

УДК 556.115:556.555.6:[574+579]

**ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ПАРАТУНСКОГО
ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
НА ЧИСЛЕННОСТЬ И ГЕОХИМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ
МИКРООРГАНИЗМОВ ИЛОВОГО СУЛЬФИДНОГО ПЕЛОИДА**

Мурадов С.В.

*Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: biolab@kscnet.ru*

Термоминеральные воды Паратунского гидротермального месторождения после отбора тепла сбрасываются в питающие воды грязелечебного месторождения и оказывают экологическое влияние на сообщество микроорганизмов донных грязе-иловых отложений. В настоящей работе приводятся данные по определению зависимости процессов развития микрофлоры пелоида от содержания тяжелых металлов в среде инкубирования. Различная концентрация тяжелых металлов достигается разведением термоминеральной воды Паратунского месторождения, содержащей эти вещества. Критерием устойчивости микроорганизмов к тяжелым металлам является рост численности микроорганизмов и их геохимическая активность в сравнении с контрольным вариантом разведения пелоида дистиллированной водой. При этом наблюдается процесс угнетения развития 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 общего числа микроорганизмов за счет анаэробных бактерий, но выработка сероводорода и аммиака снижается. Анаэробная часть микробного сообщества лечебной грязи более устойчива к факторам термальной воды. Разведение пелоида дистиллированной водой приводит к его обводнению и снижению содержания токсических факторов в пелоидном растворе, стимулирует размножение микроорганизмов и их геохимическую активность. Установлено, что применение 100%-ной термальной воды приводит к угнетению нарастания численности микроорганизмов и их геохимической активности, 25%-ная термальная вода стимулирует развитие микробного сообщества, создавая минеральную и микроэлементную подкормку, при этом активизируется и геохимическая активность микробного сообщества пелоида. Генезис исследуемого пелоида исторически был связан с термоминеральными водами, но в меньших концентрациях.

Ключевые слова: термальная вода, пелоид, микрофлора, численность, тяжелые металлы, геохимическая деятельность

**INFLUENCE OF MINERAL WATERS OF THE PARATUNSKY HYDROTHERMAL
DEPOSIT ON THE NUMBER AND GEOCHEMICAL ACTIVITY
OF MICROORGANISMS OF A SULPHIDE PELOID**

Muradov S.V.

*Scientific research geotechnological centre Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: biolab@kscnet.ru*

Thermomineral waters of the Paratunsk hydrothermal deposit, after the heat extraction, are discharged into the feeding waters of the mud-treatment deposit and exert an ecological influence on the community of microorganisms of the bottom mud-silt sediments. In the present work, data are given on the determination of the dependence of the development of the microflora of the peloid on the content of heavy metals in the incubation medium. A different concentration of heavy metals is achieved by diluting the thermomineral water of the Paratunsk deposit containing these substances. The criterion for the resistance of microorganisms to heavy metals is the growth of the number of microorganisms and their geochemical activity in comparison with the control variant of dilution of the peloid with distilled water. There is a process of inhibiting the development of microbial association when the peloid is activated with thermal water, but ammonifying microorganisms that continue to mineralize organic matter seem to have a certain tolerance for the thermal water factors. In the anaerobic process with thermal water, the total number of microorganisms increases due to anaerobic bacteria, but the production of hydrogen sulphide and ammonia decreases. The anaerobic part of the microbial community of therapeutic mud is more resistant to thermal water factors. Dilution of the peloid with distilled water leads to its watering and reduction of the content of toxic factors in the peloid solution, stimulates the multiplication of microorganisms and their geochemical activity. It has been established that the use of 100% thermal water leads to inhibition of the growth of the number of microorganisms and their geochemical activity, 25% thermal water stimulates the development of the microbial community, creating mineral and microelementary fertilizing, and the geochemical activity of the microbial community of the peloid is also activated. The genesis of the investigated peloid was historically associated with thermomineralic waters, but in lower concentrations.

Keywords: thermal water, peloid, microflora, abundance, heavy metals, geochemical activity

Термоминеральные воды Паратунского гидротермального месторождения Камчатского края после отбора тепла сбрасываются в питающие воды грязелечебного месторождения «озеро Утиное» и оказывают экологическое влияние на сообщество

микроорганизмов донных грязе-иловых отложений. Для изучения степени влияния термоминеральных вод Паратунского месторождения на микроорганизмы иловой сульфидной грязи и их геохимическую активность моделируется естественная среда пелоида с ускорением биологических процессов в процессе экологической активации. Экологическая активация (ЭА) пелоида заключается в комплексном изменении условий инкубирования, способствующих развитию микробного сообщества лечебной грязи путем ее перемешивания (150 об/мин), подогрева до 25 °С и аэрации продувкой воздухом. Аналогичные подходы биоиндикации могут осуществляться к исследованию почвы, воды, торфа, в которых контролируются биогеохимические процессы накопления тяжелых металлов [1–3].

Целью нашего исследования являлось изучение влияния термальной воды на динамику общей численности микроорганизмов (ОЧМ) пелоида и его физико-химических параметров (водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала, концентраций аммиака и сероводорода) в процессах аэробной и анаэробной активации.

Закономерности изменения процесса активации лечебной грязи по физико-химическим параметрам с определением общего числа микроорганизмов (рассчитывается прямым подсчетом), при сравнении с показателями общей микробной численности, определяемой по числу проросших колоний (КОЕ), показали сходимость результатов исследований [4; 5].

Уровень геохимической активности микробного сообщества пелоида устанавливается по изменению кислотно-щелочного равновесия, окислительного потенциала, содержания сероводорода и аммиака в грязевом растворе [6; 7].

Материалы и методы исследования

Определение сероводорода проводили согласно методике, представленной в ПНДФ 14.1:2.109-97 «Методика выполнения измерений массовых концентраций сероводорода и сульфидов в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином». Содержание аммиака определялось согласно методике, представленной в РД 52.24.486-2009 «Массовая концентрация аммиака и ионов аммония в водах. Методика выполнения измерений

фотометрическим методом с реактивом Несслера» [8; 9].

В соответствии с поставленными задачами был проведен эксперимент по экологической активации лечебной грязи с разведением термальной водой в аэробных и анаэробных условиях. Эксперимент был поставлен в трех вариантах:

1) лечебная грязь разводилась только бидистиллированной водой;

2) лечебная грязь разводилась только термальной водой Паратунского месторождения;

3) лечебная грязь разводилась термальной водой, разбавленной в соотношении 1:3 к дистиллированной.

Результаты исследования и их обсуждение

Изменения параметров лечебной грязи в процессе экологической активации с применением дистиллированной воды, термальной воды и ее 25 % разведения приведены на рис. 1–5.

При аэробной активации с дистиллированной водой динамика изменения значений ОЧМ показывает плавное нарастание численности микроорганизмов с последующей стадией снижения их численности ($50,6 \cdot 10^7$ – $99,31 \cdot 10^7$ – $46,2 \cdot 10^7$) (рис. 1, кривая А). Динамики изменения значений рН и Eh показывают противоположные векторы изменений. Кислотность среды плавно нарастает с 6,7 до уровня 3,94, рост Eh сохраняется до окончания эксперимента, достигая величины 226 mV (рис. 2, кривая А; рис. 3, кривая А).

При анаэробном варианте экологической активации с дистиллированной водой наблюдается следующая динамика изменений значений общего числа микроорганизмов: сначала численность клеток нарастает с $50,6 \cdot 10^7$ до $225,46 \cdot 10^7$ кл/г с последующим снижением численности до $56,36 \cdot 10^7$ кл/г, затем наблюдается новый этап роста значений ОЧМ до $169,1 \cdot 10^7$ кл/г (рис. 1, кривая Б). Динамика изменения значений рН показывает в первой половине эксперимента подкисление среды с 6,7 до 5,62, в последующем рН растет до значений 7,12, превышающих исходные (рис. 2, кривая Б). Значения Eh нарастают в ходе всего эксперимента с –122 до +196 (рис. 3, кривая Б). Содержание сероводорода в ходе эксперимента снижается до очень низких показателей, с 16,8 до 0,01 мг/дм³. Кривая концентрации аммиака снижается в начальные три дня эксперимента, затем отмечается его рост (183,0–63,0–90,0) мг/дм³ (рис. 4, кривая Б; рис. 5, кривая Б).

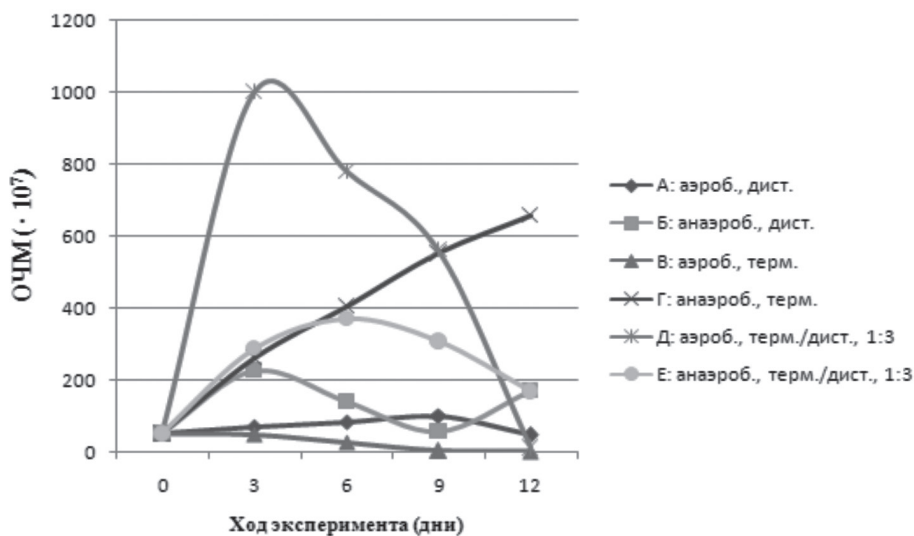


Рис. 1. Изменение общего числа микроорганизмов (кл/г) в аэробных и анаэробных условиях экологической активации с различным содержанием термальной и дистиллированной воды

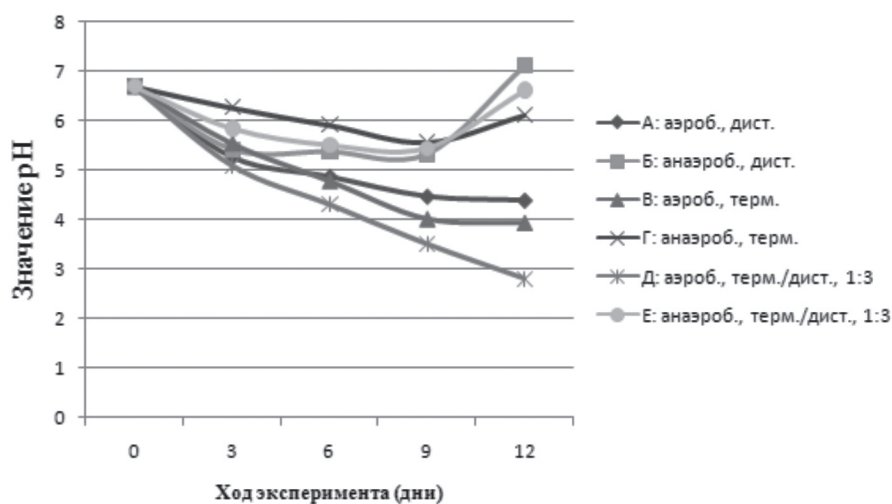


Рис. 2. Изменения показателей pH в аэробных и анаэробных условиях экологической активации с различным содержанием термальной и дистиллированной воды

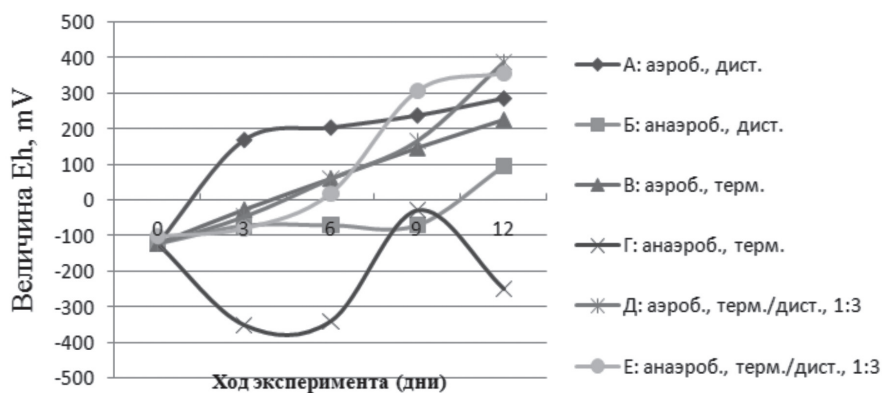


Рис. 3. Изменения показателей Eh в аэробных и анаэробных условиях экологической активации с различным содержанием термальной и дистиллированной воды

При аэробной активации с термальной водой динамика изменения значений общего числа микроорганизмов показывает плавное снижение численности микроорганизмов с $50,6 \cdot 10^7$ до $0,31 \cdot 10^7$ на протяжении всего хода эксперимента, что указывает на тормозящее действие термальной воды на развитие микробного сообщества в процессе экологической активации (рис. 1, кривая В). Динамика изменения значений pH и Eh показывает противоположные векторы изменений. Кислотность среды плавно нарастает с (6,7–3,94) до 9-го дня эксперимента (рис. 2, кривая В).

Положительное значение окислительно-восстановительного потенциала нарастает до окончания эксперимента (рис. 3, кривая В).

При аэробной активации пелоида с разведением термальной водой динамика содержания сероводорода показывает резкое снижение его концентрации ($16,8-0,3$) мг/дм³, и после 5-го дня эксперимента содержание сероводорода становится ниже определяемого уровня (рис. 4, кривая Б) Концентрация аммиака постоянно нарастает, сохраняя высокий уровень до окончания эксперимента ($183,0-249,0$) мг/дм³ (рис. 5, кривая В).

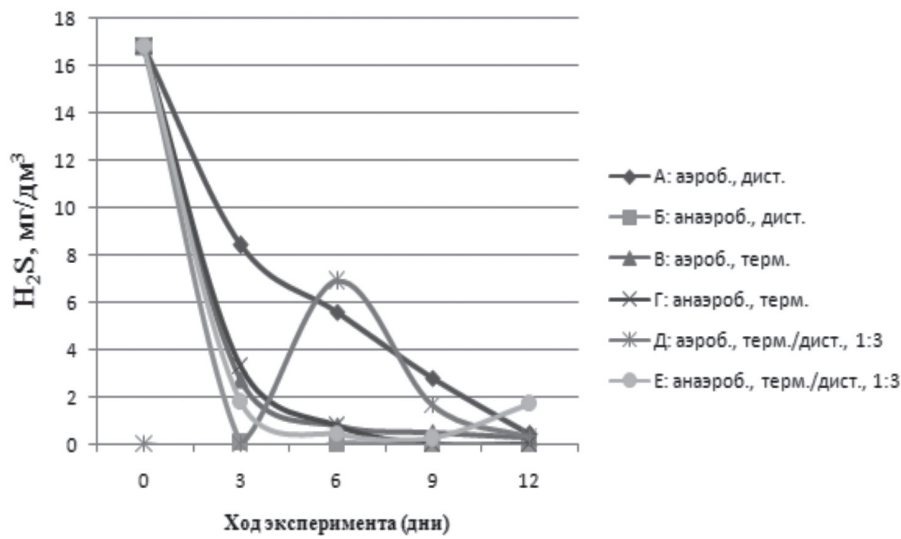


Рис. 4. Выделение сероводорода в аэробных и анаэробных условиях экологической активации с различным содержанием термальной и дистиллированной воды

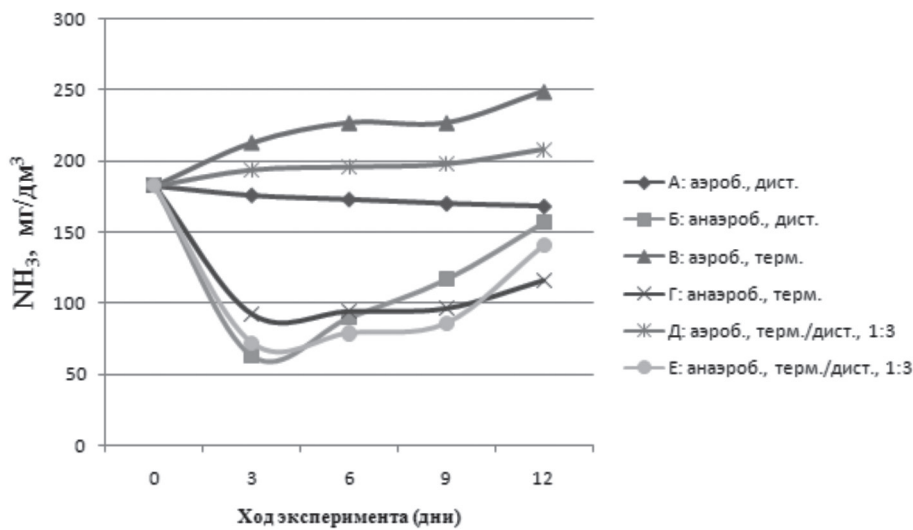


Рис. 5. Выделение аммиака в аэробных и анаэробных условиях экологической активации с различным содержанием термальной и дистиллированной воды

При анаэробной активации пелоида (с разведением термальной водой) динамика изменения значений ОЧМ показывает плавное нарастание численности микроорганизмов с $50,6 \cdot 10^7$ – $656,26 \cdot 10^7$, сохраняющееся до окончания эксперимента (рис. 1, кривая Г). Содержание сероводорода плавно снижается (рис. 4, кривая Г). Содержание аммиака снижается к середине эксперимента и обнаруживает тенденцию к росту с $183,0$ – $94,0$ – $116,0$ мг/дм³ после восьмого дня наблюдений (рис. 5, кривая Г).

В случае аэробной активации лечебной грязи при 25% разведении термальной водой динамика изменения значений ОЧМ показывает период бурного роста с $50,6 \cdot 10^7$ до $1001 \cdot 10^7$, стационарного развития и угнетения в последние четыре дня наблюдений до $10,78 \cdot 10^7$ (рис. 1, кривая Д). Общее число микроорганизмов быстро нарастает и сохраняется на стационарном уровне, возвращаясь с восьмого дня активирования к исходной численности в начале эксперимента. Значения pH и Eh в этом опыте оказываются в противоположных фазах изменений, pH с 6,7 до 2,82, Eh с -122 до $+390$ mV (рис. 2, кривая Д; рис. 3, кривая Д). Содержание сероводорода снижается с $16,8$ до $0,3$ мг/дм³, содержание аммиака также увеличивается с $183,0$ до $208,0$ мг/дм³ (рис. 4, кривая Д; рис. 5, кривая Д).

В анаэробной части эксперимента с данным разведением термальной водой наблюдается высокий уровень ОЧМ стационарной фазы развития, на уровне $371,7 \cdot 10^7$ (рис. 1, кривая Е). Значения показателей сероводорода и аммиака, снижаясь к середине эксперимента, растут к окончанию опыта (рис. 4, кривая Е; рис. 5, кривая Е).

Полученные данные по влиянию разведений пелоида термальной водой перед его экологической активацией показывают отчетливую реакцию важнейших параметров пелоида [10]: общего числа микроорганизмов, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала, содержанию сероводорода и аммиака, связанных с геохимической деятельностью автохтонной микрофлоры лечебной грязи. Анализ итогов процессов экологической активации с дистиллированной, термальной и 25%-ной термальной водой в аэробных и анаэробных условиях показывает угнетающее влияние термальной воды по сравнению с активацией с бидистиллированной водой, что выражается уровнем общего числа микроорганизмов, характером его динамики, а также динамикой физико-хими-

ческих показателей. Наблюдается процесс угнетения развития 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 общего числа микроорганизмов за счет анаэробных бактерий, но выработка сероводорода и аммиака снижается. Анаэробная часть микробного сообщества лечебной грязи более устойчива к факторам термальной воды.

Заключение

Пелоид, разведенный в 25%-ной термальной воде, разбавленной бидистиллированной водой, в процессе аэробной активации по исследуемым параметрам показывает стабильно высокий уровень значений общего числа микроорганизмов, снижение величины и затем возрастание значений Eh и pH. Содержание сероводорода с содержанием аммиака со сдвигом в фазе снижаются и повышаются к концу наблюдений (колебания значений параметров составляют более 150%). Процесс аналогичен активации с разведением пелоида бидистиллированной водой, но более динамичен по развитию микробного сообщества и минерализации органического вещества. В анаэробной части эксперимента с данным разведением термальной водой наблюдаются высокие показатели ОЧМ в стационарной фазе развития. Значения параметров H_2S и NH_3 , снижаясь к середине эксперимента, растут к окончанию опыта (рис. 4, кривая Е; рис. 5, кривая Е).

Таким образом, установлено угнетающее влияние факторов термальной воды на развитие микробного сообщества в процессе экологической активации пелоида. Термальная вода с разведением до 25% бидистиллированной водой стимулирует развитие микробного сообщества лечебной грязи благодаря содержащимся минеральным факторам и низкой дозе токсических веществ, функционирующих в качестве микроэлементов. Этот эффект заложен в генозисе иловой сульфидной лечебной грязи в связи с исторически сложившимся взаимодействием с термальными ключами Паратунской курортной зоны Камчатки.

Список литературы

1. Мурадов С.В., Хоменко А.И. Восстановление физико-химических и микробиологических кондиций лечебной

грязи озера Утиное. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2014. – 148 с.

2. Шулькин В.М., Чернова Е.Н., Христофорова Н.К., Коженкова С.И. Влияние горнорудной деятельности на изменение химического состава компонентов водных экосистем // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2014. – № 6. – С. 483–494.

3. Чаков В.В., Завгородуко В.Н. Торфяные ресурсы Приамурья и их использование в пелоидотерапии. – Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2008. – 127 с.

4. Мурадов С.В., Мудранова Л.А., Хоменко А.И., Рогатых С.В. Влияние эксплуатации геотермального месторождения на экологическое состояние лечебной грязи // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 3. – С. 99–103.

5. Kuenen J.G., Robertson L.A., Gemerden H. Microbial interactions among and anaerobic sulfur oxidizing bacteria // Adv. Microbiol. Ecol. 1985. No. 8. P. 1–59.

6. Braun V. Energy-coupled transport and signal transduction through the Gram-negative outer membrane via TonB-ExbB-ExbD dependent receptor proteins // FEMS Microbiol. Rev. 1995. No. 16. P. 295–307.

7. Sorokin D.Y., Banciu H.L., Muyzer G. Functional microbiology of soda lakes // Current Opinion in Microbiology. 2015. V. 25. P. 88–96.

8. Боева Л.В. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. – Ростов н/Д.: НОК, 2009. – 21 с.

9. Ступникова Н.А. Экологические способы преобразования пелоида при антропогенном загрязнении // Вестник КГТУ. – 2011. – № 15. – С. 65–71.

10. Алексеев В.С., Грабовников В.А., Клюквин А.Н., Пашковский И.С., Рошаль А.А. О готовности к практическому применению новой «Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод» // Недропользование XXI век. – 2008. – № 4. – С. 36–41.

References

1. Muradov S.V., Khomenko A.I. Vosstanovlenie fiziko-khimicheskikh i mikrobiologicheskikh konditsii lechebnoi griazi ozera Utinoe [Restoration of physico-chemical and microbiological conditions of therapeutic mud of Lake Utynoye]. Petropavlovsk-Kamchatsky, KamGU im. Vitusa Beringa, 2014, 148.

2. Shul'kin V.M., Chernova E.N., Khristoforova N.K., Kozhenkova S.I. Influence of mining activity on changes in the chemical composition of components of aquatic ecosystems [Vliianie gornorudnoi deiatel'nosti na izmenenie khimicheskogo sostava komponentov vodnykh ekosistem]. Geoekologiya, inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya – Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology, 2014, no. 6, pp. 483–494.

3. Chakov V.V., Zavgorud'ko V.N. Torfiane resursy Priamur'ia i ikh ispol'zovanie v peloidoterapii [Peat resources of Priamurye and their use in peloid therapy]. Khabarovsk, IVEP DVO RAN, 2008, 127.

4. Muradov S.V., Mudranova L.A., Khomenko A.I., Rogatykh S.V. Effect of geothermal field operation on the ecological state of therapeutic mud [Vliianie ekspluatatsii geotermal'nogo mestorozhdeniia na ekologicheskoe sostoianie lechebnoi griazi]. Problemy regional'noi ekologii – Problems of regional ecology, 2014, no. 3, pp. 99–103.

5. Kuenen J.G., Robertson L.A., Gemerden H. Microbial interactions among and anaerobic sulfur oxidizing bacteria. Adv. Microbiol. Ecol., 1985, no. 8, pp. 1–59.

6. Braun V. Energy-coupled transport and signal transduction through the Gram-negative outer membrane via TonB-ExbB-ExbD dependent receptor proteins. FEMS Microbiol. Rev., 1995, no. 16, pp. 295–307.

7. Sorokin D.Y., Banciu H.L., Muyzer G. Functional microbiology of soda lakes. Current Opinion in Microbiology, 2015, no. 25, pp. 88–96.

8. Boeva L.V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi [Guidelines for the chemical analysis of surface waters]. Rostov-on-Don, NOK, 2009, 21.

9. Stupnikova N.A. Ecological ways of transformation of a peloid at anthropogenous pollution [Ekologicheskie sposoby preobrazovaniia peloida pri antropogennom zagriaznenii]. Vestnik KGTU – Bulletin of KSTU, 2011, no. 15, pp. 65–71.

10. Alekseev V.S., Grabovnikov V.A., Kliukvin A.N., Pashkovskii I.S., Roshal' A.A. About readiness for practical application of the new «Classification of reserves and forecasted resources of drinking, technical and mineral groundwater» [O gotovnosti k prakticheskomu primeneniiu novoi «Klassifikatsii zapasov i prognoznykh resursov pit'evykh, tekhnicheskikh i mineral'nykh podzemnykh vod»]. Nedropol'zovanie XXI vek – Subsoil use of the XXI century, 2008, no. 4, pp. 36–41.