ivan V. Bragin¹,
bragin_ivan@mail.ru

Tatyana V. Kuzmina¹,
tkuzmina@mail.ru

¹ Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
159, 100 let Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

² M.V. Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory street, Moscow, 119234, Russia.

Relevance. Despite long-term regime observations of the temperature and chemical composition of thermal waters, there is practically no information about the microorganisms inhabiting thermal waters and bacterial mats and their biogeochemical role.

Purpose: to study the composition, the number of functional groups of bacteria in water and in microbial mats formed in different temperature zones and to investigate their role in the accumulation of trace elements and the formation of minerals in the Kuldur thermal springs.

The objects of study were the thermal underground waters of the Kuldur deposit of the following wells no. 1-87, 2-87, 3-87, 3-51, 5-51, as well as microbial mats formed in lakes and streams along the outflow of the Kuldur thermal springs.

Methods: chemical and microbiological methods. To analyze the contents of microelements in water, the samples were analyzed using an inductively coupled plasma mass spectrometer. Determination of the content of chlorophyll a in microbial mats was carried out spectrophotometrically in ethanol extracts. The number of different physiological groups of bacteria was determined on various selective media by the Koch method and limiting dilutions. Cultures were cleaned by the exhaustive stroke method. Elemental analysis of microbial mats was performed by the ISP-MS method on a spectrometer. The phase composition of minerals was determined using X-ray phase analysis on a diffractometer.

Results. It is shown that the thermal waters of the studied wells are alkaline, low mineralized, sodium predominates in the composition of cations, chlorine, fluorine and sulfate ions prevail among anions. Lithium, arsenic, and strontium dominate among microelements. In the studied wells of thermal waters, a low number of bacteria of various physiological groups was noted, while their number was higher in lower temperature waters. In microbial mats of different thermal zones, a different composition of physiological groups of bacteria was noted. Microorganisms of the geochemical cycle of sulfur, iron and manganese prevailed. The presence of cyanobacteria, which are characterized by the presence of chlorophyll a, was shown in the composition of all selected mats. A significant accumulation of many rare earth elements (especially light) – vanadium, as well as uranium and thorium by microbial communities – was revealed. In microbial mats, silicon was predominantly deposited in the form of quartz and plagioclase.

Key words:

Thermal springs, Kuldur, microbial mat, physiological groups, bacterial abundance, microelement accumulation, mineral precipitation.

REFERENCES

- Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Petrova I. V., Kolmogorov Yu. P., Fedorin M. A., Bryanskaya A. V., Taran O. P. Investigation of the distribution of elements between the cyanobacterial community and the carbonate structure of the thermal spring by XRF SR. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2012, no. 5, pp. 77–85. In Rus.
- Tatarinov A. V., Yalovik L. I., Kashkak E. S., Danilova E. V., Khromova E. A., Khakhinov V. V., Namsaraev B. B. Mineralogical and geochemical features of bacterial mats and travertines of the Khoito-Gol thermal spring (East Sayan) *Russ. Geol. Geophys.*, 2017, vol. 1, pp. 60–73. In Rus.
- Wang W., Xu C., Jin Y., Zhang Z., Yan R., Zhu D. The accumulation of rare-earth yttrium ions by *Penicillium* sp ZD 28. *AMB Express*, 2020, vol. 25, no. 10, pp. 1–11.
- Horiike T., Yamashita M. A new fungal isolate, *Penidiella* sp strain T9, accumulates the rare earth element Dysprosium. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2015, vol. 81, no. 9, pp. 3062–3068.
- Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. The accumulation of La, Ce and Y by *Lemna minor* and *Lemna gibba* in the Keban gallery water, Elazig Turkey. *Water and environment journal*, 2018, vol. 32, pp. 75–83.
- Sasmaz M., Senel G., Obek E. Boron bioaccumulation by the dominant macrophytes grown in various discharge water environment. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2021, vol. 106, pp. 1050–1058. DOI: 10.1007/s00128-021-03222-7.
- Kashkak E. S., Khakhinov V. V., Danilova E. V., Oorzhak U. S., Dagurova O. P. Chemical component depositions in the microbial mats and travertine in the Khoito-Gol thermal spring (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 908, no. 012004.
- Douglas S., Beveridge T. J. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities. *FEMS microbiology ecology*, 1998, vol. 26, pp. 78–88.
- Hoffmann T. D., Reeksting B. J., Gebhard S. Bacteria-induced mineral precipitation: a mechanistic review. *Microbiology*, 2021, vol. 167, no. 4, pp. 1–13.
- Porta G. D., Hoppert M., Hallmann C. The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy). *The Depositional record*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 165–209.
- Kharitonova N. A., Lyamina L. A., Chelnokov G. A., Bragin I. V., Karabtsov A. A., Tarasenko I. A., Nakamura H., Iwamori H. Chemical and isotopic composition of nitrogen thermal waters of the

- Kuldur deposit (JSC, Russia). *Moscow University Bulletin. Ser. 4 Geology*, 2020, no. 5, pp. 77–91. In Rus.
12. Kompanichenko V.N., Poturai V.A. Variations in the composition of organic matter in the waters of the Kuldur geothermal field (Far East of Russia). *Pacific Geology*, 2015, no. 4, pp. 96–107. In Rus.
 13. Kalitina E.G., Kharitonova N.A., Vakh E.A. Rasprostraneniye bakterii razlichnykh ekologo-troficheskikh grupp v podzemnykh termalnykh vodakh Kuldurskogo mestorozhdeniya (Dalnii Vostok Rossii) [Distribution of bacteria of various ecological and trophic groups in underground thermal waters of the Kuldurskoye deposit (Far East of Russia)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 5, p. 351.
 14. Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. *Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov* [Methods for studying aquatic microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 288 p.
 15. Kastanek P., Kastanek F., Kronusova O., Branyikova I. Selective bioaccumulation of rubidium by microalgae from industrial wastewater containing rubidium and lithium. *Journal of applied phycology*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 461–467.
 16. Lebedeva E.G., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A. Microorganisms of various ecological-trophic groups in the saline ground waters of Primorsky Region (distribution, number, participation in accumulation of microelements). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, no. 020061.
 17. Maimulyati A., Prihadi A.R., Nurhidayati I. Adsorption of cobalt ion from aqueous solution using biomaterial of microalgae *Oscillatoria* sp isolated from Teluk Jakarta. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 7–12.
 18. Takahashi Y., Chatellier X., Hattori K., Kato K., Fortin D. Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for REE sorption onto natural microbial mats. *Chemical geology*, 2005, vol. 219, pp. 53–67.
 19. Takahashi Y., Hirata T., Shimizu H., Ozaki T., Fortin D. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? *Chemical geology*, 2008, vol. 244, pp. 569–583.
 20. Kazak E.S., Kalitina E.G., Kharitonova, N.A., Chelnokov G.A., Elovskii E.V., Bragin I.V. Biosorption of rare-earth elements and yttrium by heterotrophic bacteria in an aqueous environment. *Moscow University geology bulletin*, 2018, vol. 73, no. 3, pp. 287–294.
 21. Yu Y.Q., Luo H.Q., Tang W.Y., Yu C.P., Lu L., Li J.W., Yang J.Y. Mechanism of vanadium (IV) resistance of the strains isolated from a vanadium titanomagnetite mining region. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2020, vol. 195, no. 1, pp. 110463.
 22. Lukyanova E.A., Zakharova E.V., Konstantinova L.I., Nazina T.N. Sorbtsiya radionukleidov mikroorganizmami iz glubinnogo khranilishcha zhidkikh nizkoaktivnykh otkhodov [Sorption of radionuclides by microorganisms from a deep storage of liquid low-level wastes]. *Radiochemistry*, 2008, vol. 50, pp. 75–80.
 23. Maksimova E.A., Popova T.G., Popova N.N., Safulina A.M., Tanaev I.G. Biosorbtsiya ^{99}Tc i ^{238}U odnokletochnymi zelenymi vodoroslyami *Scenedesmus quadricauda* [Biosorption of ^{99}Tc and ^{238}U by unicellular green algae *Scenedesmus quadricauda*]. *Bulletin of RUDN University, series Ecology and life safety*, 2008, no. 2, pp. 85–92.
 24. Lopez-Fernandez M., Jroundi F., Ruiz-Fresnedo M., Merroun M. Microbial interaction with and tolerance of radionuclides: underlying mechanisms and biotechnological applications. *Microbial Biotechnology*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 810–828.
 25. Nakajima A. Competitive biosorption of thorium and uranium by *Micrococcus luteus*. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2004, vol. 260, pp. 13–18.
 26. Inagak F., Motomura X., Ogata S. Microbial silica deposition in geothermal hot waters *Applied microbiology and biotechnology*, 2003, vol. 60, pp. 605–611.
 27. Ikeda T. Bacterial biosilicification: a new insight into the global silicon cycle. *Bioscience, biotechnology and biochemistry*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 1324–1331.
 28. Fomina M., Skorochod I. Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–54. DOI: 10.3390/min10100861.
 29. Dupraz C., Braissant O., Decho A., Norman R.S., Visscher P., Reid R.P. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-science reviews*, 2009, vol. 96, no. 3, pp. 141–162.
 30. Arias D., Cisternas L.A., Rivas M. Biomineralization mediated by ureolytic bacteria applied to water treatment: a review. *Crystals*, 2017, vol. 11, no. 7, p. 345. DOI: 10.3390/cryst7110345

Received: 2 August 2022.

Reviewed: 20 September 2022.

Information about the authors

Elena G. Lebedeva, Cand. Sc., senior researcher, Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Natalya A. Kharitonova, Dr. Sc., professor, Moscow State University named M.V. Lomonosov.

Ivan V. Bragin, Cand. Sc., head of laboratory, Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Tatyana V. Kuzmina, Cand. Sc., senior researcher, Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.