



Серия «Науки о Земле»
2025. Т. 51. С. 91–106
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiageo.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 615.838.97+615.327+543.054.2+543.053+543.31(571.54)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.91>

Геохимическое исследование сероводородного источника Безымянного (Прибайкальский район, Республика Бурятия)

В. В. Хахинов*

Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, Россия

Т. Г. Банзаракцаева

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

И. Д. Ульзетуева

Институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

К. С. Лесников

Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, Россия

Д. Д. Цыренова

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Б. Н. Баженов, В. А. Хуторянский

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Проведено гидрохимическое исследование минерального сероводородного источника Безымянного, расположенного в лесном массиве на побережье оз. Байкал в Прибайкальском районе Республики Бурятия. Определен химический состав выхода минерального источника и вытекающего ручья. Методами жидкостной хроматографии и газожидкостной хромато-масс-спектрометрии изучен состав аллотропов серы и органических полисульфидов источника в образцах донных осадков, микробных матов и их окружения. Для сравнения полноты извлечения компонентов серы из минеральной воды проведен контроль полисульфидов с использованием разработанных ранее методик концентрирования методом твердофазной экстракции и анализа серы в природных сульфидных минеральных водах. При восстановлении сульфатов и последующем метаболизме сероводорода в донных отложениях обнаруживаются различные формы серы – сульфидная, элементная, органическая, сульфиты и тиосульфаты. Процесс микробиологической сульфатредукции является основным механизмом образования восстановленных соединений серы. На основании морфологических признаков проведено определение видового состава микроорганизмов. Показано присутствие значительного количества гексасеры в воде микробных матов по сравнению с октасерой в источнике, а также наличие азотсодержащих полисульфидов. Присутствие органических полисульфидов, одновременно с элементной серой и сероводородом, позволяет предположить, что они являются активными бальнеологическими компонентами сероводородных минеральных вод.

© Хахинов В. В., Банзаракцаева Т. Г., Ульзетуева И. Д., Лесников К. С., Цыренова Д. Д., Баженов Б. Н., Хуторянский В. А., 2025

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Ключевые слова: сероводородные воды, полисульфиды, сера, гексасера, микроорганизмы, сульфатредукция.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-27-00131. Авторы выражают благодарность ЦКП ЛИН СО РАН «Ультрамикрoанализ».

Для цитирования: Геохимическое исследование сероводородного источника Безымянного (Прибайкальский район, Республика Бурятия) / В. В. Хахинов, Т. Г. Банзаракцаева, И. Д. Ульзетуева, К. С. Лесников, Д. Д. Цыренова, Б. Н. Баженов, В. А. Хуторянский // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 51. С. 91–106. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.91-106>

Original article

Hydrochemical Study of Bezmyanny Hydrogen Sulfide Spring (Pribaikalsky District, Republic of Buryatia)

V. V. Khakhinov*

Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation

T. G. Banzaraktsaeva

Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

I. D. Ulzetueva

Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

K. S. Lesnikov

Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation

D. D. Tsyrenova

Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

B. N. Bazhenov, V. A. Khutoryansky

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. A hydrochemical study of the mineral hydrogen sulfide spring Bezmyanny, located on the coast of Lake Baikal in the Baikal region of the Republic of Buryatia, was carried out. Using the methods of liquid and gas-liquid mass spectrometry, the composition of allotropes of sulfur and organic polysulfides of the source, microbial mats and in their environment was studied. Polysulfides were monitored using previously developed concentration methods using solid-phase extraction and sulfur analysis in natural sulfide mineral waters. During the reduction of sulfates and the subsequent metabolism of hydrogen sulfide, various forms of sulfur are found in bottom sediments - sulfide, elemental, organic, sulfites and thiosulfates. The process of microbiological sulfate reduction is the main mechanism for the formation of reduced sulfur compounds. The presence of organic polysulfides simultaneously with elemental sulfur and hydrogen sulfide suggests that they are active balneological components of hydrogen sulfide mineral waters. The presence of a significant amount of hexasulfur in the water of microbial mats was observed compared to octasulfur in the source.

Keywords: hydrogen sulfide waters, polysulfides, sulfur, hexasulfur, microorganisms, sulfate reduction.

For citation: Khakhinov V.V., Banzaraktsaeva T.G., Ulzetueva I.D., Lesnikov K.S., Tsyrenova D.D., Bazhenov B.N., Khutoryansky V.A. Hydrochemical Study of Bezmyanny Hydrogen Sulfide Spring (Pribaikalsky District, Republic of Buryatia). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 51, pp. 91-106. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.91> (in Russian)

Введение

Использование сульфидных минеральных вод (СМВ) в бальнеотерапии является одним из наиболее распространенных методов лечебной профилактики. Сероводородные воды применимы при хронических патологиях опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистой системы, что способствует их терапевтическому эффекту, а также проявляют иммуномодулирующую активность [Sulphurous water inhalations ... , 2008; The Antioxidant Activity ... , 2013]. Предположен механизм действия сероводорода, который связан с рефлекторной реакцией рецепторов кожи, сосудодвигательного и дыхательного центров [The emerging roles ... , 2006]. Даже при значительном разбавлении таких вод наблюдалось выделение противовоспалительного цитокина IL 10, являющегося ингибитором противоопухолевой цитотоксичности циркулирующих моноцитов и альвеолярных макрофагов человека [Sulphurous thermal water ... , 2013], а ингаляция сероводородными водами вызывает антиоксидантный эффект [Reducing Agents Decrease ... , 2013]. Общеизвестно, что главным лечебным компонентом таких вод является сероводород, а молекулярная сера образуется в результате действия сульфатредуцирующих микроорганизмов.

При исследовании экстракта минеральной воды «Новонукутская» методами твердофазной экстракции (ТФЭ) и хромато-масс-спектрометрии (ГЖХ-МС) выявлено, что основными продуктами препарата являются сера S_8 , а также циклические полиядерные сераорганические соединения и циклические полисульфиды, а источником серы в минеральной воде являются сульфаны [Хуторянский, Смирнов, Матвеев, 2014]. Показан высокий положительный клинический эффект при ожоговом поражении, обусловленный усилением активности лейкоцитов в результате применения полученного препарата. Это позволило предположить, что активными компонентами сульфидных вод, наряду с сероводородом, могут быть сульфаны и/или продукт их распада – молекулярная сера [К оценке некоторых метаболических ... , 2010].

Полученные результаты показали, что содержание свободной серы в сероводородных минеральных источниках Республики Бурятия на два порядка ниже, чем в известных сероводородных водах Мацесты и Новонукутского. Оказалось, что выделение элементной серы методом ТФЭ приводит к разложению линейных сульфанов с образованием октасеры и соответствует суммарному содержанию свободной и полисульфидной серы. Также были обнаружены значительные количества азотсодержащих органических сульфанов: N-метилдитиокарбонимидоновой кислоты и 2,5-бис(метилтио)тиазола, а образование аллотропов серы (S_7 , S_8 и S_9) отнесено к артефакту, их появление может быть связано с разложением органических сульфанов, соответственно – с их низкой концентрацией в ходе анализа. Высокая бальнеологическая активность изученных вод Бурятии объясняется постперспирационной проницаемостью кожного покрова при высоких температурах этих источников, а также каталитической и/или регуляторной ролью ковалентно-связанной серы, наряду с сероводородом, в бальнеологии. Присутствие органических сульфанов одновременно с элементной серой и сероводородом позволяет предположить, что они являются активными бальнеологическими компонентами термальных сероводородных минеральных вод.

Вода Новонукутского источника является холодным рассолом и не образует микробных матов, в отличие от термальных источников Бурятии, из-за высокой концентрации солей. В связи с этим было интересно изучить превращение полисульфидов минеральной воды в микробных матах и донных осадках холодного сероводородного источника Безымянного.

Источник Безымянный находится в лесном массиве на побережье оз. Байкал в 180 км от г. Улан-Удэ (рис. 1). Естественный выход минерального источника просачивается через толщу рыхлых донных осадков (25–30 см) и образует ручей, на поверхности донных осадков которого обнаружены микробные маты.

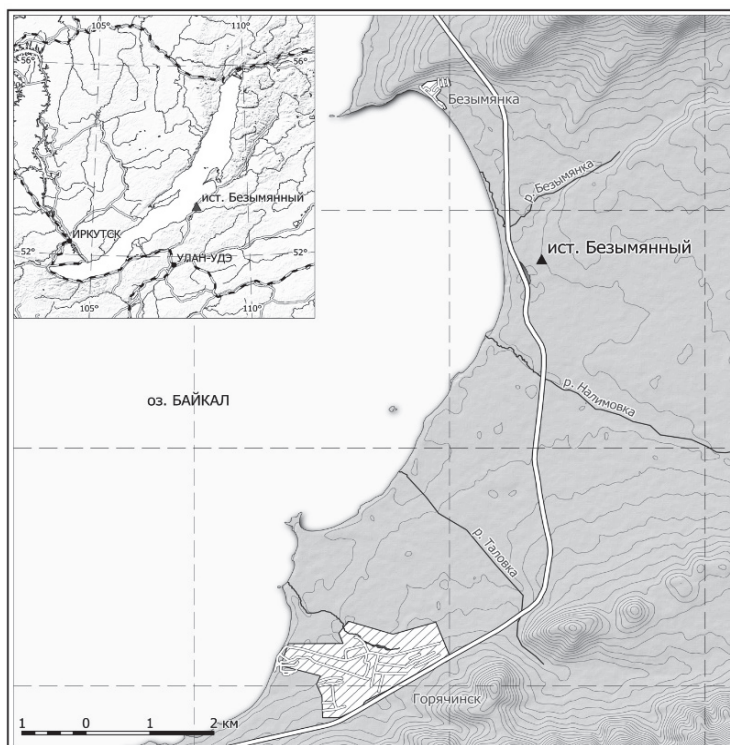


Рис. 1. Источник Безымянный 53°02,811' с. ш., 108°20,267' в. д.

Методы отбора проб

Пробы воды для химического анализа исследуемых объектов отбирали из выхода минерального источника и вытекающего ручья в чистые полиэтиленовые и стерильные стеклянные бутылки. Образцы донных осадков и микробных матов для микробиологических исследований были отобраны в стерильные пробирки 50 мл Falcon.

В местах отбора пробы измеряли pH и температуру с помощью портативного pH-метра с сенсорным термометром pH-200 HM Digital (Южная Корея). Общую минерализацию измеряли кондуктомером COM-100. Для определения

окислительно-восстановительного потенциала использовали портативный измеритель Redox потенциала ORP (Португалия). Содержание растворенного в воде кислорода определяли анализатором марки MAPK 302Э.

Методы определения химического состава

Концентрацию карбонатов, гидрокарбонатов в анализируемых водах определяли в полевых условиях в момент отбора проб титрованием 0,1 N хлороводородной кислотой (HCl) в присутствии индикаторов фенолфталеина и метилового оранжевого. Общую жесткость, ионы кальция и магния, хлорид-ионы определяли титриметрическим методом. Концентрации ионов аммония, нитрит-, нитрат-, фосфат-, сульфат- и фторид-ионов, кремниевой кислоты определяли спектрофотометрическим методом. Для анализа использовался однолучевой спектрофотометр СЕСІL 1000 (Великобритания), концентрации ионов рассчитывали по уравнениям регрессии. Содержание сероводорода и сульфидов определяли колориметрическим методом с добавлением железо-аммонийных квасцов при 670 нм, сульфиты и тиосульфаты – путем обратного йодометрического титрования [Фомин, 2000].

Определение видового состава микроорганизмов на основании морфологических признаков проводили с помощью микроскопа Axiostar plus (Carl Zeiss, Германия) при увеличении 1000–1250 крат. Определение таксономической принадлежности цианобактерий – по Голлербаху и Еленкину [Голлербах, Косинская, Полянский, 1953; Еленкин, 1949]

Анализ свободной и полисульфидной серы методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ)

Свободную ($S_{св}$) и полисульфидную ($S_{пс}$) серу из водных проб выделяли по методикам, предложенным для минеральных вод [Оценка стабильности препарата ... , 2019; Sulphur speciation ... , 1997; Sulfur speciation ... , 2010; Distribution and size ... , 2014] и использованным для анализа осадков.

$S_{св}$ экстрагировали из 50 мл СМВ дважды 1 мл гексана при интенсивном встряхивании в ультразвуковой бане 2–3 мин и отстаивали в течение 0,5 ч, из гексанового слоя отбирали пробу для анализа методом ВЭЖХ. На второй стадии к образцу после экстракции $S_{св}$ для анализа $S_{пс}$ добавляли 2 мл 1N HCl: подкисление разлагает полисульфиды на элементную серу и сероводород. Подкисленную смесь продували очищенным азотом 5 мин для удаления сероводорода (H_2S) и дважды экстрагировали 1 мл гексана, как описано выше. Для анализа ВЭЖХ отбирали пробу гексанового слоя.

Пробы микробных матов, осадка и воды над осадком предварительно пропускали через фильтры «синяя лента» (размер пор 2–3 мкм). Анализ проб микробных матов и осадка под ними затруднен из-за образования стабильной эмульсии – разделения фаз не происходило в течение 2 ч. Поэтому образцы после добавления гексана центрифугировали в течение 10 мин при 2 тыс. об/мин. Только в таких условиях образец разделялся на водный и органический слои. Кроме того, из-за неполярных свойств образцов происходила значительная сорбция гексана органической частью пробы. Поэтому экстракцию проводили добавлением 2 мл гексана, и только при этом гексановый слой отделялся.

Для контроля экстрагируемости каждый из двух экстрактов анализировали отдельно. Проведенная проверка баланса массы серы показала, что, как и в работе [Distribution and size ... , 2014], экстрагируемость серы составляет не менее 85 %. Для сравнения полноты извлечения компонентов серы из минеральной воды проводили экстракцию методом ТФЭ, как описано ранее [Хуторянский, Смирнов, Матвеев, 2014]. Предварительно в СМВ добавляли 5 % ацетонитрила. 1000 мл пробы вводили в концентрирующий патрон: Supelco DSC-C18, 500 мг сорбента, объем патрона 6 мл. Для отделения фталатов патрон промывали 50%-ным ацетонитрилом и затем серу экстрагировали 1,5 мл гексана. Хроматографический анализ методом ВЭЖХ выполняли по методикам [Möckel, 1984, p. 589; Определение элементной серы ... , 2001] на микроколоночном жидкостном хроматографе «Миличром А-02» (ЗАО «ЭкоНова», Новосибирск), колонка 2×75 мм, сорбент ProntoSIL C18, 5 мкм. Условия хроматографирования: подвижная фаза – смесь (85:15) ацетонитрила с водой, градиент 1500 мкл до 100 % ацетонитрила, скорость расхода элюента 0,2 мл/мин, температура колонки 35 °С, одновременное фотометрическое детектирование при 200 и 220 нм.

Пики аллотропов серы идентифицировали по двум параметрам: времени удерживания (T_R) и спектральному отношению площадей пиков серы при соответствующих длинах волн ($R = A_{220}/A_{200}$). Количественное измерение проводили способом внешнего стандарта. Эфиры *орто*-фталевой кислоты, обычно загрязняющие пробы в условиях эксперимента, выходят в течение первых двух минут и не накладываются на хроматографические пики аллотропов серы.

Метилирование и анализ метилпроизводных

Идентификацию полисульфидов проводили в виде метилированных производных по методике [Inorganic polysulfides ... , 2004]. Для качественного определения вида полисульфидов к аликвоте 33 мл образца добавляли 17 мл метанола, к смеси добавляли 200 мкл йодистого метила, перемешивали 30 мин, экстрагировали 1 мл гексана в течение 0,5 ч. Продукты метилирования анализировали методом ГЖХ-МС [Analysis of polysulfides ... , 2010] на хромато-масс-спектрометре Agilent 5973N-6890 (США), колонка DB, 30 м, диаметр 0,32 мм, толщина фазы 0,52 мкм. Условия анализа: изотерма 0,5 мин, затем градиент температуры 10 °С/мин от 50 до 300 °С, далее изотерма 25 мин. Газ-носитель гелий, расход 1 мл/мин. Температура инжектора 290 °С, разветвление потока 1:1, объем пробы 2 мкл. Температура ионного источника 230 °С, температура квадруполя 150 °С, диапазон сканирования – 500 m/z , частота сканирования 10 s^{-1} . Хроматограмму записывали по полному ионному току. Идентификацию компонентов по масс-спектрам осуществляли с помощью программы поиска NIST V1.7 с прилагаемыми базами данных NIST/EPA/NIH на 150 000 соединений, распространяемыми Национальным институтом стандартов и технологий США.

Аллотропы серы синтезировали согласно [Studel, Göbel, Holdt, 1989]. 3,6 г сухого сульфита натрия (Na_2SO_3) и 6,4 г сульфида натрия ($Na_2S \times 9H_2O$)

растворяли в 50 мл деминерализованной воды каждый. 1,5 мл свежеприготовленного раствора Na_2SO_3 смешивали с раствором Na_2S , добавляли 2,7 г концентрированной серной кислоты (H_2SO_4 , 1,47 мл, 95–97 %, плотность 1,84 г/см³). При перемешивании по каплям добавляли воду (примерно 8–9 мл) до стойкого помутнения, при этом выделялся сероводород, температура смеси поднималась до 30 °С (раствор А). К вышеуказанному раствору Na_2SO_3 добавляли 3 мл концентрированной H_2SO_4 (95–97 %) и быстро приливали к раствору А при энергичном перемешивании, экстрагировали гексаном.

Хроматографический пик стандарта S_8 в гексане, полученного по синтезу Ламеля [Zaiser, La Mer, 1948] 1 мг/мл, имел среднюю площадь 101,9 мм².

Результаты и их обсуждение

На момент отбора проб температура воды была 5,7 °С, значение рН – 8,4, минерализация составила 0,12 г/дм³, окислительно-восстановительный потенциал –113 мВ. Вода исследуемого источника характеризуется постоянно низкой температурой и восстановительными условиями, является слабощелочной и слабоминерализованной.

Содержание ионов гидрокарбоната и хлорида составляло 30,5 и 3,5 мг/дм³ соответственно. Количество катионов кальция и магния 36,6 и 15,6 мг/дм³. Были определены ионы нитрата и нитрита в количестве 4,7 и 0,01 мг/дм³, а также фосфат- и фторид-ионы – 0,35 и 0,32 мг/дм³. Ионы карбоната и аммония не обнаружены, ионы железа присутствовали в количестве 0,14 мг/дм³. Из серосодержащих соединений были определены сульфат-ионы 42,0 мг/дм³, ионы сульфида 11,0 мг/дм³, также обнаружено присутствие небольших количеств ионов сульфита и тиосульфата. Источниками всех форм серы в осадках являются растворенные сульфаты минеральной воды, вулканические породы, содержащие серу в виде сульфидов, минеральная взвесь, содержащая сульфаты в обменном и связанном состоянии [Кононов, 1983]. При восстановлении сульфатов и последующем метаболизме сероводорода в донных отложениях обнаруживаются различные формы серы – сульфидная, элементная, органическая, а за счет сульфатредукции осадков – также сульфиты и тиосульфаты. Сероводород дает начало ряду промежуточных и стабильных соединений серы в осадках и иловых водах. Содержание сероводорода зависит от двух процессов, связанных с его генерацией при бактериальном процессе восстановления сульфатов в воде и связывания сероводорода за счет химических реакций в неорганические и органические производные.

Небольшое содержание сероводорода можно объяснить тем, что он легко растворяется и быстро уходит из газовой фазы, разлагаясь в поверхностных слоях воды, образуя иловые сероводородные грязи. При этом процесс микробиологической сульфатредукции является основным механизмом образования восстановленных соединений серы. Химическое восстановление сульфат-иона при температурах ниже 100 °С не происходит, восстановление может происходить только с помощью сульфатредуцирующих бактерий, отбирающих кислород у сульфатов, используя в качестве энергетического материала газообразный водород или органическое вещество. Происходящие процессы сульфатредукции являются автотрофными и гетеротрофными.

Количественный анализ серы в водных растворах полисульфидов отличается разбросом результатов в зависимости от применяемых методик определения [Comparison of methods ... , 1998]. В то же время анализ свободной и полисульфидной серы методом ВЭЖХ надежен, прост и дешев, поэтому является наиболее применимым.

Анализ пробы воды источника Безымянного методом ВЭЖХ показал полное отсутствие свободной серы, но в пробе $S_{\text{пс}}$ наличие $S_8 - 1,74 \cdot 10^{-4}$ г/дм³.

На хроматограмме ВЭЖХ гексанового смыва ТФЭ после пропускания 1000 мл пробы через концентрирующий патрон заметно присутствие лишь следовых количеств S_8 . Исследование методом ГЖХ-МС также показало присутствие в образцах лишь диэтил-, дибутил- и диэтилгексилфталатов, что свидетельствует о загрязнении проб на величину «химического шума» [Определение бис-(2-этилгексил)фталата ... , 2000].

В пробе также обнаруживаются следы S_8 (пик с временем удерживания 11,530 мин на хроматограмме, рис. 2) с характерными m/z , кратными 32, на соответствующем масс-спектре. Вероятная причина такого отличия в том, что, как ранее было показано [Analysis of polysulfides ... , 2010], полисульфиды в кислой среде при использовании твердофазной экстракции и газовой масс-спектрометрии разлагаются с образованием циклооктасеры. Возможно, линейные полисульфиды в СМВ источника Безымянного все же присутствуют, но в следовых количествах, и даже концентрирование в 50 раз не позволяет определить их количественно методом ВЭЖХ.

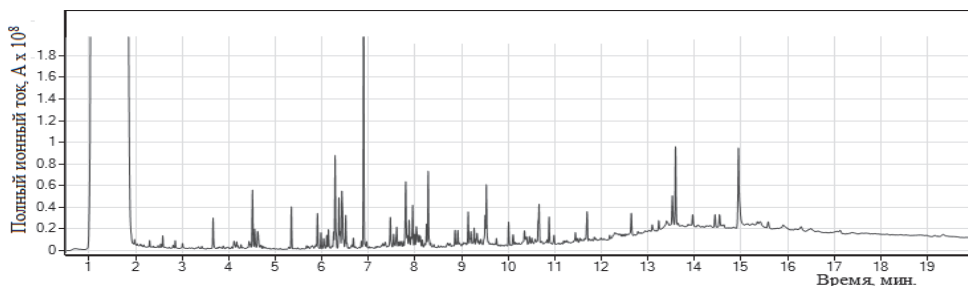


Рис. 2. Хроматограмма ГЖХ-МС образца после твердофазной экстракции СМВ источника Безымянного

Для определения вида полисульфидов, присутствующих в СМВ Безымянного, было проведено метилирование образца [Inorganic polysulfides ... , 2004].

Результаты оказались неожиданными. На хроматограммах ГЖХ-МС (рис. 3) отсутствовали пики, характерные для диметилсульфанов, а присутствуют только пики диметилового эфира метилимидодитиоугольной кислоты (время удерживания 6,652 мин) и 2,5-бис(метилтио)тиазола (8,951 мин) с характерными m/z 135 и 177 соответственно, обнаруженные ранее в пробах холодного Новонукутского источника и пробах термальных СМВ Бурятии [Оценка стабильности препарата ... , 2019].

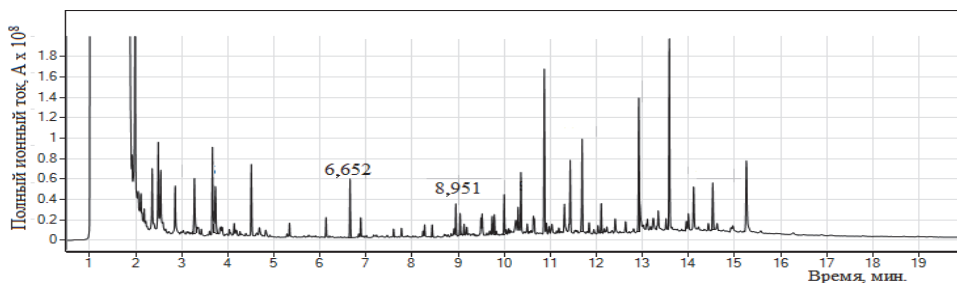


Рис. 3. Хроматограмма ГЖХ-МС образца СМВ источника Безымянного после метилирования йодистым метилом

В донных осадках термальных источников Бурятии преобладают хемолитоавтотрофные сообщества, представители рода *Thiobacillus*, являющиеся сероокисляющими бактериями и активно участвующие в круговороте серы. Облигатные хемолитоавтотрофные сероокисляющие бактерии рода *Thiobacillus* используют тиосульфат или сульфид в качестве донора электронов и источника энергии. Представители сульфатредуцирующих бактерий рода *Thermodesulfovibrio* являются анаэробными хемолитоавтотрофами и способны восстанавливать сульфат, тиосульфат или сульфит и используют ограниченное количество органических доноров электронов, которые не полностью окислены до ацетата.

В отличие от термальных источников, микробный мат источника Безымянного был представлен рыхлыми белесыми нитями сернистых бактерий и зеленоватыми прослойками цианобактерий. При микроскопировании были обнаружены колонии цианобактерии *Microcystis pulverea* и нитевидные цианобактерии *Oscillatoria ornata*. В исследуемом микробном мате преобладали бесцветные нитчатые сероокисляющие бактерии рода *Thiothrix*. Представители рода *Thiothrix* – типичные обитатели холодных серных источников [Spatial Dominance ... , 2005]. Бактерии рода *Thiothrix* представляют собой бесцветные нитчатые сероокисляющие бактерии и обитают в проточных водах в зонах встречно направленных градиентов сульфидов и кислорода. Основная экологическая роль сероокисляющих бактерий заключается в ассимиляции углекислого газа и использовании энергии окисления сероводорода и элементной серы для продукции органического вещества. В присутствии достаточного количества сероводорода и тиосульфата элементная сера запасается в клетке *Thiothrix* в форме черных капелек, но в случае нехватки сероводорода или излишка окислителя S^0 далее окисляется до растворимых сульфатов, которые в состоянии пройти через клеточные стенки бактерии [Sulfur metabolism ... , 1987]. Не подвергается сомнению участие бесцветных серобактерий в окислении восстановленных соединений серы. Недавние исследования показали, что бактерии рода *Thiothrix* обладают ферментными системами, позволяющими использовать сульфиды для преобразования их в серу и полисульфиды [Two New Species ... , 2022].

Общепринята точка зрения [Bacterial Communities in ... , 2023], что сера в микробных матах является продуктом процесса сульфатредукции. Сероокисляющие бактерии могут производить и хранить серу внутри или внеклеточно [Mas, Van Gemerden, 1995]. Поэтому было интересно, в какой форме присутствует сера в микробных матах. Анализ воды, отобранной между осадком и микробным матом, показал, что на хроматограммах ВЭЖХ (рис. 4) гексановых экстрактов свободной серы наблюдались пики S_6 ($2,22 \cdot 10^{-3}$ г/дм³) с временем удерживания $5,01 \pm 0,02$ мин и следы S_8 (менее $2 \cdot 10^{-5}$ г/дм³) с временем удерживания $6,28 \pm 0,02$ мин. Это соответствует временам удерживания и спектральным отношениям пиков синтезированных аллотропов серы. Присутствие значительных количеств аллотропа гептасеры также оказалось неожиданным: обычно содержание других аллотропов в растворах октасеры не превышает 1 % [Stuedel, Göbel, Holdt, 1989].

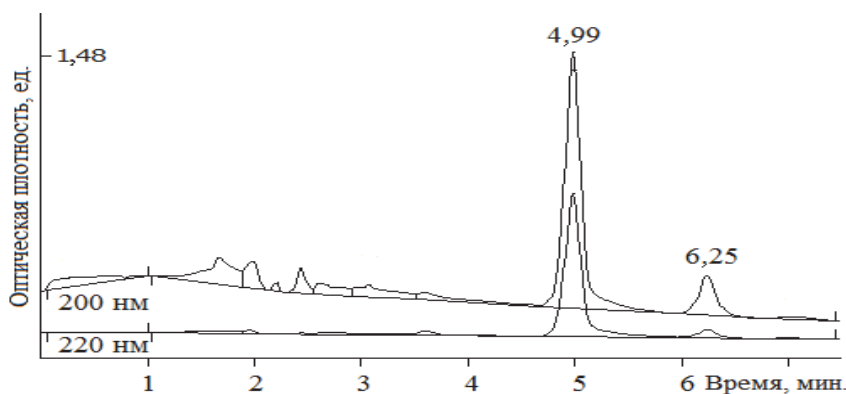


Рис. 4. Хроматограмма ВЭЖХ гексанового экстракта S_{6c} микробных матов источника Безымянного. Пик S_6 : время удерживания 4,99 мин, спектральное отношение $R = A_{220}/A_{200} = 0,576$, пик S_8 : время удерживания 6,25 мин, спектральное отношение $R = A_{220}/A_{200} = 0,270$

На хроматограммах проб, полученных после разложения полисульфидной серы, наблюдается только пик S_8 ($3 \cdot 10^{-4}$ г/дм³). Суммарное содержание серы в воде микробных матов больше в 15 раз, чем в воде источника.

Анализ ВЭЖХ влажного осадка (влажность 89,3 %) показал отсутствие серы в пробе свободной серы, а в пробе полисульфидной серы, полученной после разложения осадка, наблюдается S_8 в количестве $1,07 \cdot 10^{-2}$ г/дм³, или 0,10 мг/г относительно осадка после высушивания при 105 °С.

В микробных матах (влажность 97,9 %), напротив, наблюдается значительное накопление серы в виде аллотропа S_6 (до 0,104 мг/мл в водной части, или 5,1 мг/г относительно сухого осадка) и только следов S_8 (см. рис. 4). На хроматограммах ВЭЖХ проб, полученных после разложения полисульфидной серы, наблюдаются оба аллотропа: S_6 ($7,5 \cdot 10^{-2}$ г/дм³, или 3,67 мг/г относительно сухого осадка) и S_8 ($1,28 \cdot 10^{-2}$ г/дм³, или 0,63 мг/г относительно сухого осадка).

Данные ГЖХ-МС гексановых экстрактов образцов микробных матов подтверждают результаты ВЭЖХ (рис. 5) о присутствии свободной серы в виде аллотропа S_6 (8,514 мин) и значительного количества S_8 (11,530 мин).

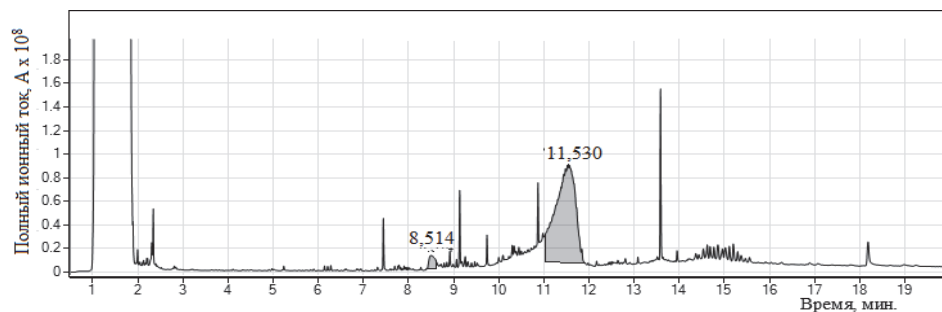


Рис. 5. Хроматограмма ГЖХ-МС гексановых экстрактов микробных матов источника Безымянного. Выделены пики циклической серы S_6 (8,514 мин) и S_8 (11,530 мин)

Результаты анализа воды источника Безымянного, бактериальных матов и воды в районе матов оказались достаточно интересными и неожиданными:

1. В воде источника линейные полисульфиды находятся на уровне ниже предела обнаружения методом ВЭЖХ, хотя обычно они являются основными серосодержащими компонентами изученных ранее сульфидных источников Прибайкалья. Концентрация серы S_8 в источнике – $1,74 \cdot 10^{-4}$ г/дм³, что на порядок ниже, чем в воде микробных матов.

2. Если в матах обнаружена сера S_8 , то в воде матов присутствует в основном сера аллотропа S_6 в значительном количестве $2,22 \cdot 10^{-3}$ г/дм³, хотя и не превышающем растворимость серы – 5 мг/дм³ [Boulegue, 1978]. Необходимо отметить, что циклогексасера S_6 в обычных условиях термодинамически нестабильна и обычно не встречается в природе. Образование S_8 в районе матов согласуется с восстановлением сульфатов, а значительное преобладание аллотропа S_6 и его высокая концентрация в воде и иле матов требует дополнительного исследования.

Обычно основным компонентом СМВ, помимо сероводорода, являются линейные полисульфиды в равновесии с протонированной формой – сульфанами, в растворах они существуют в равновесиях (1) и (2):



Для сульфанов H_2SS_n с $n = 2-4$ pK_{a1} находится в интервале 4,2–3,5 единиц [Stuedel, 1996] и при $pH = 8,4$ в СМВ Безымянного равновесие сдвинуто в сторону диссоциированной формы.

В источнике Безымянном, как и во всех изученных ранее горячих и холодных источниках СВМ [Оценка стабильности препарата ... , 2019], наблюдалось присутствие таких экзотических азотсодержащих полисульфидов, как

метил-карбондитиоимидат и тиазол. Оба эти соединения являются основаниями и, вероятно, определяют рН воды источника. Причем у тиазола проявляются свойства основания – pK_a для сопряженной кислоты равно 2,5 единицы [Comprehensive heterocyclic ... , 1984].

Заключение

Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии изучен состав аллотропов серы и органических полисульфидов источника Безымянного, микробных матов; показано присутствие значительного количества гексасеры в воде микробных матов, по сравнению с октасерой в источнике.

Присутствие органических полисульфидов одновременно с элементной серой и сероводородом позволяет предположить, что они являются активными бальнеологическими компонентами сероводородных минеральных вод.

Список литературы

Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР. М. : Сов. наука, 1953. Вып. 2. 398 с.

Еленкин А. А. Синезеленые водоросли СССР. Специальная часть. М. ; Л. : Изд-во АН СССР. 1949. Вып. 2. 990 с.

Кононов В. И. Геохимия термальных областей современного вулканизма (рифтовых зон и островных дуг). М. : Наука, 1983. 285 с.

К оценке некоторых метаболических изменений при раневой болезни на фоне лечения экстрактом минеральной воды «Новонукутская» / Г. М. Шпейзер, В. А. Хуторянский, В. А. Родионова [и др.] // Вопросы курортологии. 2010. № 6. С. 36–37.

Определение бис-(2-этилгексил)фталата в воде методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с прямым концентрированием на хроматографической колонке / Г. И. Барам, И. Н. Азарова, А. Г. Горшков [и др.] // Журнал аналитической химии. 2000. Т. 55, № 8. С. 834–839.

Определение элементной серы в донных осадках методом высокоэффективной жидкостной хроматографии / И. Н. Азарова, А. Г. Горшков, М. А. Грачев [и др.] // Журнал аналитической химии. 2001. Т. 56, № 10. С. 1062–1066.

Оценка стабильности препарата, выделенного из сульфидной минеральной воды Новонукутская / В. А. Хуторянский, В. В. Хахинов, О. В. Кустова [и др.] // Вода химия и экология. 2019. № 10. С. 131–136. <https://doi.org/10.18334/watchemec.12.121.131-136>

Фомин Г. С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклопедический справочник. М. : Протектор, 2000. 848 с.

Хуторянский В. А., Смирнов А. И., Матвеев Д. А. Определение молекулярной серы в минеральных водах Мацеста и ее аналога Новонукутская // Вопросы курортологии. 2014. № 6. С. 48–52.

Analysis of polysulfides in drinking water distribution systems using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography–mass spectrometry / I. Kristianaa, A. Heitza, C. Jolla, A. Sathasivanb // J. Chromatogr. A. 2010. Vol. 1217, N 38. P. 5995–6001. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.051>

Bacterial Communities in a Gradient of Abiotic Factors Near a Sulfide Thermal Spring in Northern Baikal / S. Chernitsyna, I. Elovskaya, T. Pogodaeva [et al.] // Diversity. 2023. Vol. 15, N 2. pp. 298. <https://doi.org/10.3390/d15020298>

Boulegue J. Solubility of Elemental Sulfur in Water at 298 K // Phosphorous and Sulfur and the Related Elements. 1978. Vol. 5. P. 127–128. <https://doi.org/10.1080/03086647808069875>

Comparison of methods for inorganic sulfur speciation in a petroleum production effluent / A. E. Witter [et al.] // Environ. Sci Technol. 1998. Vol. 17, N 11. P. 2176–2184. <https://doi.org/10.1002/etc.5620171107>

Comprehensive heterocyclic chemistry / eds. A. R. Katritzky, C. W. Rees. Oxford, 1984. Vol. 4.

Distribution and size fractionation of elemental sulfur in aqueous environments: The Chesapeake Bay and Mid-Atlantic Ridge / A. J. Findlay, A. Gartman, D. J. MacDonald [et al.] // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. Vol. 142. P. 334–348. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.07.032>

Inorganic polysulfides' quantitation by methyl iodide derivatization: dimethylpolysulfide formation potential / A. Goifman, D. Ryzkov, J. Gun [et al.] // *Water Sci Technol*. 2004. Vol. 49, N 9. P. 179–184.

Mas J., Van Gernerden H. Storage products in purple and green sulfur bacteria // *Anoxygenic photosynthetic bacteria* / eds.: R. E. Blankenship, M. T. Madigan, C. E. Bauer. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer, 1995. P. 973–990. https://doi.org/10.1007/0-306-47954-0_45

Möckel H. J. Retention of sulphur and sulphur organics in reversed-phase liquid chromatography // *J. Chromatogr.* 1984. Vol. 317. P. 589–614. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)91699-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)91699-1)

Reducing Agents Decrease the Oxidative Burst and Improve Clinical Outcomes in COPD Patients: A Randomised Controlled Trial on the Effects of Sulphurous Thermal Water Inhalation / M. Contoli, G. Gnesini, G. Forini [et al.] // *Scientific World J.* 2013. Article ID 927835. P. 7. <https://doi.org/10.1155/2013/927835>

Spatial Dominance and Inorganic Carbon Assimilation by Conspicuous Autotrophic Biofilms in a Physical and Chemical Gradient of a Cold Sulphurous Spring: The Role of Differential Ecological Strategies / A. Camacho, C. Rochera, J. J. Silvestre [et al.] // *Microb. Ecol.* 2005. Vol. 50. P. 172–184. <https://doi.org/10.1007/s00248-004-0156-x>

Stuedel R., Göbel T., Holdt G. The Molecular Nature of the Hydrophilic Sulfur Prepared from Aqueous Sulfide and Sulfite (Selmi Sulfur Sol) // *Z. Naturforsch.* 1989. B44. S. 526–530. <https://doi.org/10.1515/znb-1989-0504>

Stuedel R. Mechanism for the formation of elemental sulfur from aqueous sulfide in chemical and microbiological desulfurization processes // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996. P. 1417–1423. <https://doi.org/10.1021/IE950558T>

Sulphurous thermal water increases the release of the anti-inflammatory cytokine IL-10 and modulates antioxidant enzyme activity / C. Prandelli, C. Parola, L. Buizza [et al.] // *Int. J. Immunopathol. Pharmacol.* 2013. Vol. 26, N 3. P. 633–646. <https://doi.org/10.1177/039463201302600307>

Sulfur metabolism in *Beggiatoa alba* / T. M. Schmidt, B. Arieli, Y. Cohen [et al.] // *J. Bacteriol.* 1987. Vol. 169. P. 5466–5472.

Sulphurous water inhalations in the prophylaxis of recurrent upper respiratory tract infections. / A. Salami, M. Dellepiane, B. Crippa [et al.] // *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2008. Vol. 72, N 11. P. 1717–1722. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2008.08.014>

Sulphur speciation in anoxic hypersaline sediments from the eastern Mediterranean Sea / E. Henneke, G. W. Luther, G. J. De Lange [et al.] // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. Vol. 61, N 2. P. 307–321. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00355-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00355-9)

Sulfur speciation in the upper Black Sea sediments / M. Yücel, S. K. Kononov, T. S. Moore [et al.] // *Chem Geol.* 2010. Vol. 269. P. 364–375. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.10.010>

The Antioxidant Activity of Sulphurous Thermal Water Protects against Oxidative DNA Damage: A Comet Assay Investigation / P. C. Braga, C. Ceci, L. Marabini [et al.] // *Drug Research.* 2013. Vol. 63. P. 198–202. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1334894>

The emerging roles of hydrogen sulfide in the gastrointestinal tract and liver / S. Fiorucci, E. Distrutti, G. Cirino [et al.] // *Gastroenterology.* 2006. Vol. 131. P. 259–271. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2006.02.033>

Two New Species of Filamentous Sulfur Bacteria of the Genus *Thiothrix*, *Thiothrix winogradskyi* sp. nov. and ‘Candidatus *Thiothrix sulfatifontis*’ sp. nov. / N. V. Ravin, S. Rossetti, A. V. Beletsky [et al.] // *Microorganisms.* 2022. Vol. 10, N 7. Art. 1300. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071300>

Zaiser E. M., La Mer V. K. The kinetics of the formation and growth of monodispersed sulfur hydrosols // *J. Colloid. Sci.* 1948. Vol. 3, Iss. 6. P. 571–598. [https://doi.org/10.1016/s0095-8522\(48\)90050-6](https://doi.org/10.1016/s0095-8522(48)90050-6)

References

- Gollerbach M.M., Kosinskaya E.K., Polyansky V.I. *Opredelitel presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Determinant of freshwater, algae of the USSR]. Moscow, Soviet Science Publ., 1953, iss. 2, 398 p. (in Russian)
- Elenkin A.A. *Sinezelenye vodorosli SSSR. Spetsialnaya chast* [Blue-green algae of the USSR. Special part]. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1949, iss. 2, 990 p. (in Russian)
- Kononov V.I. *Geokhimiya termalnykh oblastei sovremennogo vulkanizma (riftovykh zon i ostrovnykh dug)* [Geochemistry of thermal areas of modern volcanism (rift zones and island arcs)]. Moscow, Sciences Publ., 1983, 285 p. (in Russian)
- Shpejzer G.M., Khutoryanskij V.A., Rodionova V.A. et al. K otsenke nekotorykh metabolicheskikh izmenenii pri ranevoi bolezni na fone lecheniya ekstraktom mineralnoi vody "Novonukutskaya" [To the Evaluation of Some Metabolic Changes in Wound Disease on the Background of Treatment with Novonukutskaya Mineral Water Extract]. *Voprosy Kurortologii* [Questions of balneology], 2010, no. 6, pp. 36-37. (in Russian)
- Baram G.I., Azarova I.N., Gorshkov A.G. et al. Opreделение bis-(2-etilgeksil)ftalata v vode metodom vysokoeffektivnoi zhidkostnoi khromatografii s pryamym kontsentririvaniem na khromatograficheskoi kolonke [Determination of bis(2-ethylhexyl)phthalate in water by high performance liquid chromatography with direct concentration on a chromatographic column]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [J. of Analytical Chemistry], 2000, vol. 55, no. 8, pp. 834-839. (in Russian)
- Azarova I.N., Gorshkov A.G., Grachev M.A. et al. Opreделение elementnoi sery v donnykh osadkakh metodom vysokoeffektivnoi zhidkostnoi khromatografii [Determination of Elemental Sulfur in Bottom Sediments Using High-Performance Liquid Chromatography]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [J. of Analytical Chemistry], 2001, vol. 56, no. 10, pp. 1062-1066. (in Russian)
- Khutoryansky V.A., Khakhinov V.V., Kustova O.V., Gorshkov A.G. Otsenka stabilnosti preparata, vydelennogo iz sul'fidnoi mineralnoi vody Novonukutskaya [Evaluation of the stability of the drug isolated from the sulfide mineral water Novonukutskaya]. *Voda himiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology], 2019, no. 10, pp. 131-136. <https://doi.org/10.18334/watchemec.12.121.131-136> (in Russian)
- Fomin G.S. *Voda. Kontrol khimicheskoi, bakterialnoi i radiatsionnoi bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam. Entsiklopedicheskii spravochnik* [Water. Control of chemical, bacterial and radiation safety according to international standards. Encyclopedic reference book]. Moscow, Protektor Publ., 2000, 848 p. (in Russian)
- Khutoryansky V.A., Smirnov A.I., Matveev D.A. Opreделение molekulyarnoi sery v mineral'nykh vodakh Matsesta i ee analoga Novonukutskaya [The determination of molecular sulphur in Matsesta mineral water and its analog Novonukutskaya mineral water]. *Voprosy Kurortologii* [Questions of balneology], 2014, no. 6, pp. 48-52. (in Russian)
- Kristianaa I., Heitza A., Jolla C., Sathasivanb A. Analysis of polysulfides in drinking water distribution systems using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography–mass spectrometry. *J. Chromatogr.*, 2010, vol. 1217, no. 38, pp. 5995-6001. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.051>
- Chernitsyna S., Elovskaya I., Pogodaeva T. et al. Bacterial Communities in a Gradient of Abiotic Factors Near a Sulfide Thermal Spring in Northern Baikal. *Diversity*, 2023, vol. 15, no. 2, p. 298. <https://doi.org/10.3390/d15020298>
- Boulegue J. Solubility of Elemental Sulfur in Water at 298 K. *Phosphorous and Sulfur and the Related Elements*, 1978, vol. 5, p. 127-128. <https://doi.org/10.1080/03086647808069875>
- Witter A.E., Jones A.D. Comparison of methods for inorganic sulfur speciation in a petroleum production effluent. *Environ. Sci Technol.*, 1998, vol. 17, no. 11, pp. 2176-2184. <https://doi.org/10.1002/etc.5620171107>
- Comprehensive heterocyclic chemistry. Ed. by A.R.Katritzky, C.W.Rees. Oxford, 1984, vol. 4.
- Findlay A.J., Gartman A., MacDonald D.J. et al. Distribution and size fractionation of elemental sulfur in aqueous environments: The Chesapeake Bay and Mid-Atlantic Ridge. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2014, vol. 142, pp. 334-348. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.07.032>
- Goffman A., Ryzkov D., Gun J. et al. Inorganic polysulfides' quantitation by methyl iodide derivatization: dimethylpolysulfide formation potential. *Water Sci Technol*, 2004, vol. 49, no. 9, pp. 179-184.
- Mas J., Van Gernerden H. Storage products in purple and green sulfur bacteria. *Anoxygenic photosynthetic bacteria*, 1995, pp. 973-990. https://doi.org/10.1007/0-306-47954-0_45

Möckel H.J. Retention of sulphur and sulphur organics in reversed-phase liquid chromatography. *J. Chromatogr.*, 1984, vol. 317, pp. 589-614. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)91699-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)91699-1)

Contoli M., Gnesini G., Forini G. et al. Reducing Agents Decrease the Oxidative Burst and Improve Clinical Outcomes in COPD Patients: A Randomised Controlled Trial on the Effects of Sulphurous Thermal Water Inhalation. *Scientific World J.*, 2013, p. 7. <https://doi.org/10.1155/2013/927835>

Camacho A., Rochera C., Silvestre J.J. et al. Spatial Dominance and Inorganic Carbon Assimilation by Conspicuous Autotrophic Biofilms in a Physical and Chemical Gradient of a Cold Sulphurous Spring: The Role of Differential Ecological Strategies. *Microb. Ecol.*, 2005, vol. 50, pp. 172-184. <https://doi.org/10.1007/s00248-004-0156-x>

Stuedel R., Göbel T., Holdt G.Z. The Molecular Nature of the Hydrophilic Sulfur Prepared from Aqueous Sulfide and Sulfite (Selmi Sulfur Sol). *Naturforsch.*, 1989, B.44, pp. 526-530. <https://doi.org/10.1515/znb-1989-0504>

Stuedel R. Mechanism for the formation of elemental sulfur from aqueous sulfide in chemical and microbiological desulfurization processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996, vol. 35, pp. 1417-1423. <https://doi.org/10.1515/IEHF.2005.019>

Prandelli C., Parola C., Buizza L. et al. Sulphurous thermal water increases the release of the anti-inflammatory cytokine IL-10 and modulates antioxidant enzyme activity. *Int. J. Immunopathol. Pharmacol.*, 2013, vol. 26, no. 3, pp. 633-646. <https://doi.org/10.1177/039463201302600307>

Schmidt T.M., Arieli B., Cohen Y. et al. Sulfur metabolism in *Beggiatoa alba*. *J. Bacteriol.*, 1987, vol. 169, pp. 5466-5472.

Salami A., Dellepiane M., Crippa B. [et al.]. Sulphurous water inhalations in the prophylaxis of recurrent upper respiratory tract infections. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.*, 2008, vol. 72, no. 11, pp. 1717-1722. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2008.08.014>

Henneke E., Luther G.W., De Lange G.J., Hoefs J. Sulphur speciation in anoxic hypersaline sediments from the eastern Mediterranean Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, vol. 61, no. 2, pp. 307-321. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00355-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00355-9)

Yücel M., Konovalov S.K., Moore T.S. et al. Sulfur speciation in the upper Black Sea sediments. *Chem Geol.*, 2010, vol. 269, pp. 364-375 <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.10.010>

Braga P.C., Ceci C., Marabini L., Nappi G. The Antioxidant Activity of Sulphurous Thermal Water Protects against Oxidative DNA Damage: A Comet Assay Investigation. *Drug Research*, 2013, vol. 63, pp. 198-202. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1334894>

Fiorucci S., Distrutti E., Cirino G., Wallace J.L. The emerging roles of hydrogen sulfide in the gastrointestinal tract and liver. *Gastroenterology*, 2006, vol. 131, pp. 259-271. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2006.02.033>

Ravin N.V., Rossetti S., Beletsky A.V. et al. Two New Species of Filamentous Sulfur Bacteria of the Genus *Thiothrix*, *Thiothrix winogradskyi* sp. nov. and '*Candidatus Thiothrix sulfatifontis*' sp. nov. *Microorganisms*, 2022, vol. 10, no. 7, art. 1300. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071300>

Zaiser E.M., La Mer V.K. The kinetics of the formation and growth of monodispersed sulfur hydrosols. *J. Colloid. Sci.*, 1948, vol. 3, iss. 6, pp. 571-598. [https://doi.org/10.1016/s0095-8522\(48\)90050-6](https://doi.org/10.1016/s0095-8522(48)90050-6)

Сведения об авторах

Хахинов Вячеслав Викторович
доктор химических наук, профессор,
заведующий, кафедре экологии и
природопользования
Бурятский государственный университет
Россия, 670000, г. Улан-Удэ,
ул. Смолина, 24а
e-mail: khakhinov@mail.ru

Банзарактаева Туяна Геннадьевна
кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник

Information about the authors

Khakhinov Vyacheslav Viktorovich
Doctor of Sciences (Chemical), Professor,
Head, Department of Ecology and Nature
Management
Buryat State University
24a, Smolin st., Ulan-Ude, 670000,
Russian Federation
e-mail: khakhinov@mail.ru

Banzaraksyeva Tuyana Gennadievna
Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist

*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
Россия, 670034. г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой, 6
e-mail: tuyana_banz@mail.ru*

*Institute of General and Experimental Biology
SB RAS
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670034,
Russian Federation
e-mail: tuyana_banz@mail.ru*

Ульзетуева Ирина Дабавна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Байкальский институт природопользования
СО РАН
Россия, 670034, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой, 6
e-mail: idulz@mail.ru

Ulzetueva Irina Dabaevna
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670034,
Russian Federation
e-mail: idulz@mail.ru

Лесников Константин Сергеевич
магистрант
Бурятский государственный университет
Россия, 670000, г. Улан-Удэ,
ул. Смолина, 24а
e-mail: kostya.lesnikov.01@mail.ru

Lesnikov Konstantin Sergeevich
Undegraduate
Buryat State University
24a, Smolin st., 670000, Ulan-Ude,
Russian Federation
e-mail: kostya.lesnikov.01@mail.ru

Цыренова Дулма Доржиевна
кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Байкальский институт природопользования
СО РАН
Россия, 670034, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой, 6
e-mail: baldanovad@rambler.ru

Tsyrenova Dulma Dorzhievna
Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670034,
Russian Federation
e-mail: baldanovad@rambler.ru

Баженов Борис Николаевич
кандидат химических наук, доцент,
научный сотрудник
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: scorpio1956@mail.ru

Bazhenov Boris Nikolaevich
Candidate of Sciences (Chemistry),
Associate Professor, Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: scorpio1956@mail.ru

Хуторянский Виталий Аркадьевич
кандидат химических наук, доцент,
научный сотрудник
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: hutor@chem.isu.ru

Khutoryanskiy Vitaliy Arkadievich
Candidate of Sciences (Chemistry),
Associate Professor, Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: hutor@chem.isu.ru

Код научной специальности: 1.6.16

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 11.03.2025
The article was submitted October, 21, 2024; approved after reviewing December, 12, 2025; accepted for publication March, 11, 2025