

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ТОКСИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

© 2020 г. С. В. Мурадов^а, Т. П. Белова^{а, *}, С. В. Рогатых^а

^аНаучно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683002 Россия

*e-mail: tpbel@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

После доработки 28.11.2019 г.

Принята к публикации 24.12.2019 г.

Значительные ресурсы термоминеральных вод Паратунского месторождения используются в системах отопления, а также в бальнеологических целях. Отработанные воды поступают в грязелечебный водоем в составе питающих вод. Представляет интерес влияние химических факторов термальных вод на экологическое состояние иловой сульфидной лечебной грязи. Доля термальных вод в питающих водах озера достигает 40%. Действие термальных вод на структуры пелоида моделируется их различной концентрацией, используемой для активирования пелоида разжижением, прогревом, перемешиванием и соответствующим кислородным режимом (аэробным, анаэробным). Экологические последствия воздействия термоминеральных вод заключаются в изменении химического состава грязевого раствора, а также в общем числе автохтонных микроорганизмов и в развитии их физиологической и геохимической активности. Степень экологической активации характеризуется числом микроорганизмов, их физиологической активностью, физико-химическими изменениями грязевого раствора (рН и Eh), а также содержанием сероводорода и аммиака. Установлено стимулирующее действие малых доз и угнетающая геохимическая активность микроорганизмов, высокая доля термальных вод. Установлены экологические группы и направления физиологической активности микроорганизмов, толерантные к действию токсических факторов термальных вод.

Ключевые слова: гидротермальное месторождение, иловая сульфидная грязь, экологическое состояние пелоида.

DOI: 10.31857/S0321059620040094

Воды Паратунского гидротермального месторождения используются как источники тепловой энергии и для бальнеологических целей, после чего они сбрасываются в ручьи, питающие месторождение иловой сульфидной лечебной грязи оз. Утинового в Елизовского районе Камчатского края. Оценка влияния отработанных термоминеральных вод на экологическое состояние пелоида представляет несомненный научный и практический интерес.

Цель настоящей работы — исследование физико-химических и микробиологических изменений, вызванных токсическим действием термоминеральных вод на экологическое состояние лечебной грязи.

Физико-химические свойства вод и грязевых растворов исследовали по методикам О.А. Алекина и др. [1]. Перечень химических исследований вод соответствует перечню параметров грязевого раствора. Щелочные, щелочноземельные метал-

лы, а также микроэлементы определяли при помощи Атомно-абсорбционного спектрофотометра “AAS-6300 Shimadzu” с пламенной и электротермической атомизацией. Анионный состав жидких сред определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием жидкостного хроматографа “Shimadzu LC-20”, оборудованного кондуктометрическим детектором. Гидрокарбонат-ионы определяли потенциометрически с использованием “Эксперт-001”. Содержание кремниевой кислоты определяли фотоколориметрически с применением КФК-3 [5]. Сероводород и сульфиды определяли по методике [12]. Фотоколориметрический метод основан на способности сероводорода и сульфидов образовывать метиленовую синь в кислой среде с продуктами окисления N,N-диметил-*n*-фенилендиамина железом(III).

Активирование лечебной грязи проводилось в реакторе (активаторе) емкостью 4 л с перемешиванием с интенсивностью — 150 об/мин, прогрева —

Таблица 1. Показатели процесса аэробной активации лечебной грязи в реакторе с разведением бидистиллированной водой и определением ОЧМ

Сутки	ОЧМ, кл/г	pH	Eh, mV	H ₂ S, мг/дм ³	NH ₃ , мг/дм ³
Начало	50.6 × 10 ⁷	6.70 ± 0.02	-122	16.8 ± 2.5	183 ± 64
3	68.4 × 10 ⁷	5.28 ± 0.02	171	8.40 ± 1.24	176 ± 62
6	83.9 × 10 ⁷	4.88 ± 0.02	206	5.60 ± 0.84	173 ± 61
9	99.3 × 10 ⁷	4.48 ± 0.02	240	2.80 ± 0.38	170 ± 60
12	46.2 × 10 ⁷	4.40 ± 0.02	288	0.39 ± 0.06	168 ± 59

Таблица 2. Показатели процесса анаэробной активации лечебной грязи в реакторе с разведением бидистиллированной водой и определением ОЧМ

Сутки	ОЧМ, кл/г	pH	Eh, mV	H ₂ S, мг/дм ³	NH ₃ , мг/дм ³
Начало	50.6 × 10 ⁷	6.70 ± 0.02	-122	16.8 ± 2.5	183 ± 64
3	225.5 × 10 ⁷	5.42 ± 0.02	-71	0.05 ± 0.008	63 ± 22
6	140.9 × 10 ⁷	5.37 ± 0.02	-70.5	0.03 ± 0.005	90 ± 29
9	56.4 × 10 ⁷	5.32 ± 0.02	-70	0.01 ± 0.002	117 ± 40
12	169.1 × 10 ⁷	7.12 ± 0.02	96	0.01 ± 0.002	157 ± 54

от 25°C (для успешного развития мезофильных микроорганизмов) до 45°C (для экстракции без денатурации БАВ) в аэробных и анаэробных условиях. Для создания аэробных условий проводили аэрацию мембранным компрессором с распылителем мощностью 1.75 л/мин, обеспечивающим такого содержание кислорода, как на уровне придонных вод месторождения (≥4 мг/дм³). Анаэробные условия создавали с помощью изолирующего слоя вазелинового масла толщиной 20 мм.

Цель эксперимента заключалась в изучении влияния термальной воды на динамику общей численности микроорганизмов лечебной грязи и ее физико-химических параметров (pH, Eh, концентраций NH₃, H₂S) в процессах аэробной и анаэробной активации. Эксперимент был поставлен для трех вариантов разведения лечебной грязи: 1) только бидистиллированной водой; 2) только термальной водой Паратунского место-

рождения; 3) термальной водой, разбавленной дистиллированной водой в соотношении 1 : 3 в аэробных и анаэробных условиях. Методы получения активированной грязи и экстракта на ее основе для лечебных целей подробно описаны в [5]. Изменения параметров лечебной грязи в процессе экологической активации с применением перечисленных вод приведены в табл. 1–6.

Процессы пассивной регенерации и активации грязей контролировали проведением бактериально-экологических, микробиологических и физико-химических анализов. Отдельные направления физиологической активности микроорганизмов (гнилостные аэробы и анаэробы, нитрифицирующие и денитрифицирующие, маслянокислые, целлюлозоразлагающие аэробы и анаэробы, сульфатредуцирующие и тионовые, железooksисляющие, актиномицеты и плесневые грибы) культивировали и определяли на электропитательных средах. Численность микроор-

Таблица 3. Параметров процесса аэробной активации лечебной грязи в реакторе с разведением термальной водой и определением ОЧМ

Сутки	ОЧМ, кл/г	pH	Eh, mV	H ₂ S, мг/дм ³	NH ₃ , мг/дм ³
Начало	50.6 × 10 ⁷	6.70 ± 0.02	-122	16.8 ± 2.5	183 ± 64
3	48.4 × 10 ⁷	5.55 ± 0.02	-26	2.70 ± 0.32	213 ± 75
6	25.0 × 10 ⁷	4.79 ± 0.02	61	0.80 ± 0.12	227 ± 79
9	1.58 × 10 ⁷	4.02 ± 0.02	147	0.50 ± 0.08	227 ± 79
12	0.31 × 10 ⁷	3.94 ± 0.02	226	0.30 ± 0.05	249 ± 87

Таблица 4. Параметры процесса анаэробной активации лечебной грязи в реакторе с разведением термальной водой и определением ОЧМ

Сутки	ОЧМ, кл/г	pH	Eh, mV	H ₂ S, мг/дм ³	NH ₃ , мг/дм ³
Начало	50.6 × 10 ⁷	6.70 ± 0.02	–122	16.8 ± 2.5	183 ± 64
3	260.3 × 10 ⁷	6.27 ± 0.02	–351	3.30 ± 0.46	92 ± 32
6	405.5 × 10 ⁷	5.92 ± 0.02	–340	0.80 ± 0.12	94 ± 33
9	550.7 × 10 ⁷	5.57 ± 0.02	–328	0.90 ± 0.14	96 ± 34
12	656.3 × 10 ⁷	6.12 ± 0.02	–249	4.99 ± 0.76	116 ± 41

Таблица 5. Параметры процесса аэробной активации лечебной грязи в реакторе с разведением термальной водой, разбавленной в соотношении 1 : 3 дистиллированной водой

Сутки	ОЧМ, кл/г	pH	Eh, mV	H ₂ S, мг/дм ³	NH ₃ , мг/дм ³
Начало	50.6 × 10 ⁷	6.70 ± 0.02	–122	16.8 ± 2.5	183 ± 64
3	1001 × 10 ⁷	5.11 ± 0.02	–46	12.2 ± 1.8	194 ± 67
6	781 × 10 ⁷	4.32 ± 0.02	61	6.90 ± 1.00	196 ± 68
9	561 × 10 ⁷	3.52 ± 0.02	168	1.65 ± 0.20	198 ± 69
12	10.9 × 10 ⁷	2.82 ± 0.02	390	0.3 ± 0.04	208 ± 72

ганизмов (общее микробное число – ОМЧ) устанавливали методом десятикратных разведений на элективных питательных средах, а также при помощи мембранных ультрафильтров с диаметром пор 0.23 мкм [5, 6, 10].

Для определения количества клеток в грязевом растворе во время длительной активации пелоида пробу в закрытой пробирке встряхивали на вортексе (50 Гц) в течение 1 мин и центрифугировали. Прямой подсчет клеток вели под микроскопом с фазово-контрастной насадкой. Результат усредняли и пересчитывали количество клеток на один грамм пелоида.

Термальные воды Паратунского гидротермального месторождения – сульфатные и хлоридно-сульфатные натриевые и кальциево-натриевые с минерализацией 0.9–1.5 г/дм, кремнистые (H₂SiO₃ – 37–78 мг/дм³) с содержанием, мг/дм³: H₃BO₃ – 2–9 (до 35), фтора – до 2.8–4.4,

лития – от 0.4 до 1.9 (в одном случае 3.3), мышьяка 0.13–1.0. Газовый состав – преимущественно азотный. Содержание CO₂ от 1 до 8.9 об. %, в отдельных скважинах до 26–60 об. %. Несколько повышена концентрация радона – до 14.4 × 10^{–10} К/дм³.

Вопросы извлечения ценных компонентов из термальных вод и снижения их концентрации до уровня ПДК освещены в работах [2, 3, 13].

Запасы Паратунского месторождения термоминеральных вод составляют: по категории В – 21.6; по категории С₁ – 1.7 тыс. м³/сут со средневзвешенной температурой 76.5°C на неограниченный срок эксплуатации. Прогнозные потенциальные ресурсы месторождения достигают 40 тыс. м³/сут. Установлена доля термоминеральных вод в питающих водах озера, достигающая в различное время года 10–40% в эксплуатационных запасах месторождения со средневзвешенной температурой 77°C [9]. Эти данные позволяют учесть и возрос-

Таблица 6. Параметры процесса анаэробной активации лечебной грязи в реакторе с разведением термальной водой, разбавленной в соотношении 1 : 3 дистиллированной водой

Сутки	ОЧМ, кл/г	pH	Eh, mV	H ₂ S, мг/дм ³	NH ₃ , мг/дм ³
Начало	50.6 × 10 ⁷	6.70 ± 0.02	–122	16.8 ± 2.5	183 ± 64
3	286.9 × 10 ⁷	5.85 ± 0.02	–46	1.80 ± 0.26	72 ± 25
6	371.7 × 10 ⁷	5.51 ± 0.02	61	0.41 ± 0.06	79 ± 27
9	307.8 × 10 ⁷	5.45 ± 0.02	168	0.25 ± 0.04	86 ± 30
12	168.3 × 10 ⁷	6.62 ± 0.02	390	1.70 ± 0.25	141 ± 49

ший приток обработанных пресных вод, включающихся в хозяйственно-бытовые стоки. На сегодняшний день эксплуатационные запасы вод месторождения, достигающие 24.8 тыс. м³/сут, разбираются практически на 100% скважинными водозаборами [5, 6].

Воды относятся к бальнеологической группе Ж и, по заключению Центрального научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии, могут быть использованы как для внутреннего применения в качестве питьевых лечебно-столовых вод при заболеваниях органов пищеварения, так и для наружного. В последнем случае в лечебное действие затрагивает сердечно-сосудистую система, периферическую и центральную нервную, костно-мышечную системы, функциональные расстройства, обмен веществ.

Близкие аналоги этих терм – воды известных курортов: Кульдур (Россия), Монт-Дор и Пломбиер (Франция), Ротонда (Новая Зеландия), Висбаден (Германия). Месторождение относится к перспективным (13.5 балла) [6, 11].

В сульфидных илах при их формировании и экологической активации благодаря физическим, химическим, биохимическим и микробиологическим процессам илы приобретают лечебные функционально-экологические свойства более высокого уровня.

Деструкция органического вещества с участием микробного сообщества лечебной грязи определяет накопление катионов и анионов, значительное увеличение минерализации – с 809.5 до 5362.0 мг/л, способствует подкислению экстракта от 6.14 до 2.90. В анаэробных условиях активность этих групп микробов снижается не только по численности, но и по интенсивности метаболизма, что приводит к подщелачиванию экстракта за счет выделения аммиака. Маслянокислые бактерии, плесневые грибы увеличивают содержание органического вещества, доступного для гнилостных процессов, с выделением сероводорода, аммиака и далее – синтеза гидротроилита, обеспечивающего формирование лечебной грязи. Интенсивная активация барботированием воздухом, минерализуя и подкисляя экстракт, дестабилизирует пелоид, приводит к его осветлению. В анаэробных условиях происходит стабилизация и накопление органического вещества, промежуточных продуктов замедленной анаэробной диссимилиации. Соответственно, изменяются физико-химические механизмы биологической активности экстрактов. Минерализованные экстракты имеют высокий уровень антибактериальной активности по отношению к привнесенной микрофлоре, а также обладают рефлекторно-раздражающим действием. Экстракты после анаэробной активации обладают высоким содержанием белковых веществ, аминокислот, витаминов,

гумматов, обладающих противовоспалительным, ранозаживляющим действием [6, 8, 9].

При аэробной активации с дистиллированной водой динамика изменения общего числа микроорганизмов показывает плавное нарастание численности микроорганизмов с последующей стадией снижения их численности ($50.6 \times 10^7 - 99.31 \times 10^7 - 46.2 \times 10^7$ кл/г). Содержание сероводорода снижается с 16.8 до 0.39 мг/дм³. Содержание аммиака в грязевом растворе также снижается с 183 до 168 мг/дм³. Динамика pH и Eh показывает противоположные векторы изменений. Кислотность среды плавно нарастает с 6.70 до 3.94, рост Eh сохраняется до окончания эксперимента до величины 226 mV (табл. 1).

Анаэробный вариант экологической активации с дистиллированной водой показывает следующую динамику изменений значений ОЧМ: сначала численность клеток нарастает с 50.6×10^7 до 225.5×10^7 кл/г с последующим снижением численности до 56.36×10^7 кл/г, затем наблюдается новый этап роста числа микроорганизмов до 169.1×10^7 кл/г. Динамика изменения величины pH показывает в первой половине эксперимента подкисление среды с pH – 6.70 до 5.62, в последующем pH растет до 7.12. Значение Eh приобретает положительный потенциал и нарастает в ходе всего эксперимента с –122 до +196 mV. Содержание сероводорода в ходе эксперимента снижается до очень низких показателей, с 16.8 до 0.01 мг/дм³. Концентрация аммиака снижается в первые три дня эксперимента, затем отмечается ее рост от 183.0 до 63.0–90.0 мг/дм³.

При аэробной активации пелоида с термальной водой динамика изменения ОЧМ показывает плавное снижение численности микроорганизмов с 50.6×10^7 до 0.31×10^7 кл/г на протяжении всего хода эксперимента, что указывает на тормозящее влияние термальной воды на развитие микробного сообщества в процессе экологической активации. Динамика величины pH и Eh показывает противоположные векторы их изменений. Кислотность среды плавно нарастает с 6.70 до 3.94. Eh нарастает с –122 до +226 к окончанию эксперимента. Наблюдается резкое снижение концентрации сероводорода с 16.8 до 0.3 мг/дм³, и после 5-го дня эксперимента содержание сероводорода становится ниже определяемого уровня. Концентрация аммиака постоянно нарастает, сохраняя высокий уровень до окончания эксперимента с – 183 до 249 мг/дм³ (табл. 3).

При анаэробной активации пелоида с разведением термальной водой динамика ОЧМ показывает плавное нарастание с 50.6×10^7 до 656.3×10^7 кл/г. Содержание аммиака снижается к середине эксперимента и возрастает после 8-го дня наблюдений – 183–94 – 116 мг/дм³ (табл. 4).

В случае аэробной активации лечебной грязи при разведении 25%-й термальной водой наблюдается период бурного роста ОЧМ с 50.6×10^7 до 1001.0×10^7 кл/г, стационарного развития и затем угнетения в последние четыре дня наблюдений до 10.78×10^7 кл/г. ОЧМ быстро нарастает и сохраняется на стационарном уровне, возвращаясь с 8-го дня активирования к исходной величине в начале эксперимента. рН снижается с 6.70 до 2.82, в то время как Eh повышается с -122 до 390 mV. Содержание сероводорода снижается с 16.8 до 0.30 мг/дм³, содержание аммиака увеличивается с 183 до 208 мг/дм³ (табл. 5).

В анаэробной части эксперимента с данным разведением термальной водой наблюдается высокая ОЧМ в стационарной фазе развития — 371.7×10^7 кл/г. Содержание H₂S снижается с 16.8 до 1.70 мг/дм³. Содержание NH₃, снижаясь к середине эксперимента с 183 до 72, растет к окончанию опыта до 141 мг/дм³ (табл. 6).

Полученные данные о влиянии разведений пелоида термальной водой перед его экологической активацией на деятельность микроорганизмов доказываются изменениями важнейших параметров лечебной грязи ОЧМ, рН, Eh, H₂S и NH₃, связанных с геохимической деятельностью автохтонной микрофлоры лечебной грязи. Анализ итогов экологической активации с дистиллированной, термальной и 25%-й термальной водой в аэробных и анаэробных условиях показывает более угнетающее влияние термальной воды по сравнению с дистиллированной водой, что выражается ОЧМ, характером ее динамики, а также динамикой физико-химических показателей. Наблюдается угнетение микробной ассоциации при активировании пелоида термальной водой, но, по-видимому, определенную толерантность к факторам термальной воды проявляют аммонифицирующие микроорганизмы, продолжающие минерализацию органического вещества. В анаэробном процессе с термальной водой происходит увеличение числа микроорганизмов за счет анаэробных бактерий, но выработка сероводорода и аммиака снижается. Анаэробная часть микробного сообщества лечебной грязи более устойчива к термальной воде.

Пелоид, разведенный в 25%-й термальной воде, разбавленной бидистиллированной водой, в процессе аэробной активации по исследуемым параметрам показывает стабильно высокий уровень ОЧМ, снижение величины и затем возрастание Eh и рН. Содержание сероводорода и содержание аммиака со сдвигом в фазе снижаются и повышаются к концу наблюдений (колебания величин параметров составляют >150%). Процесс аналогичен активации с разведением пелоида бидистиллированной водой, но более динамично

развитие микробного сообщества и ход минерализации органического вещества. В анаэробной части эксперимента с данным разведением термальной водой наблюдается высокая ОЧМ в стационарной фазе развития. Содержания H₂S и NH₃, снижаясь к середине эксперимента, растут к его окончанию.

Таким образом, установлено угнетающее влияние факторов термальной воды на развитие микробного сообщества в процессе экологической активации пелоида. Термальная вода с разведением бидистиллированной водой до 25% стимулирует развитие микробного сообщества лечебной грязи благодаря содержащимся минеральным веществам и низкой доле токсических веществ и микроэлементов [9]. Более детально химический состав грязевого раствора исследовался в серии наблюдений аэробного и анаэробного активирования пелоида с интервалами 6, 12, 18, 24 дней (табл. 7, 8). При аэробном процессе активирования пелоида растет содержание NH₄⁺, SO₄²⁻, Ca²⁺. При анаэробном процессе активирования пелоида значительного увеличения отдельных компонентов грязевого раствора не наблюдается, или этот процесс слабо выражен.

Как сказано выше, высокое содержание органических веществ и низкая минерализация грязей оз. Утинового детерминируют преимущественное развитие в них микроорганизмов, разрушающих азотсодержащие соединения (главным образом белки). Поэтому преобладают в микробном ценозе аммонифицирующие и денитрифицирующие бактерии (рисунок). Диаграмма показывает направления развития физиологической активности микроорганизмов лечебной грязи при ее пассивном выдерживании (регенерации), а также в процессе экологической активации без воздействия факторов термоминеральной воды. Значительное количество (70–80 мг-экв/л) сульфатов в жидкой фазе грязей оз. Утинового при наличии органических веществ дает возможность в анаэробных условиях интенсивно развиваться другой группе микроорганизмов — сульфатредуцирующим, которые в сущности и определяют принадлежность изучаемого пелоида к его среднесульфидной разновидности.

Среди других изменений параметров грязей в опытах регенерации и активации можно назвать снижение в грязевом растворе содержания сульфат-иона и соответственное увеличение количества гидрокарбонат-иона, объясняющиеся интенсивной жизнедеятельностью сульфатредуцирующих бактерий, о чем говорилось выше.

Химический состав и физико-химические показатели лечебной грязи в процессе активирования закономерно изменяются в связи с направ-

Таблица 7. Влияние условий аэробной активации Паратунского пелоида на раствор лечебной грязи с течением времени, по результатам химического анализа ($P = 0.95$)

Компоненты	ПО, мг/л	Дни					
		6			12		
		(C ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.	(C ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.
pH	—	3.03 ± 0.02			3.43 ± 0.02		
H ⁺	Расчет	0.93 ± 0.02	0.930	2.51	0.37 ± 0.02	0.370	0.80
Li ⁺	0.05	14.9 ± 3.0	2.147	5.80	18.4 ± 3.7	2.651	5.76
K ⁺	0.1	13.3 ± 2.1	0.340	0.92	8.91 ± 1.4	0.228	0.50
Na ⁺	0.5	81.5 ± 13.9	3.545	9.58	55.2 ± 9.4	2.401	5.22
NH ₄ ⁺	0.05	30.1 ± 10.5	1.668	4.51	42.9 ± 15.0	2.377	5.17
Ca ²⁺	1.0	401 ± 28	20.010	54.09	580 ± 41	28.942	65.91
Mg ²⁺	0.5	40.9 ± 4.5	3.363	9.09	36.2 ± 4.0	2.977	6.47
Fe _{общ} ³⁺	0.05	89.2 ± 15.2	4.791	12.95	109 ± 19	5.854	12.73
Co ²⁺	0.05	<0.05	—	—	<0.05	—	—
Cu ²⁺	0.05	0.05 ± 0.01	0.002	0.01	0.05 ± 0.01	0.002	0.00
Zn ²⁺	0.05	0.13 ± 0.03	0.004	0.01	0.29 ± 0.06	0.009	0.02
Mn ²⁺	0.05	5.17 ± 0.78	0.188	0.51	5.12 ± 0.77	0.186	0.40
Ni ²⁺	0.05	0.06 ± 0.01	0.002	0.01	0.11 ± 0.02	0.004	0.01
Pb ²⁺	0.05	0.07 ± 0.02	0.001	0.00	0.08 ± 0.02	0.001	0.00
Сумма катионов	—	677	36.991	100	857	46.002	100
F ⁻	0.01	0.12 ± 0.02	0.006	0.02	0.12 ± 0.02	0.006	0.01
Cl ⁻	0.02	27.5 ± 4.1	0.776	2.10	22.1 ± 3.3	0.623	1.34
SO ₄ ²⁻	0.1	1740 ± 261	36.227	97.81	2200 ± 330	45.805	98.58
HS ⁻	0.1	0.65 ± 0.06	0.020	0.05	0.51 ± 0.04	0.015	0.03
NO ₂ ⁻	0.05	<0.05	—	—	<0.05	—	—
NO ₃ ⁻	0.08	0.19 ± 0.04	0.003	0.01	0.10 ± 0.02	0.002	0.00
H ₂ PO ₄ ⁻	0.1	0.65 ± 0.13	0.008	0.02	1.19 ± 0.24	0.015	0.03
Сумма анионов	—	1770	37.040	100	2220	46.466	100
H ₄ SiO ₄ раств	0.02	150 ± 3	—	—	54.8 ± 1.0	—	—
Минерализация	—	2600	—	—	3130	—	—

Таблица 7. Окончание

Компоненты	ПО, мг/л	Дни					
		18			24		
		(С ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.	(С ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.
pH	—	3.25 ± 0.02			3.15 ± 0.02		
H ⁺	Расч.	0.56 ± 0.02	0.560	0.62	0.71 ± 0.02	0.710	0.61
Li ⁺	0.05	12.4 ± 2.5	1.787	1.98	12.8 ± 2.6	1.844	1.60
K ⁺	0.1	24.5 ± 3.9	0.627	0.69	21.9 ± 3.5	0.560	0.49
Na ⁺	0.5	108 ± 18	4.698	5.20	115 ± 20	5.002	4.33
NH ₄ ⁺	0.05	68.6 ± 24.0	3.801	4.20	90.0 ± 31.5	4.986	4.32
Ca ²⁺	1.0	1260 ± 88	62.874	69.53	1720 ± 120	85.828	74.34
Mg ²⁺	0.5	90.0 ± 6.3	7.401	8.19	99.0 ± 6.9	8.141	7.05
Fe _{общ} ³⁺	0.05	139 ± 24	7.465	8.26	131 ± 22	7.035	6.09
Co ²⁺	0.05	0.11 ± 0.03	0.004	0.00	0.46 ± 0.14	0.016	0.01
Cu ²⁺	0.05	0.06 ± 0.01	0.002	0.00	0.35 ± 0.08	0.011	0.01
Zn ²⁺	0.05	5.78 ± 1.16	0.177	0.20	10.2 ± 2.0	0.312	0.27
Mn ²⁺	0.05	27.9 ± 4.2	1.016	1.12	27.5 ± 4.1	1.001	0.87
Ni ²⁺	0.05	0.20 ± 0.03	0.007	0.01	0.35 ± 0.05	0.012	0.01
Pb ²⁺	0.05	0.16 ± 0.05	0.002	0.00	0.23 ± 0.07	0.002	0.00
Сумма катионов	—	1740	90.421	100	2230	115.460	100
F ⁻	0.01	0.17 ± 0.03	0.009	0.01	0.10 ± 0.02	0.005	0.00
Cl ⁻	0.02	30.7 ± 4.6	0.866	0.95	32.2 ± 4.8	0.908	0.77
SO ₄ ²⁻	0.1	4330 ± 650	90.2	99.02	5600 ± 840	116.594	
HS ⁻	0.1	0.48 ± 0.04	0.015	0.02	0.34 ± 0.03	0.010	99.19
NO ₂ ⁻	0.05	<0.05	—	—	<0.05	—	0.01
NO ₃ ⁻	0.08	0.13 ± 0.03	0.002	0.00	0.20 ± 0.04	0.003	—
H ₂ PO ₄ ⁻	0.1	<0.1	—	—	1.75 ± 0.35	0.022	0.00
Сумма анионов	—	4360	91.044	100	5630	117.542	0.02
H ₄ SiO ₄ раств	0.02	248 ± 4	—	—	76.0 ± 1.4	—	100
Минерализация	—	6350	—	—	7940	—	—

Таблица 8. Влияние условий анаэробной активации Паратунского пелоида на раствор лечебной грязи с течением времени, по результатам химического анализа ($P = 0.95$)

Компоненты	ПО, мг/л	Дни					
		6			12		
		(C ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.	(C ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.
pH	—	3.02 ± 0.02			3.58 ± 0.02		
H ⁺	Расчет	0.96 ± 0.02	0.950	5.01	0.26 ± 0.02	0.257	0.74
K ⁺	0.1	11.5 ± 1.8	0.294	1.55	13.3 ± 2.1	0.340	0.98
Na ⁺	0.5	72.8 ± 12.4	3.167	16.69	68.5 ± 11.6	2.980	8.57
NH ₄ ⁺	0.05	21.6 ± 7.6	1.197	6.31	62.9 ± 22.0	3.485	10.02
Ca ²⁺	1.0	160 ± 11	7.984	42.08	340 ± 24	16.966	48.78
Mg ²⁺	0.5	36.6 ± 4.0	3.012	15.88	59.6 ± 6.6	4.905	14.10
Fe _{общ}	0.05	40.0 ± 6.8	2.148	11.32	102 ± 17	5.478	15.75
Co ²⁺	0.05	<0.05	—	—	0.08 ± 0.02	0.003	0.01
Cu ²⁺	0.05	<0.05	—	—	<0.05	—	—
Zn ²⁺	0.05	0.16 ± 0.03	0.005	0.03	0.07 ± 0.01	0.002	0.01
Mn ²⁺	0.05	5.81 ± 0.87	0.212	1.11	9.94 ± 1.49	0.362	1.04
Ni ²⁺	0.05	0.12 ± 0.02	0.004	0.02	0.11 ± 0.02	0.004	0.01
Pb ²⁺	0.05	<0.05	—	—	0.13 ± 0.04	0.001	0.00
Сумма катионов	—	350	18.973	100	657	34.783	100
F ⁻	0.01	0.05 ± 0.01	0.003	0.01	<0.01	—	—
Cl ⁻	0.02	53.8 ± 8.1	1.509	8.05	42.5 ± 6.4	1.199	3.45
SO ₄ ²⁻	0.1	828 ± 124	17.239	91.93	1610 ± 242	33.521	96.54
HS ⁻	0.1	<0.1	—	—	<0.1	—	—
NO ₂ ⁻	0.05	<0.05	—	—	<0.05	—	—
NO ₃ ⁻	0.08	0.09 ± 0.02	0.001	0.01	0.19 ± 0.04	0.002	0.01
H ₂ PO ₄ ⁻	0.1	<0.1	—	—	<0.1	—	—
Сумма анионов	—	882	18.752	100	1653	34.722	100
H ₄ SiO ₄ _{раств}	0.02	110 ± 2	—	—	164 ± 3	—	—
Минерализация	—	1341	—	—	2474	—	—

Таблица 8. Окончание

Компоненты	ПО, мг/л	Дни					
		18			24		
		(С ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.	(С ± Δ) мг/л	мг-экв/л	%, экв.
pH	—	3.48 ± 0.02			2.98 ± 0.02		
H ⁺	Расч.	0.33 ± 0.02	0.327	0.74	2.01 ± 0.02	1.990	3.38
K ⁺	0.1	19.9 ± 3.2	0.509	1.15	29.1 ± 4.7	0.744	1.26
Na ⁺	0.5	69.9 ± 11.9	3.040	6.87	80.1 ± 13.6	3.484	5.91
NH ₄ ⁺	0.05	117 ± 41	6.482	14.66	157 ± 55	8.698	14.76
Ca ²⁺	1.0	440 ± 31	21.956	49.64	560 ± 39	27.944	47.43
Mg ²⁺	0.5	57.5 ± 6.3	4.733	10.70	81.5 ± 9.0	6.708	11.39
Fe _{общ}	0.05	125 ± 21	6.713	15.18	155 ± 26	8.324	14.13
Co ²⁺	0.05	0.11 ± 0.03	0.004	0.01	0.33 ± 0.10	0.011	0.02
Cu ²⁺	0.05	<0.05	—	—	0.065 ± 0.016	0.002	0.00
Zn ²⁺	0.05	0.10 ± 0.02	0.003	0.01	6.85 ± 0.69	0.209	0.36
Mn ²⁺	0.05	12.5 ± 1.9	0.455	1.03	21.5 ± 3.23	0.783	1.33
Ni ²⁺	0.05	0.14 ± 0.02	0.005	0.01	0.22 ± 0.03	0.007	0.01
Pb ²⁺	0.05	0.16 ± 0.05	0.002	0.00	0.92 ± 0.28	0.009	0.02
Сумма катионов	—	843	44.228	100	1095	58.915	100
F ⁻	0.01	0.03 ± 0.01	0.002	0.00	2.13 ± 0.32	0.112	0.19
Cl ⁻	0.02	46.3 ± 6.9	1.306	2.93	41.2 ± 6.2	1.162	1.97
SO ₄ ²⁻	0.1	2080 ± 312	43.306	97.07	2770 ± 416	57.672	97.83
HS ⁻	0.1	<0.1	—	—	<0.1	—	—
NO ₂ ⁻	0.05	<0.05	—	—	<0.05	—	—
NO ₃ ⁻	0.08	0.10 ± 0.02	0.001	0.00	0.23 ± 0.05	0.003	0.01
H ₂ PO ₄ ⁻	0.1	<0.1	—	—	<0.1	—	—
Сумма анионов	—	2126	44.615	100	2814	58.950	100
H ₄ SiO ₄ _{раств}	0.02	223 ± 4	—	—	569 ± 10	—	—
Минерализация	—	3192	—	—	4477	—	—

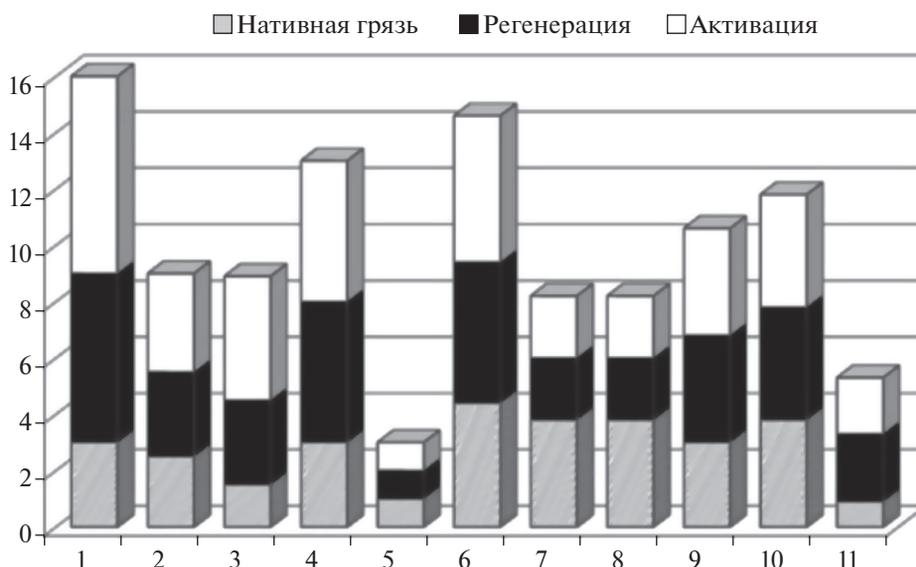


Диаграмма показателей состояния биотической функционально-экологической структуры пелоида в процессах экологической регенерации и активации. По оси абсцисс – физиологические группы: 1 – гнилостные аэробы (NH₃); 2 – гнилостные аэробы (H₂S); 3 – гнилостные анаэробы; 4 – денитрифицирующие N₂O-микроорганизмы; 5 – денитрифицирующие N₂-микроорганизмы; 6 – маслянокислые; 7 – целлюлозоразлагающие аэробы; 8 – целлюлозоразлагающие анаэробы; 9 – сульфатредуцирующие микроорганизмы; 10 – тионовые бактерии; 11 – плесневые грибы. По оси ординат – lg N (N – количество микроорганизмов в 1 г лечебной грязи).

лениями физиологической активности специфической микрофлоры лечебной грязи. Структурно-функциональная характеристика микробного сообщества закономерно изменяется в процессе активации лечебной грязи, являясь главным процессором изменений ее физико-химических и биологических свойств. В целом методика экологического активирования лечебной грязи с определением изменений ее физико-химических и микробиологических свойств – метод тестирования термоминеральных вод Паратунского гидротермального месторождения на токсические факторы Паратунской иловой сульфидной лечебной грязи.

ВЫВОДЫ

В ходе выполненной работы по исследованию действия термоминеральных вод на экологическое состояние лечебной грязи выявлено изменение физико-химических и микробиологических показателей пелоида.

Установлено угнетающее влияние токсических факторов Паратунской термоминеральной воды на развитие микробного сообщества в процессе экологической активации Паратунской иловой сульфидной лечебной грязи.

Установлено более угнетающее влияние термальной воды по сравнению с дистиллированной водой в аэробных и анаэробных условиях, которое выражается показателями общего числа микро-

организмов, а также динамикой физико-химических и химических свойств пелоида. Толерантность к токсическим факторам термоминеральной воды проявляют аммонифицирующие микроорганизмы, продолжающие минерализацию органического вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексин О.А., Семенов А.Ф., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
2. *Белова Т.П.* Экспериментальные исследования сорбционного извлечения бора и лития из термальных вод // Вулканология и сейсмология. 2017. № 2. С. 38–44.
3. *Латкин А.С., Лузин В.Е., Паршин Б.Е., Моргунов В.М., Басманов О.Л., Белова Т.П.* Способ извлечения кремнезема из геотермального теплоносителя. Патент № 2323889 РФ. 10.05.2008. Заявка № 2006124073/15 от 04.07.2006.
4. *Мурадов С.В.* Восстановление санитарно-микробиологических кондиций лечебной грязи в процессах регенерации и активации // Вестн. Московского гос. обл. ун-та. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 37–42.
5. *Мурадов С.В.* Микробиологические свойства и биомедицинское тестирование пелоидных препаратов из активированной лечебной грязи // Вестн. новых медицинских технологий. 2013. Т. 20. № 4. С. 38–41.
6. *Мурадов С.В.* Особенности формирования и экологического состояния биологических ресурсов

- иловой сульфидной лечебной грязи в условиях активного вулканизма на Камчатке. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МСХА, 2017. 47 с.
7. *Мурадов С.В.* Экологическое решение проблем современного грязелечения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2007. 266 с.
 8. *Мурадов С.В., Рогатых С.В.* Влияние гидротермальной активности на формирование грязелечебного месторождения "Озеро Утиное (Камчатка)" // Вода: химия и экология. 2017. № 9. С. 84–88.
 9. *Мурадов С.В., Хоменко А.И., Мудранова Л.А., Рогатых С.В.* Оценка влияния ионов токсичных металлов на микроорганизмы лечебной грязи // Фундаментальные исследования. 2014. № 3. Ч. 1. С. 109–114.
 10. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова М.: Академия, 2005. 608 с.
 11. *Разумов А.Н.* Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации. Методические указания № 2000/34 / Под ред. А.Н. Разумова. М.: РНЦ восстановительной медицины и курортологии, 2000. 150 с.
 12. РД 52.24.430-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-*n*-фенилендиамином. Ростов-на-Дону, 2010. 44 с.
 13. *Belova T.P.* The analysis of sorption extraction of boron and lithium from the geothermal heat-carriers // Proc. World Geothermal Congress. 2010.