

Н. Г. Максимович<sup>1</sup>, В. Т. Хмурчик<sup>1</sup>, М. А. Лаздовская<sup>2</sup>, А. Д. Деменев<sup>2</sup>

## КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ

<sup>1</sup> Естественно-научный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Российская Федерация, 000000, город, ул. дом

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Микроорганизмы способны изменять компоненты геологической среды. В теле одной из грунтовых плотин Волжско-Камского каскада обнаружены признаки повышенной активности микробиоты. Предлагается комплекс методов исследований для оценки интенсивности протекания микробиологических процессов и их влияния на безопасность эксплуатации гидротехнических сооружений. Вода, фильтрующаяся через плотину, характеризовалась повышенным содержанием водорастворенного органического вещества техногенного происхождения. Были обнаружены зоны с повышенным содержанием ионов  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{Fe}^{2+}$ . В донных отложениях дренажных колодцев выявлены новообразования кальцита и пирита, а в составе газов колодцев обнаружены метан, углеводороды  $\text{C}_1$ – $\text{C}_5$ , летучие органические соединения и углекислый газ. Лабораторные эксперименты с образцами грунта плотины показали, что активизация жизнедеятельности микроорганизмов в грунте может привести к изменению его физико-механических свойств и, таким образом, повлиять на устойчивость плотины. Библиогр. 24 назв. Ил. 5. Табл. 1.

*Ключевые слова:* основание плотины, подземные воды, водорастворенное органическое вещество, микробиологические процессы, газообразование, устойчивость плотины.

### THE COMPLEX OF RESEARCH METHODS TO STUDY MICROBIOLOGICAL ACTIVITY IN GROUND DAMS

*N. G. Maksimovich<sup>1</sup>, V. T. Khmurchik<sup>1</sup>, M. A. Lazdovskaya<sup>2</sup>, A. D. Demenev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Российская Федерация, 000000, город, ул. дом

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Microorganisms can change the components of geological environment. The signs of intensified microbiological activity were revealed in the body of the dam of Kama-Volga Dams Cascade. A complex of research methods was offered to evaluate the intensity of microbiological processes and their influence on the dam. The water, filtering through the dam, was characterized by increased content of dissolved organic matter of technogenic origin. Zones with heightened concentrations of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  and  $\text{Fe}^{2+}$  ions were found. Sediments of drainage wells contained newly-formed calcite and pyrite. Methane,  $\text{C}_1$ – $\text{C}_5$  hydrocarbons, volatile organic compounds and carbon dioxide were found in gases of the wells. Laboratory experiments with soil samples of the dam revealed that enhancement of microbial activity in the ground may change its physical-mechanical properties and thus influence on the dam stability. Refs 24. Figs 5. Table 1.

*Keywords:* dam base, groundwaters, dissolved organic matter, microbiological processes, generation of gases, migration of ions, oxidative geochemical barrier, stability of dam.

Микроорганизмы широко распространены в грунтах разного генезиса и состава. Особенности физиологии микроорганизмов, их способность воздействовать на минералы, органические и неорганические вещества обуславливают их значительное влияние на свойства грунтов, минеральный состав, структуру, дисперсность, напряженное состояние и другие параметры [1–5]. Деятельность микроорганизмов

может приводить к изменению механических показателей грунтов, мобилизации и выносу вещества из них за счет следующих процессов и факторов: образования газов, которые изменяют напряженное состояние грунтов и вызывают их разрыхление; выноса из грунтов отдельных элементов, что приводит к разрушению их минерального скелета и снижению механической прочности; изменения микроагрегатного и химического составов грунтов, диспергации глинистых агрегатов, повышения гидрофильности и в результате ухудшения прочностных и деформационных свойств грунтов; выделения микроорганизмами экзометаболитов, проявляющих поверхностно-активные свойства и снижающих прочность структурных связей в грунтах [6–10]. Значение микробиологической деятельности может существенно возрасти при техногенном воздействии на грунт.

Несмотря на значительное количество публикаций по данной проблеме [11–17] до настоящего времени не разработан единый подход к оценке активности микробиоты грунтов, подвергающихся техногенному воздействию. Авторы сочли возможным внести свой вклад в решение этого вопроса.

Целью работы являлась разработка комплекса полевых и лабораторных методов исследования, который позволяет определить вероятные направления протекания биогеохимических процессов в случае активизации микробиоты и спрогнозировать изменение состояния и свойств грунтов для разработки адекватных мер по обеспечению безопасности инженерных сооружений.

### **Объект и методы исследований**

Исследования проводились на одной из грунтовых плотин Камско-Волжского каскада, где в водах дренажной системы появились признаки активизации микробиоты и наблюдался вынос минеральных частиц, превышающий в несколько раз нормативные значения. Для оценки степени опасности микробиологических процессов был проведен комплекс исследований, включавший стандартный гидрохимический анализ, хромато-масс-спектрометрический анализ водорастворенного органического вещества, газеохимическое опробование состава подпочвенных газов и газов дренажных колодцев, исследования физико-механических свойств грунтов, минералогический анализ новообразований из дренажной системы плотины и лабораторные модельные микробиологические исследования вод и грунтов, расчет устойчивости плотины и оценку ее изменения под влиянием микробиологической деятельности.

Виды и назначение каждого исследования в общем комплексе методов приведено в табл.

### **Методика и результаты исследований**

Пробы воды отбирались из сети наблюдательных скважин, систем вертикального, горизонтального дренажа и верхнего бьефа водохранилища. Всего было отобрано 48 проб воды, фильтрующейся через тело плотины, и 8 проб воды из водохранилища. Стандартные гидрохимические исследования проводили по общепринятым методикам. Они показали, что на сравнительно небольшой площади исследований химический состав воды в теле плотины имеет довольно пеструю картину. Так, очаговый характер распространения проявили ионы аммония (максимальное содержание до 21,6 мг/дм<sup>3</sup>), нитрит- и нитрат-ионы (максимальное содержание до

**Комплекс исследований активности микробиоты**

<b>Метод исследования</b>	<b>Назначение</b>
<i>Полевые исследования</i>	
Опробование дренажной системы плотины и сети скважин	Оценка общей гидрохимической обстановки
Отбор отложений из дренажной системы плотины	Получение представлений о характере выносимого вещества
Отбор образцов грунтов ненарушенной структуры	Определение свойств грунтов и их изменения под воздействием микробиологических процессов
Газогеохимическая съемка — определение содержания $\text{CH}_4$ , углеводородных газов $\text{C}_2\text{--C}_5$ , летучих органических соединений и $\text{CO}_2$ в дренажной системе и почвогрунтах	Обнаружение зон вероятной микробиологической активности; определение геохимической обстановки и направленности протекания микробиологических процессов
<i>Лабораторные исследования</i>	
Химический анализ проб воды — определение содержания ионов-индикаторов микробиологических процессов — $\text{HCO}_3^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{HS}^-$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{Fe}^{2+}$ , pH	Обнаружение зон вероятной микробиологической активности
Химический анализ водорастворенного органического вещества (аквабитуминологический анализ)	Выявление источника поступления; определение доступности органического вещества для микроорганизмов по степени его преобразованности и состава
Минералогический анализ проб грунта и отложений дренажной системы: – анализ фракционного состава, – оптические методы, – рентгено-дифрактометрический анализ	Обнаружение новообразованных минералов и минералов — индикаторов микробиологических процессов; определение направленности протекания микробиологических процессов
Исследование свойств грунтов: – определение физических характеристик грунтов (естественная влажность, плотность, плотность минеральной части грунта, плотность скелета грунта, коэффициент пористости); – определение прочностных и деформационных свойств грунтов (удельное сцепление грунта, угол внутреннего трения, модуль деформации); – определение степени набухания грунта	Определение актуального состояния грунта; оценка устойчивости сооружения
<i>Экспериментальные исследования</i>	
Исследование свойств грунта после воздействия активизированной микробиоты: – определение химического состава, – определение газогенерирующей способности (потенциала), – определение набухаемости, – компрессионные испытания, – сдвиговые испытания	Анализ изменений химического состава грунта; выявление преобразованных и новообразованных минералов; определение газогенерирующей способности грунта в зависимости от состава и количества поступающих в него веществ; прогноз устойчивости инженерного сооружения

4,6 и 3,3 мг/дм<sup>3</sup>, соответственно), а также ионы Fe<sup>2+</sup> (максимальное содержание до 19,8 мг/дм<sup>3</sup>) (рис. 1а-г). При этом очаг распространения повышенного содержания в воде ионов аммония примерно совпадал с очагом повышенного содержания ионов Fe<sup>2+</sup>. Содержание гидрокарбонат-ионов в этой зоне также было повышенным (до 366,1 мг/дм<sup>3</sup>) (рис. 1д), в то время как вне нее оно в среднем составляло 207 мг/дм<sup>3</sup>.

Анализ содержания и состава водорастворенного органического вещества в пробах воды из дренажной системы плотины проводили на хромато-масс-спектрометрической системе «Agilent 6890/5973 N» («Agilent technologies», США).

Основной группой гексановой фракции аквабитумоидов были кислород-содержащие соединения — простые и сложные эфиры: оксираны, алкилзамещенные 1,3-диоксаны и фталаты, суммарное содержание которых во фракции достигало 47%. Эфиры карбоновых кислот были представлены низкомолекулярными гомологами с длиной углеродной цепи C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub>. Галогенированные и оксигалогенированные углеводороды, составляющие около 16% фракции, были также представлены легкими гомологами. Углеводородные структуры, составляющие 4,8–12,8% фракции, были представлены в основном алифатическими структурами (n-алканами с длиной углеродной цепи C<sub>12</sub>, C<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, C<sub>19</sub>), изопреноидами (фарнезаном, пристанном, фитаном) и алкенами. Нафтенковые структуры присутствовали в подчиненных количествах (0,9–1,4% фракции). Среди полифункциональных гетеросоединений (N+O- и N+O+S-содержащих) выделялись изоцианаты и изотиоцианаты ряда C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub>, на долю которых приходилось более 18% фракции. Основной особенностью водорастворенного органического вещества являлся его неуглеводородный характер: содержание хлороформенных аквабитумоидов было 1,1–1,6 мг/дм<sup>3</sup>, а нефтепродуктов — менее 0,07 мг/дм<sup>3</sup>.

Первичное натурное обследование плотины выявило в ряде колодцев дренажной системы выделение газов в свободном виде, в связи с чем было проведено газогеохимическое опробование плотины с использованием переносного экспресс-газоанализатора «EcoProbe-5» («RS Dynamics», Республика Чехия). Для исследования состава подпочвенных газов проводили шпуровую съемку по средней линии нижнего бьефа плотины (глубина шпуров 0,5–0,7 м, расстояние между шпурами 10 м).

Опробование состава газов выявило совпадение трендов распространения метана (среднее содержание 58,5 мг/м<sup>3</sup>) и углеводородных газов C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub> (среднее содержание 37,5 мг/м<sup>3</sup>); тренды распространения летучих органических соединений (среднее содержание 5,5 мг/м<sup>3</sup>) и углекислого газа (среднее содержание 483,1 мг/м<sup>3</sup>) имели обратный характер (рис. 2).

Отобраны также пробы отложений дренажных колодцев. Исходный материал представлял собой песок мелко-, среднезернистый светло-серого цвета с крупными, более 1 мм, выделениями гидроокислов железа.

Проводился полный минералогический анализ отложений из дренажной системы плотины (с рассевом на ситах на гранулометрические фракции: +1,0; 1,0–0,5; 0,5–0,25; 0,25–0,1 и менее 0,1 мм) с выделением монофракций минералов. Дифрактометрические исследования выполняли на приборе «D2 Phaser» («Brucker», США). Гранулометрические фракции подвергались также оценочному просмотру под бинокулярным микроскопом.

Анализ показал преобладание в отложениях дренажной системы минералов аутигенного комплекса (кальцит, аморфные гидроокислы железа, гетит, гидрогетит,

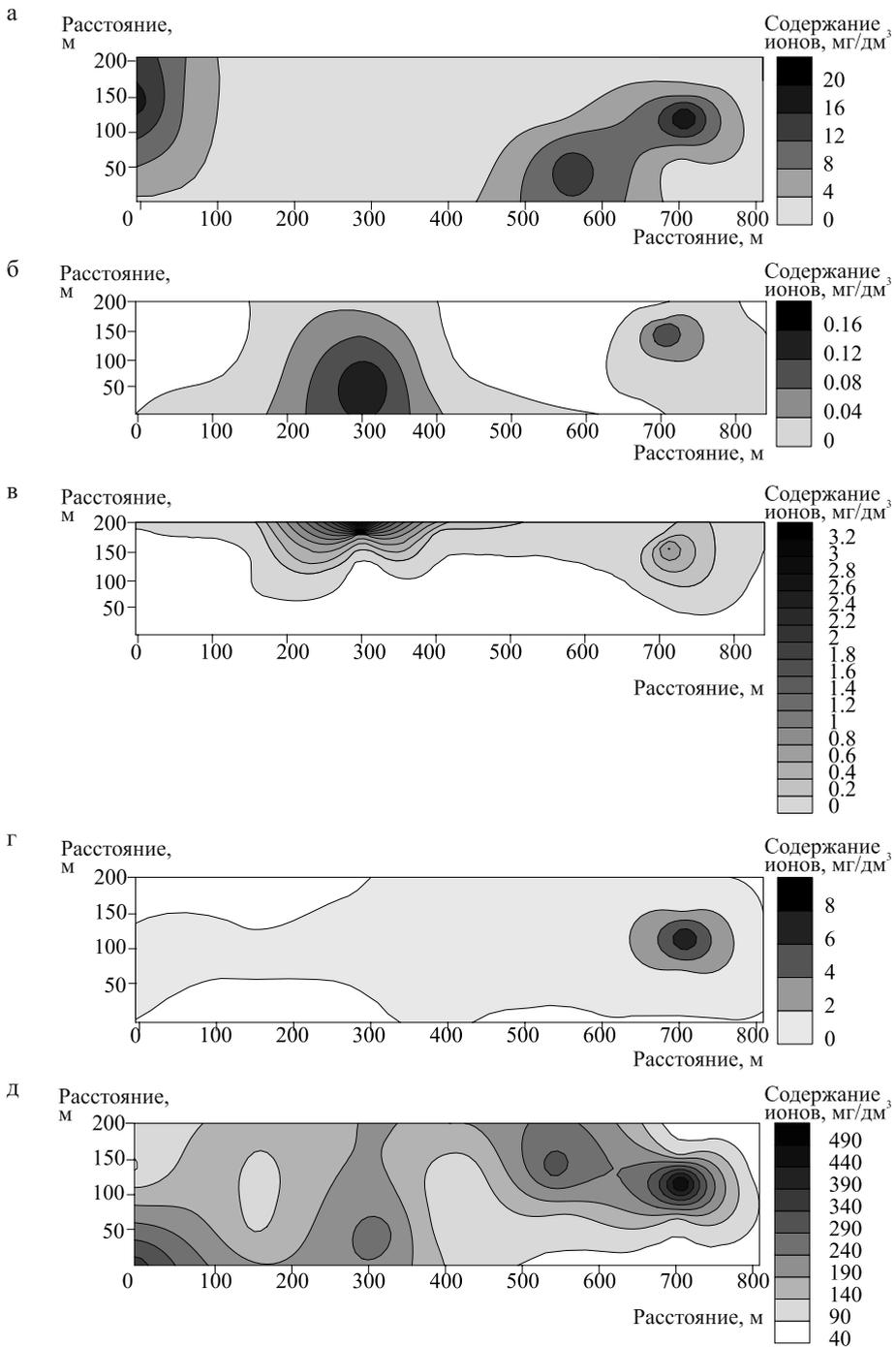


Рис. 1. Содержание отдельных ионов в пробах воды

а — ионы аммония; б — нитрит-ионы; в — нитрат-ионы; г — ионы Fe<sup>2+</sup>; д — гидрокарбонат-ионы

пирит) над минералами аллотигенного комплекса (кварцевые минералы). В отложениях были обнаружены пирит-кварцевые агрегаты, представленные обломками кварцевых минералов, скрепленными новообразованным пиритом [18] в одном общем центре. Кальцит представлял собой агрегаты ( друзы) разноориентированных кристаллов размером до 0,4 мм. Наблюдались также сростания новообразованных зерен кальцита и пирита (рис. 3).

Комплекс исследований включал колонковое бурение трех скважин на глубину до 20,0 м, на которой залегает аллювиальный горизонт, подстилающий подошву тела

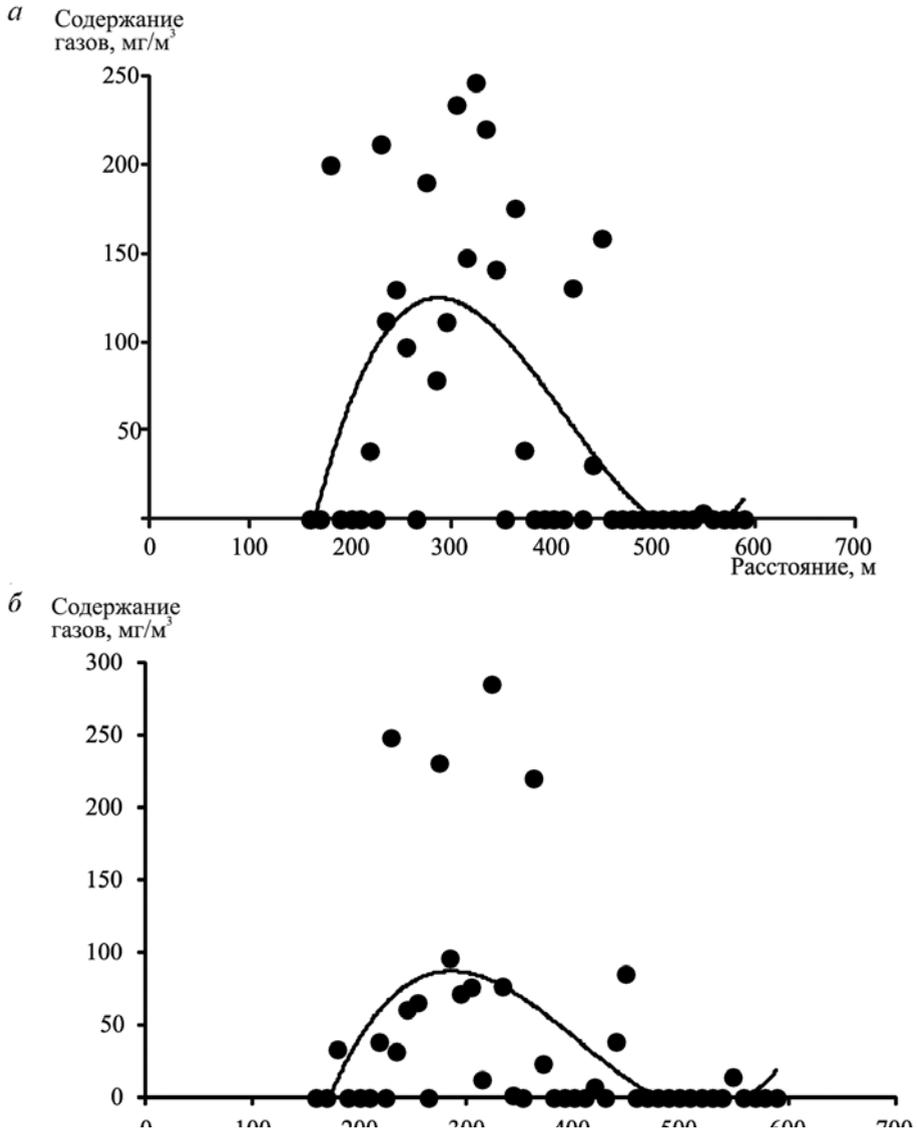


Рис. 2. Состав подпочвенных газов

а — метан; б — углеводородные газы C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub>; в — летучие органические соединения; г — углекислый газ

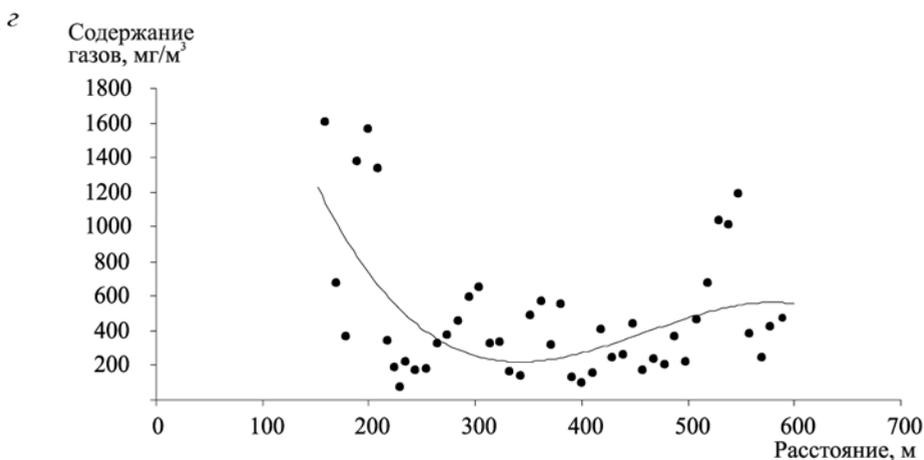
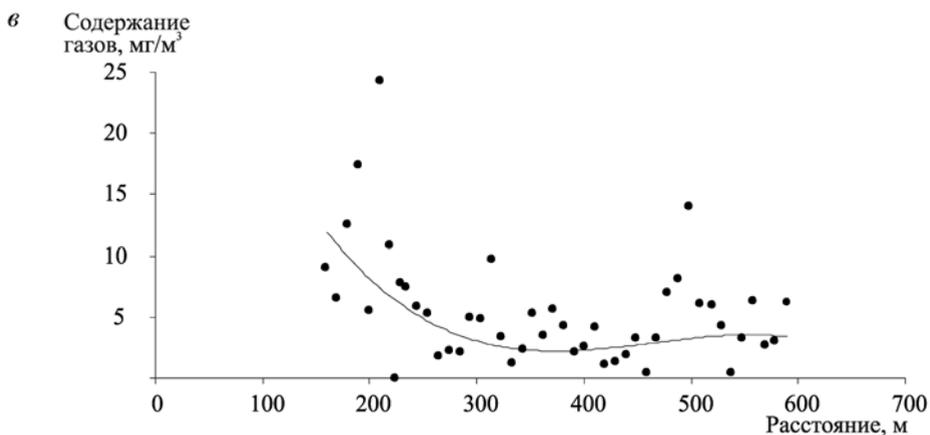


Рис. 2. Окончание

плотины. В процессе проведения буровых работ были отобраны образцы грунтов ненарушенной структуры. По данным лабораторных испытаний, в строении тела плотины в основном принимают участие глинистые грунты — суглинки тяжелые пылеватые с плотностью 1,96 г/см<sup>3</sup>, силой сцепления 15 кПа, углом внутреннего трения 11° и модулем деформации 5,1 МПа, и глины легкие пылеватые, плотность которых составила 1,98 г/см<sup>3</sup>, сила сцепления 10 кПа, угол внутреннего трения 10°, модуль деформации 2,1 МПа. Глинистые грунты тела плотины обладают высокой физико-химической активностью, содержат в значительном количестве органические вещества (до 8%), микроэлементы и соединения, которые могут служить субстратом для бактерий. Данные особенности позволяют утверждать, что наиболее интенсивные изменения под действием микробиологических процессов происходят именно в этих слоях грунтов.

Лабораторные экспериментальные исследования последствий активизации микробиоты плотины выполнены на образцах грунта, отобранных в ходе полевых работ. Исследования изменения химического состава грунта и его газогенерирующей способности (потенциала) проводили на образцах с нарушенной структурой,

а исследования набухаемости грунтов и их физико-механических свойств — на образцах с ненарушенной структурой. Изменение химического состава грунта отслеживали по количеству железа, перешедшего в раствор, содержащий питательные вещества для микроорганизмов грунта; изменение газогенерирующей способности (потенциала) определяли по объему выделившихся газов при добавлении к грунту растворов, содержащих различные питательные вещества для микроорганизмов, а также вещества, подавляющие их жизнедеятельность. Исследование изменения величины набухаемости грунта проводили с использованием Прибора «ПСНГ для определения свободного набухания грунта» (ООО «Щёкино-ВНИР», Российская Федерация), заливая опытные образцы раствором, содержащим питательные вещества для микроорганизмов, а контрольные образцы — дистиллированной водой. Исследование изменения физико-механических свойств грунтов при компрессионных и сдвиговых испытаниях проводили по стандартным методикам после обработки образцов грунта накопительными культурами микроорганизмов в аэробных и анаэробных условиях в течение 14 и 28 суток.

Исследования показали присутствие в грунтах тела плотины жизнеспособного микробного сообщества, оказывающего влияние на жидкую, твердую и газовую фазы грунта при активизации жизнедеятельности. Так, результатом активизации жизнедеятельности микроорганизмов являлся вынос из грунта атомов железа в количестве 0,2–2,8% от их общего содержания при продолжительности эксперимента 57–62 суток.

Добавление в суглинок тяжелый легкодоступного для микроорганизмов органического вещества (глюкозы) вызывало газообразование, возрастающее при добавлении нитрат-ионов, которые могли использоваться микроорганизмами как альтернативные акцепторы электронов (в добавление к кислороду, присутствующему в воздухе и растворенному в воде) при разложении органических веществ (рис. 4).

Добавление к опытному образцу грунта раствора питательных для микроорганизмов веществ вызывало также и значительное увеличение абсолютного набухания по сравнению с контрольным образцом (рис. 5).

Для оценки влияния микробиологических процессов на механические свойства проводились сдвиговые и компрессионные испытания грунтов тела грунтовой плотины после бактериальной обработки с параллельным определением физических характеристик (естественная влажность, плотность и коэффициент пористости). Показатели механических свойств грунтов после бактериальной обработки сопоставлялись с исходными показателями. Было отмечено различное воздействие микроорганизмов на физико-механические свойства грунтов. Так, например, у суглинка тяжелого значительно уменьшилась плотность грунта (до  $1,86 \text{ г/см}^3$ ) и увеличилась

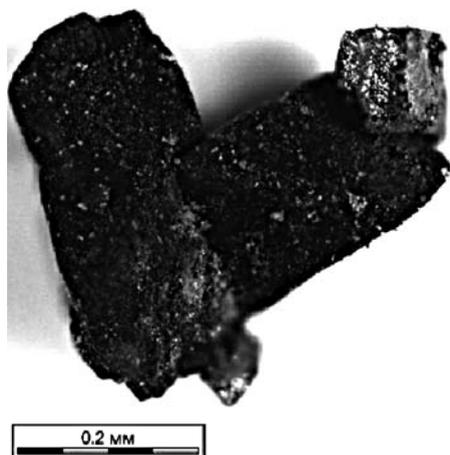


Рис. 3. Срастание зерен кальцита и пирита в осадке, образующемся в дренажных колодцах

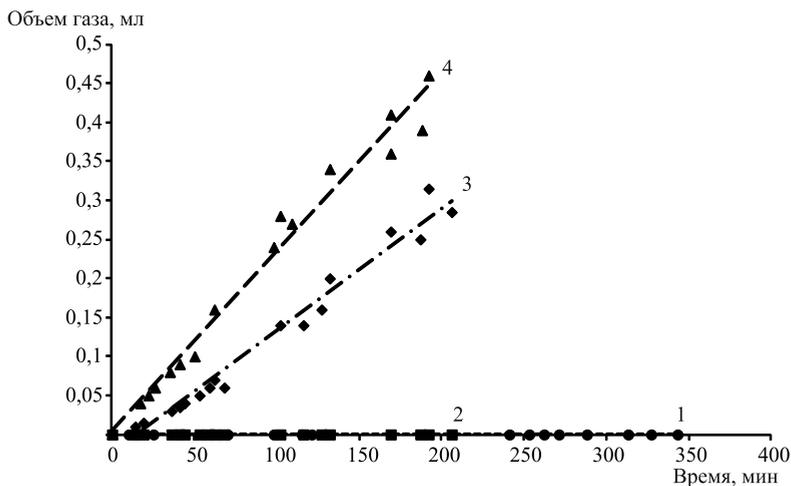


Рис. 4. Газообразование в грунте при добавлении разных веществ:  
 1 — раствор 0,01% глюкозы и 0,5% фенола; 2 — дистиллированная вода; 3 — 0,01% раствор глюкозы; 4 — раствор 0,01% глюкозы и 0,1% нитрата калия.

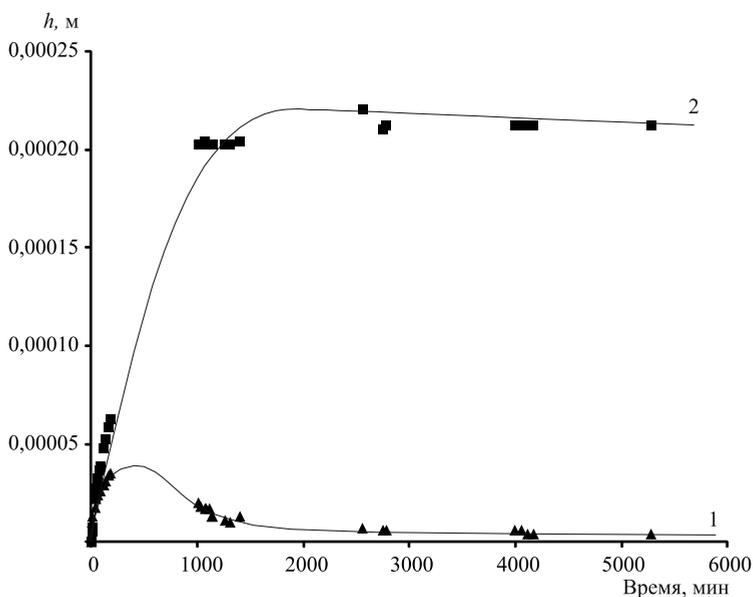


Рис. 5. Изменение абсолютного набухания грунта (суглинков тяжелых)  
 1 — контрольный образец; 2 — опытный образец.

пористость, что, скорее всего, связано с газами, которые генерируют бактерии в процессе жизнедеятельности. Отмечается значительное снижение силы сцепления грунта (до 5 кПа). Модуль деформации и сила сцепления легкой глины несколько увеличились, в то время как угол внутреннего трения уменьшился. Необходимо отметить, что снижение показателей физико-механических свойств грунтов вслед-

ствие микробиологических процессов ведет к возникновению риска потери устойчивости инженерного сооружения. По результатам прогнозного расчета с использованием характеристик грунтов, подвергшихся микробиологическому воздействию, отмечаются участки грунтовой плотины с коэффициентами устойчивости близкими к критическим.

Наблюдаемая неоднородность распространения в водах, фильтрующихся через тело плотины, отдельных ионов может являться, по нашему мнению, результатом микробиологических процессов, протекающих в теле плотины. Повышение содержания ионов аммония и гидрокарбонат-ионов свидетельствует о процессах разложения органического вещества, а наличие нитрит- и нитрат-ионов — об аэробном характере этого процесса. Примечательно, что нитрит- и нитрат-ионы обнаруживаются вблизи верхнего бьефа плотины, а в пробах воды, отобранных из скважин вблизи нижнего бьефа плотины, они отсутствуют. Это может являться показателем того, что аэробное разложение органического вещества идет за счет кислорода, растворенного в фильтрующихся водах, который полностью расходуется за время прохождения вод через тело плотины. Наличие пространственно совпадающих очагов распространения повышенного содержания ионов аммония и  $\text{Fe}^{2+}$  свидетельствует о том, что в данной зоне идет анаэробное разложение органического вещества. При этом источником ионов аммония служит органическое вещество, а ионов  $\text{Fe}^{2+}$  — железосодержащие минералы и породы тела плотины, разлагающиеся в результате бактериального восстановления содержащихся в них ионов  $\text{Fe}^{3+}$  до активно мигрирующих в воде ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и при выходе на дневную поверхность выпадающих в осадок в форме гидроксидов железа (III), что объясняет значительное повышение мутности вод, фильтрующихся через тело плотины, по сравнению с водами водохранилища. Известно, что в анаэробных условиях даже хорошо упорядоченные кристаллы оксидов железа (III) способны подвергаться восстановительному растворению [19]. Таким образом, наличие очага повышенного содержания ионов  $\text{Fe}^{2+}$  может быть свидетельством того, что в данном месте идет микробиологическая трансформация пород.

Вода, фильтрующаяся через тело плотины, характеризовалась повышенным содержанием водорастворенного органического вещества (содержание  $S_{\text{орг}}$  от 108 до 122 мг/дм<sup>3</sup>), в то время как содержание  $S_{\text{орг}}$  в поверхностных и маломинерализованных водах Пермского края обычно не превышает 30–40 мг/дм<sup>3</sup>, достигая в отдельных случаях 60–70 мг/дм<sup>3</sup>. Хромато-масс-спектрометрические исследования показали, что водорастворенное органическое вещество имеет преимущественно техногенное происхождение, так как присутствие природных органических веществ торфяного типа было выражено весьма слабо — отсутствовали присущие ему фенольные, углеводные и аминокислотные структуры, а также характерные для растительности эфиры высших жирных кислот (пальмитиновой, стеариновой, олеиновой). Присутствие низкомолекулярных галогеналканов, изоцианатов и изотиоцианатов ряда  $\text{C}_2$ – $\text{C}_4$ , а также оксиранов ряда  $\text{C}_{10}$ – $\text{C}_{14}$  свидетельствует о протекании процессов преобразования органического вещества в теле плотины. По нашему мнению одним из возможных источников техногенного органического вещества, поступающего в водохранилище и тело плотины, могут быть сбросы сточных вод расположенного выше по течению целлюлозно-бумажного комбината и ливневой канализации города.

Совпадение характера распространения в почвогрунтах метана и углеводородных газов  $C_2-C_5$ , а также противоположный характер распространения летучих органических соединений могут являться результатом бактериального преобразования в теле плотины органического вещества, в результате которого и образуются летучие органические соединения, которые в дальнейшем также могут быть использованы микроорганизмами с образованием метана и углеводородных газов  $C_2-C_5$  [20–21]. Наблюдаемый характер распределения и состава газов может свидетельствовать об их едином генезисе, связанном, по всей вероятности, с преобразованием сингенетичного органического вещества.

Преобладание в отложениях дренажной системы плотины минералов аутигенного комплекса над аллотигенными минералами, а также обнаружение новообразованных минералов кальцита и пирита и их сростков могут быть результатом протекания в теле плотины микробиологических процессов. Так, зерна новообразованного кальцита могут образоваться в результате повышения содержания в воде растворенного углекислого газа (гидрокарбонат- и карбонат-ионов) вследствие разложения водорастворенного органического вещества [22–24]. Появление в отложениях пирита, отсутствующего в составе минералов тела плотины, говорит об анаэробном характере микробиологического процесса разложения органического вещества.

Лабораторные экспериментальные исследования подтвердили наличие в грунтах плотины жизнедеятельного микробного сообщества, активизация которого может изменить химические, физико-механические и другие свойства грунтов. Разнонаправленный характер влияния микробиологических процессов, вероятно, объясняется различным минеральным составом грунтов, а как показывают некоторые исследования, микроорганизмы по-разному взаимодействуют с глинистыми минералами, практически полностью разрушая одни и цементируя другие [4, 7, 9]. Нарушение естественного состояния грунтов при техногенном воздействии может также привести к активизации биотического компонента [3, 4].

Предлагаемый комплекс методов исследований показал, что в теле и основании плотины достаточно активно протекают микробиологические процессы, которые способны изменить ее состояние. Проведенные исследования позволяют определить не только актуальное состояние сооружения, но и выявить потенциальные источники опасности для него, предсказать ход возможных биогеохимических процессов и оценить безопасность инженерного сооружения при дальнейшей эксплуатации. В настоящее время ведется разработка системы мониторинга микробиологической активности в теле плотины и методов ее подавления в случае резкой активизации.

## Литература

1. *Радина В. В.* Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния // Гидротехническое строительство. 1973. № 9. С. 22–24.
2. *Дашко Р. Э., Шидловская А. В.* Биотическая и абиотическая компоненты в подземной среде: их генезис и влияние на состояние и свойства песчаных отложений // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 209–215.
3. *Дашко Р. Э., Шидловская А. В., Панкратова К. В., Жукова А. М.* Техногенная трансформация основных компонентов подземного пространства мегаполисов и ее учет в геомеханических расчетах (на примере Санкт-Петербурга) // Записки Горного института, 2011. Т. 190. С. 65–71.

4. Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т. Микробиологические процессы в грунтовых плотинах // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 66–72. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2013/0410.pdf> (дата обращения: 28.03.14).
5. Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т. Влияние микроорганизмов на минеральный состав и свойства грунтов // Вестник ПГУ. 2012. Сер. Геология. Вып. 3 (16). С. 47–54. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2012/0394.pdf> (дата обращения 28.03.14).
6. Моавад Х., Бабьева И. П., Горин С. Е. Агрегация почв под действием внеклеточного полисахарида *Lypotycus lipofer* // Почвоведение. 1976. № 9. С. 65–68.
7. DeJong J. T., Fritzges M. B., Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear // J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2006. Vol. 12. P. 1381–1392.
8. Hendry J. P. Calcite cementation during bacterial manganese, iron and sulphate reduction in Jurassic shallow marine carbonates // Sedimentology. 1993. Vol. 40. P. 87–106.
9. O'Reilly E. S., Watkins J., Furukawa Y. Secondary mineral formation associated with respiration of nontronite, N<sub>Au</sub>-1 by iron reducing bacteria // Geochemical Transactions. 2005. Vol. 6, N 4. P. 67–76.
10. Yang I. C.-Y., Li Y., Park J. K., Yen T. F. The use of slime-forming bacteria to enhance the strength of the soil matrix // Microbial Enhanced Oil Recovery — Recent Advances. Amsterdam: Elsevier, 1993. P. 89–96.
11. Коффе Г. Л., Кожевина Л. С. Роль микроорганизмов в изменении геологической среды // Инженерная геология. 1981. № 6. С. 63–74.
12. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 13. С. 25–71.
13. Дашко Р. Э., Жукова А. М. Инженерно-геологические проблемы строительства высотных зданий в Санкт-Петербурге в условиях освоения подземного пространства // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 19–22.
14. Дашко Р. Э., Котюков П. В. Инженерно-геологическое обеспечение эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 71–77.
15. Болотина И. Н., Воронкевич С. Д., Максимович Н. Г. О возможности техногенных биогеохимических явлений при силикатизации гипсоносных пород // Вестн. Моск. ун-та. 1986. Сер. 4. Геология. № 4. С. 49–53. URL: [http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0058.html](http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0058.html) (дата обращения 28.03.14).
16. Максимович Н. Г., Меньшикова Е. А., Казакевич С. В. Исследование возможности повышения агрессивности подземных вод при строительстве на пиритсодержащих глинистых грунтах // Мат. Межд. симп. «Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий». Екатеринбург, 2001. Т. 2. С. 545–551. URL: [http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0241.html](http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0241.html) (дата обращения 28.03.14).
17. Sergeev V. I., Maksimovich N. G. Power Technology and Engineering. New York: Springer, 2005. P. 380–384. URL: [http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0041.html](http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0041.html) (дата обращения 28.03.14).
18. Минералогическая энциклопедия // под ред. Булаха А. Г., Кривовичева В. Г. Л.: Недра, 1985. 512 с.
19. Bonneville S., Van Cappelen P., Behrends T. Microbial reduction of iron (III) oxyhydroxides: effects of mineral solubility and availability // Chemical Geology. 2004. Vol. 212. P. 255–268.
20. Большаков А. М., Егоров А. В., Намсараев Б. Б. и др. Микробиологическое образование тяжелых углеводородных газов в морских осадках // Тез. докл. III Всесоюз. совещания по геохимии углерода. М., 1991. Т. 1.
21. Negash B., Lacy D. Production of ethane, ethylene and acetylene from halogenated hydrocarbons by methanogenic bacteria // Applied and Environmental Microbiology. 1987. Vol. 53, N 7. P. 1604–1610.
22. Горбунова К. А., Молоштанова Н. Е., Максимович Н. Г., Яцина И. И. Геохимические измененные породы и вторичные минеральные образования Кунгурской пещеры / Кунгурская ледяная пещера. Пермь: Изд-во ПГУ, 1995. С. 26–58. URL: [http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0159.pdf](http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0159.pdf) (дата обращения 28.03.14).
23. Чухров Ф. В., Ляликова Н. Н., Горшков А. И. О роли микроорганизмов в образовании ярозитов // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241. № 4. С. 929–932.
24. Abd-el-Malek Y., Rizk S. G. Bacterial sulphate reduction and the development of alkalinity. III. Experiments under natural conditions in the Wadi Natrûn // Journal of Applied Bacteriology. 1963. Vol. 26. P. 20–26.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2014 г.

## Контактная информация

*Максимович Николай Георгиевич* — кандидат геолого-минералогических наук; nmax54@gmail.com

*Хмурчик Вадим Тарасович* — кандидат биологических наук; khmurchik.vadim@mail.ru

*Лаздовская Марина Артуровна* — старший преподаватель; marartur08@mail.ru

*Деменев Артем Дмитриевич* — магистрант II курса; demenevartem@gmail.com

*Maksimovich Nikolay G.* — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; nmax54@gmail.com

*Khmurchik Vadim T.* — Candidate of Biological Sciences; khmurchik.vadim@mail.ru

*Lazdovskaya Marina A.* — Senior Lecturer; marartur08@mail.ru

*Demenev Artem D.* — graduate student; demenevartem@gmail.com