

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 554.7+559

DOI: 10.15372/KZ20210202

ТЕРМАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НА ПОЛЮСЕ ХОЛОДА
(ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ)

В.Н. Макаров, В.Б. Спектор

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; vnmakarov@mpi.ysn.ru*

Приведены новые данные о геохимии воды термального источника Сытыган-Сылба, расположенного в зоне вечной мерзлоты на северо-востоке Якутии. Впервые получены сведения о содержании в этих водах редких и рассеянных элементов, элементов редкоземельной группы, изотопов кислорода и водорода. Подземные воды источника относятся к слабоминерализованным кремнистым термам глубинного происхождения, имеющим сезонное питание за счет поступления более минерализованных надмерзлотных вод. Круглогодичное функционирование термального источника в зоне сплошной многолетней мерзлоты мощностью 300–500 м связано с высоким тепловым потоком в области подъема аномальной мантии. Геохимические характеристики термальных вод источника (повышенная концентрация сульфатов, аномальное содержание Ge, Mo, W, As и других элементов) могут быть признаками ореольных вод, близкого присутствия рудных скоплений.

Гидрогеохимия, изотопы, источник Сытыган-Сылба, мерзлота, микроэлементы, редкоземельные элементы, северо-восток Якутии, термальные воды

THERMAL SPRING AT THE POLE OF COLD
(EASTERN YAKUTIA)

V.N. Makarov, V.B. Spektor

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; vnmakarov@mpi.ysn.ru*

The work reports on new data on geochemistry of water of the Sytygan-Sylba Thermal Spring located in the permafrost zone in the northeast of Yakutia. Data on the content of rare and trace elements, elements of a rare-earth group, oxygen and hydrogen isotopes in the studied waters have been obtained for the first time. Groundwaters of the spring are classified as low-mineralized siliceous thermal waters of the deep origin, which are seasonally fed due to the inflow of more mineralized suprapermafrost waters. The year-round activity of the thermal spring in the zone of continuous permafrost 300–500 m thick is associated with the significant heat flow in the anomalous mantle uplift zone. Geochemical signs of the thermal water of the spring involve an increased concentration of sulfates, anomalous contents of Ge, Mo, W, As and other elements, which may be indicators of halo waters and proximity of ore accumulations.

Hydrogeochemistry, isotopes, Sytygan-Sylba Spring, permafrost, trace elements, rare earth elements, Northeast of Yakutia, thermal waters

ВВЕДЕНИЕ

Проявления термальных вод в области распространения мощной толщи многолетнемерзлых пород, локализованных на Северо-Востоке России, давно привлекают внимание специалистов [Обручев, 1927, 1954; Швецов, 1951], однако вследствие отдаленности и труднодоступности территории остаются слабоизученными. Источник Сытыган-Сылба – единственный теплый ключ в Восточной Якутии. Он знаменит уже тем, что находится вблизи полюса холода, в 80 км к югу от с. Оймякон.

Топоним “Сытыган-Сылба” переводится с якутского, как *гнилая (тухлая) медленно текущая (вода)*. Первоначальное же название (эвенское) почти позабыто: *Хуксичан* (эв. *Луksичан*), т. е. горячий. Вода здесь действительно теплая и зимой, и летом.

Источник Сытыган-Сылба был открыт в 1926 г. геологом С.В. Обручевым, выполнившим первое описание источника и сделавшим химический анализ минеральной воды [Обручев, 1927].

По своему местоположению, физической природе и составу воды к источнику Сытыган-Сылба наиболее близко Тальское месторождение термальных вод, которое находится в 400 км восточнее, на территории Магаданской области. На базе этого месторождения работает бальнеологический курорт Талая [Гидрогеология..., 1972; Шенелев, 1987].

Основная цель работы – изучение геологических, гидрогеологических и мерзлотных условий района выхода термальных вод, их химического состава. Впервые были получены данные о содержании в исследуемых водах редких и рассеянных элементов, изотопов кислорода и водорода, элементов редкоземельной группы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы воды источника Сытыган-Сылба были отобраны 17 февраля 2018 г. Химические анализы выполнены в аналитических подразделениях Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН и Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (ИПТМ) РАН. В ИМЗ СО РАН был проведен полный химический анализ проб воды методом капиллярного электрофореза. Концентрации микрокомпонентов, рассеянных и редкоземельных элементов определены с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Х-7, Thermo Elemental, США) и атомно-эмиссионных методов в Аналитическом сертификационном испытательном центре (АСИЦ) ИПТМ РАН. Для большинства химических элементов были обеспечены устойчиво воспроизводимые геохимические данные, полученные с помощью анализа субкларковой чувствительности, т. е. при пределах обнаружения, близких к кларку элемента в анализируемой среде.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Зимой источник представляет собой небольшой ручеек, вытекающий из-под снежно-ледового купола, сформированного над выходом воды от испарений. В 15–20 м от снежного купола вода охлаждается, образуя наледь размером около 50 × 200 м с толщиной льда 1.0–1.2 м. Объем наледи, по данным В.Ф. Шишкиной, производившей геологосъемочные работы в районе источника в 1960 г., составляет 4000 м³, площадь 10 000 м². Окружающие долину стволы деревьев несут следы механического и химического воздействия льда наледи.

Источник Сытыган-Сылба (62°45'39.5" с.ш., 144°13'55.5" в.д.) находится в Оймяконском районе Республики Саха (Якутия) РФ в 8 км к западу от озера Алысардах, на высоте около 1050 м над уровнем моря (рис. 1).

Источник расположен у подножия увала высотой около 2 м. Вода вытекает из небольшой воронки (диаметром около 0.3 м и глубиной 0.2 м), вымытой в рыхлых отложениях. Температура непосредственно на выходе в разные периоды года, даже в самую холодную в Северном полушарии оймьяконскую зиму, изменяется от 24.5 до 26.6 °С. Характерно постоянство расхода воды источника, дебит которого около 0.25 л/с. В летнее время ручеек, образованный источником, имеет широкую (более 50 м) долину, что связано с формированием в зимний период наледи. Ниже по склону располагается небольшое озеро, размером 2 × 3 м, не замерзающее круглый год. Далее, в 30–40 м по уклону, сформировалось озеро диаметром около 10 м. В нем происходит накопление минеральной грязи, для которой характерен черный цвет у поверхности, с глубиной переходящий в серый [Черепанова, 1988].

Источник Сытыган-Сылба расположен в южной части Оймяконского нагорья, являющегося частью протяженного (около 1200 км) и широкого (около 300 км) пояса относительно выровненного сниженного рельефа, которое можно назвать Яно-Индигирским междугорьем. Особенности морфоструктуры междугорья заключаются в преобладании здесь плато и плоскогорий, занимающих центральную часть Верхояно-Колымской горной системы между ее высокогорными сооружениями – хребтами Черского и Верхоянским. Вершинная поверхность в пределах междугорья в среднем располагается на высоте около 1000 м, в то время как на обрамляющих ее хребтах она поднимается до высот 2000–2500 м, иногда достигая отметок около 3000 м. Вероятно, наиболее значительное количество воды проникает в недра в пределах этой части хребтов, и существующие здесь геологические, геоморфологические и отчасти климатические условия определяют ресурсы, изотопный и в определенной мере химический состав гидротерм.

Наблюдаемый ныне рельеф был сформирован в течение позднего кайнозоя (плиоцен–квартер) после длительного (палеоген–миоцен) спокойного (квазиэлитного) этапа, в течение которого преобладали выравнивание рельефа и накопление маломощных континентальных угленосных отложений [Зоненшайн, Савостин, 1979; Спектор, 1987].

Речная сеть Оймяконья принадлежит бассейнам рек верхнего течения р. Индигирка, берущим начало в хр. Сунтар-Хаята. Большую роль в ледовом режиме рек и перераспределении стока играют широко распространенные в речных долинах наледи, обязанные своим происхождением речным и напорным подмерзлотным водам.

Геологическое строение района местоположения источника свидетельствует о его длительной и многоэтапной истории, которая частично отраже-

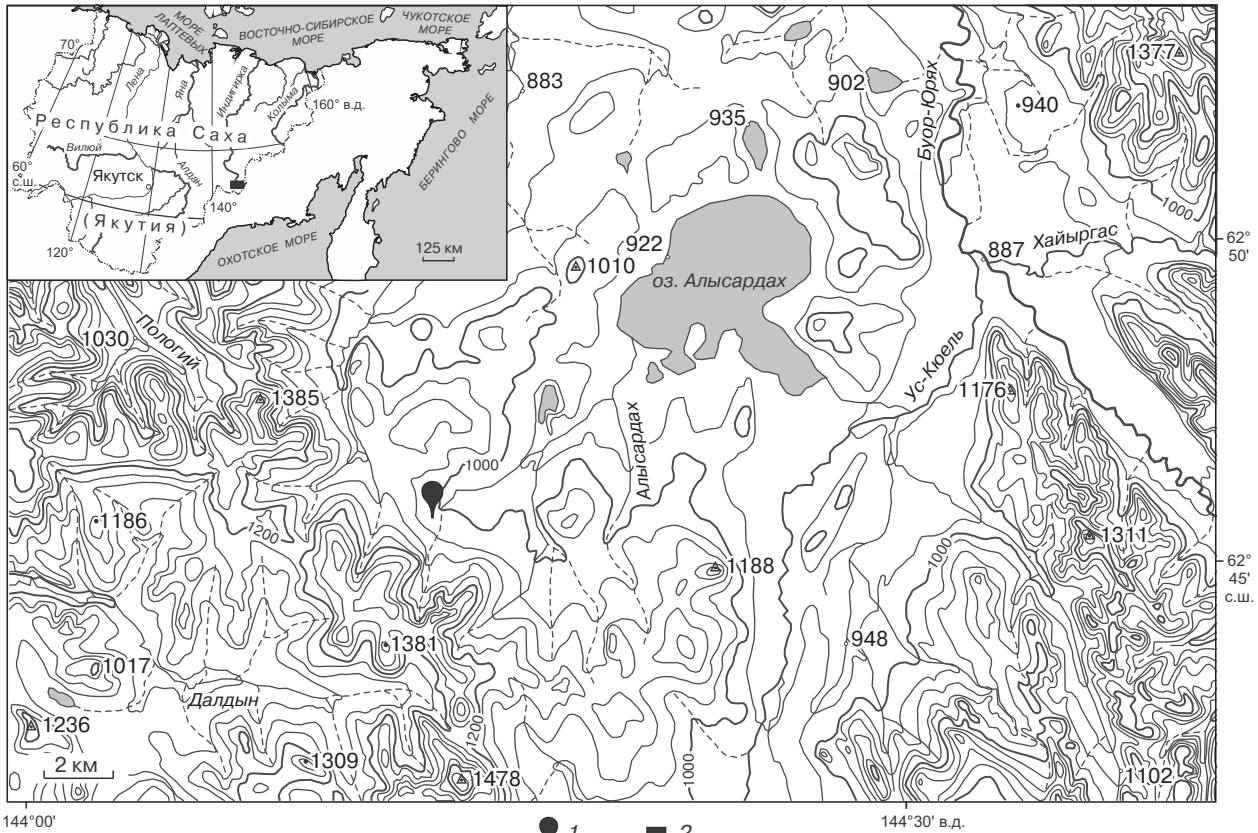


Рис. 1. Обзорная карта района источника Сытыган-Сылба.

1 – местоположение источника Сытыган-Сылба; 2 – участок исследований на карте-врезке.

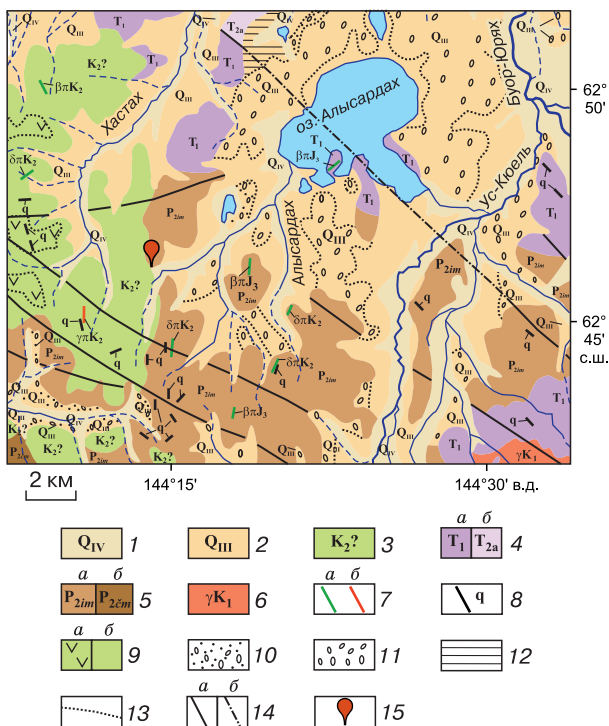


Рис. 2. Обзорная геологическая карта района расположения источника (м-б 1:200 000. Лист P55-VII).

1, 2 – комплекс четвертичных отложений (1 – голоцен, аллювиальные отложения; 2 – поздний неоплейстоцен, аллювиальные отложения); 3 – позднемеловой окраинно-континентальный вулканогенный комплекс; 4, 5 – позднепалеозойский–мезозойский верхоянский терригенный комплекс пассивной континентальной окраины (4 – триасовые отложения: а – нижнетриасовые, б – среднетриасовые отложения, анизийский ярус; 5 – верхнепермские отложения: а – имтачанская свита, б – чамбинская свита); 6 – раннемеловые гранитные батолиты, протооргенный комплекс; 7 – дайки (а – порфировитов основного и среднего состава, б – гранитоидного состава); 8 – гидротермальные кварцевые жилы (q); 9 – состав позднемелового вулканогенного комплекса (а – породы среднего состава, б – породы кислого состава); 10–12 – генетические типы отложений позднего неоплейстоцена (10 – водно-ледниковые, 11 – ледниковые, 12 – озерные); 13 – фациальные границы; 14 – разломы (а – установленные, б – предполагаемые); 15 – местоположение источника Сытыган-Сылба.

на выходящими на поверхность структурно-вещественными комплексами (рис. 2) [Государственная... карта..., 1972]. Наиболее древним из них является верхоянский комплекс, представленный в рассматриваемом районе морскими терригенными породами пермского и триасового возраста, дислоцированными в конце мезозоя на линейные складки северо-западного простирания. Более высокое стратиграфическое положение занимают вулканические слабодислоцированные меловые породы среднего и кислого состава, которые относятся к окраинно-континентальному Охотско-Чукотскому вулканическому поясу. К этому же времени относится формирование крупных гранитных массивов, выходы которых расположены в 5–10 км от источника. Завершают разрез четвертичные отложения, представленные галечниками, валунниками, песками, суглинками ледникового, аллювиального и склонового генезиса. Источник приурочен к склону увала, сложенного меловыми вулканитами и верхоянским комплексом.

Верхоянский комплекс и позднемезозойские вулканические и магматические породы являются многолетнемерзлыми эпикриогенными. Четвертичные отложения относятся к синкриогенным образованиям. Формирование многолетнемерзлых пород в пределах Яно-Индибирского междугорья и обрамляющих его хребтов относится к концу плиоцена – началу квартера.

Местонахождение источника уникально. Структурное положение рассматриваемой площади обусловило высокую современную тектоническую активность и сейсмичность. В очагах землетрясений на глубинах первых десятков километров реконструированы горизонтально ориентированные сжимающие напряжения.

По модели, предложенной В.Т. Балобаевым [1991], Верхояно-Колымская система характеризуется средневзвешенным значением внутриземного теплового потока 65 мВт/м^2 , что в 2 раза выше, чем в пределах Сибирской платформы. Учитывая небольшую мощность континентальной литосферы и гранитного слоя коры этой области, В.Т. Балобаев приходит к выводу, что увеличение фонового потока происходит за счет высокого потока тепла из мантии. Наиболее высокие значения теплового потока (от 80 до 100 мВт/м^2) приходятся на территорию Яно-Оймяконского междугорья. По мнению В.Т. Балобаева [1991], это "...может быть аномальная мантия астеносферного типа, появление которой приводит к частичному плавлению земной коры, преобразованию ее минералогического состава, образованию депрессий и заполнению их осадками" (с. 135).

Источник относится к повышенному типу теплового режима термальных вод с плотностью теплового потока $80\text{--}100 \text{ мВт/м}^2$. При таком тепловом потоке на глубине 40 км температура пре-

вышает $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ [Балобаев, 1991, с. 137]. Геотермический градиент (значение увеличения температуры с глубиной, обычно на глубину 1 км или 100 м) оценивается в $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C/км}$. Существование термального источника, относительно высокая температура воды ($+26.6 \text{ }^\circ\text{C}$), его круглогодичное функционирование в поле сплошной многолетней мерзлоты мощностью 300–500 м со среднегодовой температурой пород $-3\text{...}-5 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже [Геокриологическая карта..., 1991] объясняется авторами его расположением над центральной частью выступа аномальной мантии и сопровождающим этот выступ высоким тепловым потоком. Подобная геотермическая аномалия должна формировать обширную гидрогеогенную таликовую зону. Косвенным свидетельством существования такой зоны может быть необычная для поверхностных вод региона относительно минерализованная вода крупного озера Алысардах, расположенного вблизи выхода термальных вод.

В гидрогеологическом плане район выхода подземных вод относится к Алысардахскому криогеологическому межгорному артезианскому бассейну Яно-Колымского крионапорного бассейна и приурочен к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород, мощность которых превышает мощность рыхлого чехла бассейна. Сильная тектоническая раздробленность пород и наличие крупных тектонических разломов определили широкое распространение на территории подмерзлотных трещинно-жильных вод и наледей, связанных с локальными выходами подземных вод.

Геолого-структурные особенности района определяют гидрогеологические условия участка разгрузки термальных вод. По условиям залегания и циркуляции – это трещинно-жильные термальные воды, которые приурочены к зоне активных разломов широтного простирания в месте сочленения их с нарушениями север-северо-западного простирания [Парфенов, 2001].

В рассматриваемом районе термальный минеральный источник Сытыган-Сылба – единственный в своем роде. Но, возможно, выходы термальных вод в верховьях р. Индигирка имеют более широкое распространение, и Сытыган-Сылба не единственный источник термальных вод в пределах Яно-Оймяконского междугорья [Швецов, 1951]. По данным авторов, к северу от него в этой же морфоструктурной зоне известны "теплые" озера, а еще севернее (за полярным кругом) находятся выходы субтермальных вод в районе хр. Кулар.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты химических анализов воды источника, полученные разными исследователями с 1926 по 2018 г., приведены в табл. 1. Данные

Таблица 1. Химический состав термальных вод источника Сытыган-Сылба

Показатель	Дата отбора проб				
	10–16.11.1926 [Обручев, 1927]	02.04.1948 [Швецов, 1951]	28.07.1984 [Черепанова, 1988]	14.04.2013 [Трофимова, 2013]	17.02.2018 (данные авторов: В.Н. Макаров, В.Б. Спектор, Р.Н. Иванова)
Дебит, л/с	0.20	0.25	–	0.25–0.30	–
Температура воды, °С	+26.0	+25.6	+26.6	+25.1	+24.5
Температура воздуха, °С	–40.0	–11.5	–	–	–
pH	–	–	8.2	9.5	8.48
Eh, мВ	–	–	250	–	386
Минерализация, мг/л	483.1	396.6	513	439	436.8
Содержание*					
Ca ²⁺	7.7/0.38	1.0/0.03	4.0/0.20	8.0/0.8	7.76/0.39
Mg ²⁺	0.2/0.02	6.0/0.47	3.0/0.25	2.24/0.2	1.43/0.12
Na ⁺	186.4/7.90	140.0/6.10	195.5/8.50	179.4/7.8	158.2/6.09
K ⁺	186.4/7.90	140.0/6.10	8.0/0.20	179.4/7.8	4.20/0.13
CO ₃ ²⁻	–	–	–	–	4.65/0.15
HCO ₃ ⁻	108.6/1.78	57.2/0.95	85.0/1.39	103.7/1.7	86.22/1.41
Cl ⁻	142.5/4.02	141.0/4.00	150.0/4.23	149.1/1.7	134.99/3.81
SO ₄ ²⁻	94.0/1.96	80.0/1.65	110.0/2.29	48.0/1.0	82.32/1.71
SiO ₂ ⁻	20.6	–	81.0	–	65.3
NO ₃ ⁻	–	–	–	–	0.10
NO ₂ ⁻	–	–	2.0	–	0.12
NH ₄ ⁺	–	–	–	–	0.05
HPO ₄ ⁻	–	–	–	–	0.12
CO ₂	–	48.4	–	66.0	–
H ₂ S	–	0.45	–	9.22	–
Fe ³⁺	–	0.24	–	0.12 (Fe)	0.056 (Fe)

* В числителе – мг/л, в знаменателе – мг-экв.

табл. 1 показывают, что химический состав вод источника Сытыган-Сылба остается стабильным в течение почти столетнего периода наблюдений. Это смешанные по составу анионы воды с резким преобладанием натрия: гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридные натриевые, слабощелочные (pH 8.2–8.48), с повышенным содержанием кремния 21–81 мг/л (около 10 % от суммы всех растворенных в воде веществ), обладающие невысокой минерализацией (0.40–0.51 г/л):

(17.02.2018 г.)

$$M \ 0.437 \frac{Cl \ 54 \ SO_4 \ 24 (HCO_3 + CO_3) \ 22}{Na \ 90 \ Ca \ 6 \ K \ 2 \ Mg \ 2}$$

pH 8.48 Eh 0.386 SiO₂ 30 F 19.6.

Геохимическая обстановка – окислительная (Eh = 0.25–0.38 В). Вода слабо газирует, содержание CO₂ – 48.4 мг/л, H₂S – 0.45 мг/л. Характерная черта источников – относительно постоянная температура воды (24.5–26.6 °С) в холодное и теплое время года. Невысокая минерализация термальных вод источника Сытыган-Сылба объясняется

их формированием в терригенных породах, хорошо отмытых интенсивной циркуляцией подземных вод от водорастворимых солей.

Основными компонентами, обеспечивающими минерализацию воды источника, являются натрий, кремний, фтор, хлориды, сульфаты и гидрокарбонаты. Среди анионов преобладает Cl⁻ (48–61 %-экв.). Помимо хлоридного иона в достаточном количестве присутствуют сульфаты (до 110 мг/л) и гидрокарбонаты (до 109 мг/л). Среди катионов преобладает Na⁺ (92–95 %-экв.), концентрация которого достигает 195 мг/л. Содержание (мг/л) других катионов низкие: K⁺ не более 8.0, Ca²⁺ до 5.8, Mg²⁺ до 3.0. Исследуемые термы богаты фтором, концентрация которого составляет 19.6 мг/л. Содержание F аналогично его содержанию в термах Тальского источника (15–20 мг/л), локализованных в Магаданской области [Гидрогеология..., 1972]. Благоприятные условия для повышенной активности фтора и накопления его в воде создает и низкая активность кальция.

Наблюдаются определенные изменения в химическом составе воды источника в разные месяцы: июль, ноябрь, февраль, апрель (рис. 3). Для

сравнения были использованы данные, полученные в разные годы, поскольку единого годового цикла наблюдений не проводилось. В апреле, в конце зимы (при максимальном промерзании деятельного слоя), химический состав воды источника должен в полной мере соответствовать составу глубинных термальных вод. В этот период по мере движения к поверхности через толщу мерзлых пород термальные воды источника Сытыган-Сылба не имеют поверхностного питания и не разбавляются перемерзающими надмерзлотными водами. В зимнее время в источнике сохраняется положительная температура воды на выходе, однако наблюдается устойчивое снижение минерализации воды за счет уменьшения концентрации ионов Na^+ и SO_4^{2-} (см. рис. 3).

В теплое время года вместо опреснения источника, понижения минерализации и увеличения роли гидрокарбонатов в химическом составе воды за счет поступления менее минерализованных вод зоны свободного водообмена наблюдается обратная картина. В воде источника Сытыган-Сылба в летнее время существенно повышается минерализация (на 50–100 мг/л) за счет сульфатов и хлоридов натрия (см. рис. 3). Содержание ионов Na^+ и SO_4^{2-} увеличивается в июле примерно на 30 % по сравнению с апрелем, когда надмерзлотные воды подвержены максимальному зимнему промерзанию. Очевидно, что в теплое время года к источнику происходит подток надмерзлотных вод с более высокой минерализацией. Поверхностные очень пресные гидрокарбонатные воды не влияют на химический состав воды источника.

В 2018 г. авторами были получены новые данные о химическом составе термальных вод источника. Повышенные концентрации в термальном источнике характерны для стронция – 0.16 мг/л, лития – 1.39 мг/л, фтора – 19.6 мг/л.

Среди сидерофильной группы элементов значимой концентрацией в водах обладают только железо и молибден. Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в термальных водах источника Сытыган-Сылба колеблется в пределах 56–240 мкг/л, молибдена – 0.443 мкг/л. Концентрация (мкг/л) других сидерофилов ниже чувствительности анализа: Co, Ni < 0.001; Pd, Rh, Au < 0.001; Re, Os, Ir, Pt, Ru < 0.001 ($n = 1-9$). В частности, содержания (мкг/л): Co < 0.2, Ni < 0.2, Pd < 0.014, Rh < 0.012, Au < 0.014; Re < 0.001, Os < 0.001, Ir < 0.001, Pt < 0.002, Ru < 0.008. Концентрация кремния 30.48 мкг/л, фосфора менее 30 мкг/л.

Среди литофильных элементов высокое содержание (> n , мкг/л) установлено у Li (1390–2050), Vg (275), Sr (160–212), Al (24.9), Mn (3.1), В (1.68) и Ва (1.1). Содержание (мкг/л) других

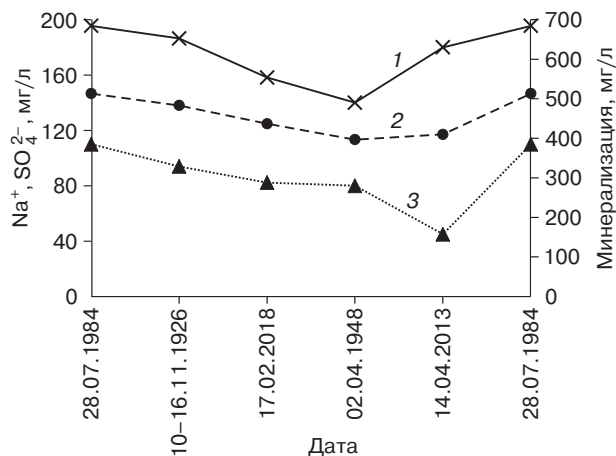


Рис. 3. Изменение минерализации (2) и содержания Na^+ (1) и SO_4^{2-} (3) в воде источника Сытыган-Сылба по месяцам в разные годы.

литофилов в пределах $0.n-0.00n$: W (0.715), V (0.17), Cs (0.088), Rb (0.085), Be (0.048), Zr (0.038), Th (0.008), U (0.008), Hf (0.007). Отношение $\text{B}/\text{Cl} = 1.24 \cdot 10^{-5}$, что практически на 4 порядка меньше, чем в морской воде, и близко к этому показателю (< 0.007) в термальных источниках областей активного вулканизма.

В группе халькофильных элементов особого внимания заслуживают галлий, цинк, мышьяк, германий, свинец и сурьма, с концентрациями (мкг/л) в пределах $n-0.n$: Ga (1.8), Zn (1.2), As (0.85), Ge (0.762), Pb (0.14), Sb (0.105). Содержание меди в изученных термальных водах менее 0.7 мкг/л, титана – менее 1 мкг/л. Ниже чувствительности анализа концентрации (мкг/л): Se < 5; Hg < 0.7; Sc < 0.3; Sn < 0.022; Te < 0.018; Ag < 0.01; Cd < 0.009; Nb < 0.008; In < 0.005; Ta < 0.003; Te < 0.001; Bi < 0.001*.

Геохимические характеристики термальных вод источника – присутствие сульфатов и аномальное содержание рудных элементов (германия, молибдена, вольфрама, мышьяка и др.) – могут быть признаками ореольных вод, близкого присутствия рудных скопления [Макаров, 1998].

Авторами впервые получены данные по содержанию редкоземельных элементов (РЗЭ) и иттрия в исследуемых термальных водах (табл. 2). Концентрация РЗЭ в целом низкая ($\geq 0.0n$, мкг/л). Спектр распределения РЗЭ, нормированных по NASC, характеризуется повышенным содержанием легких (более 80 %), умеренно обогащен средними и обеднен тяжелыми РЗЭ. Столь небольшая концентрация РЗЭ в водах может быть обусловлена щелочными значениями pH термальных вод, контролирующими содержание РЗЭ в

* Масс-спектральный и атомно-эмиссионный анализы выполнены в АСИЦ ИПТМ РАН (г. Черноголовка).

Таблица 2. Концентрация редкоземельных элементов в термальных водах источника Сытыган-Сылба

Элемент	Содержание РЗЭ		Элемент	Содержание РЗЭ	
	мкг/л	нормированное по NASC		мкг/л	нормированное по NASC
La	0.0165	$5.3 \cdot 10^{-7}$	Tb	0.00086	$1.0 \cdot 10^{-6}$
Ce	0.0501	$7.5 \cdot 10^{-7}$	Dy	0.006	$1.2 \cdot 10^{-6}$
Pr	0.004	$5.4 \cdot 10^{-7}$	Ho	<0.0008	–
Nd	0.0215	$7.8 \cdot 10^{-7}$	Er	0.0019	$5.3 \cdot 10^{-7}$
Sm	0.0049	$8.8 \cdot 10^{-7}$	Tm	<0.0008	–
Eu	0.0023	$1.9 \cdot 10^{-6}$	Yb	<0.0008	–
Gd	0.0086	$1.7 \cdot 10^{-6}$	Lu	<0.0008	–

Примечание. Масс-спектральный и атомно-эмиссионный анализы выполнены в АСИЦ ИПТМ РАН (г. Черноголовка).

воде и определяющими уменьшение количества РЗЭ [Sholkovitz, 1995].

Отмечается слабая цериевая и выраженная европиевая аномалии. Тетрадный эффект незначим. Подобная картина распределения РЗЭ с ярко выраженной Eu-аномалией типична для гидротермальных растворов [Дубинин, 2006; Haas et al., 1995]. Высокая положительная аномалия Eu может быть косвенным признаком термального воздействия в процессе формирования жидкой фазы, хотя нельзя исключить возможность того, что обогащение европием происходило при диагенезе морских отложений в анаэробных условиях [Иванова, 2020].

Сходство состава РЗЭ в воде источника с песчаниками и алевролитами верхоянского комплекса позволяет говорить об унаследованности их состава, в частности, по значимости количеству легких РЗЭ и европиевой аномалии. Отсутствие тяжелых РЗЭ может быть связано с наличием геохимического барьера (влияние надмерзлотных вод, хемосорбция на глинистых минералах) при разгрузке.

Такие характеристики спектра РЗЭ, а также анионный состав и низкие содержания макроком-

понентов указывают на расположение источника в зоне разгрузки трещинных вод.

О связи термального источника с надмерзлотными и поверхностными водами можно судить по сопоставлению спектра РЗЭ воды источника и образцов повторно-жильных льдов (ПЖЛ), пластового льда и речной воды, полученных в Восточной Якутии [Иванова, 2020], нормированных по стандарту NASC (рис. 4) [Gromet et al., 1984].

Однако данных о распределении РЗЭ в компонентах зоны гипергенеза в регионе практически не имеется. Поэтому при интерпретации полученных данных были использованы результаты исследований В.В. Ивановой в бассейне р. Адыча [Иванова, 2020]. В этом районе, как и вблизи источника, широко распространены терригенные отложения и гранитоиды, для них характерна идентичность химического состава атмосферных осадков [Макаров, 2014]. Эти данные позволяют предполагать близкие условия формирования химического состава природных вод зоны гипергенеза.

Спектр РЗЭ повторно-жильных и пластовых льдов отражает химический состав проникающих в лед почвенных растворов из надмерзлотной вер-

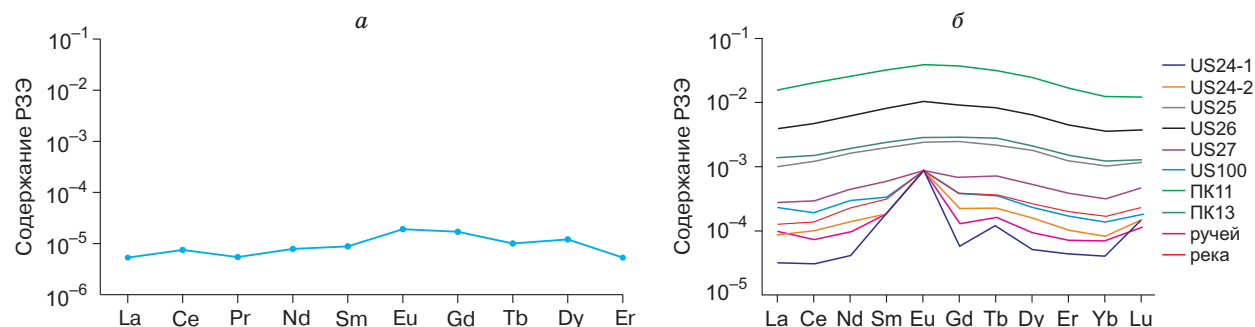


Рис. 4. Спектры содержаний РЗЭ, нормированных по NASC.

а – в воде источника Сытыган-Сылба; б – в подземных льдах (US: 24–27, 100; ПК: 11, 13) и поверхностных водах (ручей, р. Адыча).

холодки. Положительная европиевая аномалия льдов связана с составом грунтовых вод, увеличением концентраций химических элементов в результате концентрирования (криогенного или рудного). Значительно более низкое содержание РЗЭ в воде источника Сытыган-Сылба по сравнению с их содержанием в речной воде и ПЖЛ (см. рис. 4) указывает на то, что источник расположен в зоне разгрузки подземных вод, мало связанных с фоновыми поверхностными водами и подземными льдами.

Об очень слабом (практически нулевом) разбавлении воды источника Сытыган-Сылба поверхностными и надмерзлотными водами свидетельствует и существенное повышение минерализации и содержания Na^+ и SO_4^{2-} в воде источника в летнее время (см. рис. 3).

Впервые получены данные о величине изотопов кислорода и водорода в воде источника. Изотопный анализ проведен в ИМЗ СО РАН на анализаторе Picarro L2140-i Isotope and Gas Concentration Analyze (аналитики Н.И. Лыхота и Г.Т. Максимов), который позволяет одновременно измерять $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ и δD в твердых веществах, жидкостях и парах. Характеристика изотопного состава кислорода и водорода атмосферных осадков и воды термального источника приведена в табл. 3. Расчетное значение метеорных вод $\delta\text{D} = a \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$. Подставив значение $^{18}\text{O} = -21 \text{‰}$ для дождевых вод (см. табл. 3), получим $\delta\text{D} = -178 \text{‰}$, фактически в настоящее время равно -169‰ . Некоторое обогащение современных метеорных вод тяжелым водородом может происходить в результате увеличения роли осадков за счет близко расположенных источников испарения (Тихий океан).

В воде источника $\delta\text{D} = -179.31 \text{‰}$, что близко к расчетным показателям атмосферных осадков. Они отражают состав атмосферных осадков за длительный период, предшествующий современному, когда преобладал атлантический перенос. Об этом свидетельствует понижение дейтерия в водах источника, который теряется в ходе переноса атмосферной влаги на дальнее расстояние. В летнее время выпадает небольшое количество осадков, обогащенных тяжелым водородом, которые расходятся главным образом на ускоренное испарение.

С точки зрения бальнеологии, использование теплых (субтермальных) вод источника возможно в качестве лечебных, смешанных по анионам натриевых вод по аналогии с термальной водой Тальского месторождения. Наличие в воде таких бальнеологических компонентов, как фтор, метакремниевая кислота, редкие элементы, многие из которых являются биологически активными компонентами, позволяет рекомендовать воды ис-

Таблица 3. Изотопный состав кислорода и водорода атмосферных осадков и воды термального источника

Природные воды	$\delta^{18}\text{O}$	δD
Атмосферные осадки, март–июнь	-21...-23	-160...-169
Источник	-20.89	-179.31
Снег, март (район с. Оймякон)	-37.44	-
	-38.08	-
SMOW, ‰	-0.1985	-0.01985

Примечание. Изотопный анализ проведен в ИМЗ СО РАН (анализатор Picarro L2140-i Isotope and Gas Concentration Analyze).

точника Сытыган-Сылба для наружного лечебно-профилактического применения в виде ванн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почти столетний период наблюдений показывает, что воды, нагретые в трещиноватых триасовых терригенных отложениях до $26 \text{ }^\circ\text{C}$, не претерпевают значительных температурных колебаний и изменения химического состава. Характерными особенностями азотных термальных вод источника Сытыган-Сылба являются: низкая минерализация ($0.4\text{--}0.5 \text{ г/л}$), сложный анионный состав, господство натрия в катионном составе, слабощелочная реакция, преобладание в газовом составе азота, значительные концентрации кремнекислоты, фтора, вольфрама, молибдена, германия, мышьяка и др. Отличительной особенностью термальных вод источника Сытыган-Сылба является присутствие в ионном составе сульфатов.

Установлены очень низкие (нг/л) содержания РЗЭ в воде источника Сытыган-Сылба. По уровню содержаний РЗЭ и соотношению со спектрами речных вод и подземных льдов – это термальные воды зоны разгрузки подземных вод, мало связанные с фоновыми региональными поверхностными водами и льдами.

Изотопный состав термальных вод может свидетельствовать об определенной роли снегового питания в формировании гидрогенного компонента вод источника Сытыган-Сылба.

Наблюдается существенное повышение минерализации (на $50\text{--}100 \text{ мг/л}$) за счет концентрации сульфатов и хлоридов натрия воды источника Сытыган-Сылба в летнее время. Можно предполагать, что в теплый период при поступлении термальных вод в деятельный слой происходит смешение подземных вод с минерализованными надмерзлотными водами. В дальнейшем, с середины ноября, по мере промерзания деятельного слоя и уменьшения притока грунтовых вод происходит понижение минерализации воды источника (на $15\text{--}20 \text{ \%}$ к концу зимнего периода по сравнению с летним).

Стабильность гидрогеотермических параметров источника указывает на относительную глубинность трещинных систем, служащих регуляторными емкостями, обеспечивающими постоянство в многолетнем разрезе их режимов. Определяющая роль глубинных факторов четко прослеживается и в стабильном гидрогеохимическом облике термального источника.

Характеристики спектра РЗЭ, а также анионный состав и низкие содержания макрокомпонентов позволяют предположить, что источник расположен в зоне разгрузки трещинных вод. Судя по химическому составу и геологическим условиям участка выхода термального источника Сытыган-Сылба, подземные воды относятся к слабоминерализованным кремнистым термам глубинного происхождения, имеющим сезонное питание за счет поступления более минерализованных надмерзлотных вод.

Геохимические признаки термальных вод источника (повышенные концентрации сульфатов в ионном составе, аномальное содержание в них германия, молибдена, вольфрама, мышьяка и других элементов) являются поисковым критерием обнаружения рудных скоплений в этом районе.

С точки зрения бальнеологии, использование данных вод возможно в качестве лечебных в виде ванн по аналогии с термальной водой Тальского месторождения.

Авторы выражают благодарность д-ру геол.-мин. наук В.В. Ивановой (ВНИИ геологии и минеральных ресурсов Мирового океана) и научному сотруднику Р.Н. Ивановой (Институт мерзлотоведения СО РАН) за помощь в сборе фактического материала и интерпретацию данных.

Литература

- Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1991, 193 с.
- Геокриологическая** карта СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1991.
- Гидрогеология** СССР. Т. XXVI. Северо-Восток СССР. М., Недра, 1972, 296 с.
- Государственная** геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Лист Р-55-VII / Ред. В.Т. Матвеевко. Л., Аэрогеология, 1972.
- Дубинин А.В.** Геохимия редкоземельных элементов в океане. М., Наука, 2006, 359 с.
- Зоненшайн Л.П.** Введение в геодинамику / Л.П. Зоненшайн, Л.А. Савостин. М., Недра, 1979, 311 с.
- Иванова В.В.** Геохимические особенности спектров редкоземельных элементов в отложениях Восточной Сибири как новый индикатор изменения климата позднего плейстоцена в зоне перигляциального литогенеза: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. СПб., 2020, 408 с.
- Макаров В.Н.** Геохимические поля в криолитозоне. Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1998, 116 с.

Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таежных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии // Лед и снег, 2014, № 1 (125), с. 73–80.

Обручев С.В. Источник Сытыган-Сылба на р. Индигирке (ЯАССР) // Курортное дело, 1927, № 4, с. 8.

Обручев С.В. В Неизведанные края. Путешествия на Север 1917–1930 гг. М., Молодая гвардия, 1954, 347 с.

Парфенов Л.М. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. М.И. Кузьмина. М., МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001, 571 с.

Спектор В.Б. Строение и кинематика Верхояно-Колымской горно-складчатой системы. Процессы формирования рельефа Сибири. Новосибирск, Наука, 1987, с. 152–156.

Трофимова Т.П. Химический состав воды минерального источника "Сытыган-Сылба" // Сборник научных статей по итогам Междунар. науч.-практ. конференции. СПб., Культ-ИнформПресс, 2013, с. 147–149.

Черепанова А.П. Новые данные по минеральному источнику Сытыган-Сылба (Якутская АССР) // Исследования мерзлых толщ и криогенных явлений. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988, с. 90–97.

Швецов П.Ф. Подземные воды Верхояно-Колымской складчатой области и особенности их проявления, связанные с низкотемпературной вечной мерзлотой. М., Изд-во АН СССР, 1951, 280 с.

Шепелев В.В. Родниковые воды Якутии. Якутск, Кн. изд-во, 1987, 127 с.

Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The North American Shale Composit: Its composition, major, and trace element characteristics // Geochim. Cosmochim. Acta, 1984, vol. 48, p. 2469–2482.

Haas J.R., Shock E.L., Sassani D.C. Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial modal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, vol. 59, p. 4329–4350.

Sholkovitz E.R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // Aquat. Geochem., 1995, vol. 1, p. 1–34.

References

- Balobaev V.T. Geotermiya merzloy zony litosfery severa Azii [Geothermy of the frozen zone of the lithosphere in northern Asia]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 1991, 193 p. (in Russian).
- Ershov E.D. (Ed.). Geokriologicheskaya karta SSSR [Geocryological Map of the USSR]. Moscow, Moscow University Press, 1991 (in Russian).
- Gidrogeologiya SSSR. T. XXVI. Severo-Vostok SSSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. XXVI. North-East of the USSR]. Moscow, Nedra, 1972, 296 p. (in Russian).
- Matveenko V.T. (Ed.). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000. List P-55-VII. Leningrad, Aerogeologiya, 1972 (in Russian).
- Dubin A.V. Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v okeane [Geochemistry of Rare Earth Elements in the Ocean]. Moscow, Nauka, 2006, 359 p. (in Russian).
- Zonenshayn L.P., Savostin L.A. Vvedeniye v geodinamiku [Introduction to Geodynamics]. Moscow, Nedra, 1979, 311 p. (in Russian).
- Ivanova V.V. Geokhimicheskiye osobennosti spektrov redkozemel'nykh elementov v otlozheniyakh Vostochnoy Sibiri kak novyy indikator izmeneniya klimata pozdnego pleystotsena v zone periglyatsial'nogo litogeneza: Dissertatsiya na soiskaniye

- uchenoy stepeni dokt. geol.-min. nauk [Geochemical features of spectra of rare earth elements in deposits of the Eastern Siberia as a new indicator of the Late Pleistocene climate change in the zone of periglacial lithogenesis: Dissertation for the degree of Doctor of Geol.-Mineral. Sciences]. St. Petersburg, 2020, 408 p. (in Russian).
- Makarov V.N. Geokhimicheskiye polya v kriolitozone [Geochemical Fields in Permafrost]. Yakutsk, Izd-vo Instituta Merzlotovedeniya SO RAN, 1998, 116 p. (in Russian).
- Makarov V.N. Geochemistry of the snow cover of the taiga and mountain permafrost landscapes. Led i Sneg [Ice and Snow], 2014, No. 1 (125), p. 73–80.
- Obruchev S.V. The Sytygan-Sylba Spring on the Indigirka River (YaASSR). Kurortnoye Delo, 1927, No. 4, p. 8.
- Obruchev S.V. V Neizvedannyye kraya. Puteshestviya na Sever 1917–1930 [Unknown Lands. Travels to the North 1917–1930]. Moscow, Molodaya gvardiya, 1954, 347 p. (in Russian).
- Parfenov L.M. Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) [Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia)] / M.I. Kuz'min (Ed.). Moscow, MAIK "Nauka/Interperiodika", 2001, 571 p. (in Russian).
- Spektor V.B. Stroyeniye i kinematika Verkhoyano-Kolymnskiy gorno-skladchatoy sistemy. Protsessy formirovaniya rel'yefa Sibiri [Structure and Kinematic of the Verkhoyansk-Kolyma Folded System. The Formation of Relief of the Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1987, p. 152–156 (in Russian).
- Trofimova T.P. Khimicheskiy sostav vody mineral'nogo istochnika "Sytygan-Sylba". Sbornik nauchnykh statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [The Chemical Composition of Waters of the Sytygan-Sylba Mineral Spring. Collection of Scientific Articles Based on the Results of the International Scientific-Practical Conference]. St. Petersburg, Kul'tInformPress, 2013, p. 147–149 (in Russian).
- Cherepanova A.P. Novyye dannyye po mineral'nomu istochniku Sytygan-Sylba (Yakutskaya ASSR). Issledovaniya merzlykh tolshch i kriogennykh yavleniy [New Data on the Sytygan-Sylba Mineral Spring (Yakutia). Research of Frozen Strata and Cryogenic Events]. Yakutsk, Institut Merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1988, p. 90–97 (in Russian).
- Shvetsov P.F. Podzemnyye vody Verkhoyano-Kolymnskiy skladchatoy oblasti i osobennosti ikh proyavleniya, svyazannyye s nizkotemperaturnoy vechnoy merzlotoy [Groundwaters of the Verkhoyansk-Kolyma Fold Area and Features of their Manifestation Associated with Low-temperature]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1951, 280 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Rodnikovyye vody Yakutii [Spring Waters of Yakutia]. Yakutsk, Knizhnoye izd-vo, 1987, 127 p. (in Russian).
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The North American Shale Composit: Its composition, major, and trace element characteristics. Geochim. Cosmochim. Acta, 1984, vol. 48, p. 2469–2482.
- Haas J.R., Shock E.L., Sassani D.C. Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial modal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, vol. 59, p. 4329–4350.
- Sholkovitz E.R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. Aquat. Geochem., 1995, vol. 1, p. 1–34.

*Поступила в редакцию 30 августа 2020 г.,
после доработки – 22 октября 2020 г.,
принята к публикации 18 декабря 2020 г.*