

На правах рукописи



ДЕМЕНЕВ АРТЕМ ДМИТРИЕВИЧ

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ
МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЕ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение
и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Пермь – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель:

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

Заслуженный эколог РФ

Максимович Николай Георгиевич

Официальные оппоненты:

Елохина Светлана Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, доцент, «Уральский региональный центр государственного мониторинга состояния недр» ФГБУ «Гидроспецгеология», директор (г. Екатеринбург)

Хансиварова Надежда Михайловна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая кафедрой общей и инженерной геологии ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону)

Ведущая организация:

АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «21» сентября 2017 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.280.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30 (III уч. корпус, ауд. 3326).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте www.ursmu.ru ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Автореферат разослан «24» июля 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета, д.г.-м.н.



Абатурова И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Микробиологические процессы являются значительным, но недостаточно изученным фактором, влияющим на характеристики инженерно-геологических массивов. Активность микробиоты оказывает влияние на твердую, жидкую и газовую фазы вещества, что сопровождается изменением кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий среды и, как следствие, инженерно-геологических показателей. При поступлении большого количества органических веществ интенсивное развитие микробиоты может вызвать ряд негативных процессов и явлений.

Актуальность работы. Грунтовые плотины являются объектами повышенной ответственности, так как изменение их проектных инженерно-геологических показателей может привести к катастрофическим последствиям. Однако аспекты микробиологического воздействия на инженерно-геологические массивы участков грунтовых плотин изучены недостаточно, также при этом нет единой методической основы для их исследований. Известны случаи, когда на гидротехнических сооружениях, на реках Днепр, Волга, Кама были зафиксированы процессы, связанные с активизацией микробиоты, например локальная газогенерация и развитие глееобразования. Подобная ситуация сложилась на грунтовой плотине одной из гидроэлектростанций Волжско-Камского каскада. В последние годы здесь стали фиксироваться превышения нормативных значений по показателю мутности в дренажных водах плотины, что является признаком суффозионных процессов. По косвенным признакам это могло быть связано с активизацией микробиоты. Подобные процессы могут оказать влияние на инженерно-геологические показатели и на безопасность эксплуатации грунтовой плотины, что актуально для большинства гидротехнических сооружений, поскольку водохранилища являются потенциальным источником органического вещества, необходимого для активизации микробиоты.

Идея работы состоит в том, в грунтовой плотине, возведенной на типичном водотоке восточно-европейской части РФ, развиваются микробиологические процессы, обусловленные природными и техногенными факторами, способные повлиять на инженерно-геологические показатели и, как следствие, безопасность эксплуатации плотины.

Целью работы является оценка инженерно-геологических последствий активизации микробиологических процессов в теле и основании грунтовой плотины на основе характерных признаков их проявлений, фиксируемых

преимущественно с помощью методик инженерно-геологических исследований.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**.

1. Разработать методические основы оценки влияния микробиологических процессов на инженерно-геологические показатели грунтовой плотины.

2. Выявить закономерности протекания и направленность микробиологических процессов в грунтовой плотине для оценки возможных изменений физико-механических свойств грунтов.

3. Оценить возможность применения биотехнологических методов для мелиорации грунтов, слагающих тело плотины.

4. Разработать основные принципы системы мониторинга биологических процессов в грунтовой плотине для обеспечения ее безопасности с инженерно-геологической точки зрения.

Объектом исследования является грунтовая плотина, возведенная на типичном водотоке восточно-европейской части РФ. **Предметом исследований** являются закономерности изменений компонентов геологической среды под воздействием микробиологических процессов в районе грунтовой плотины.

Изучение микробиологических процессов, протекающих в грунтовой плотине, и их последствий потребовало комплексного подхода, применения различных геологических, инженерно-геологических, микробиологических и химических **методов исследований**: колонковое бурение для отбора образцов грунта; газогеохимическое опробование подземной атмосферы грунтовой плотины; отборы проб поверхностных, подземных и дренажных вод, донных отложений и осадков; химические исследования воды; минералогические исследования грунтов и новообразований; физико-механические испытания грунтов; выделение из исследуемых грунтов накопительных культур микроорганизмов (сульфатредукторов и уробактерий) или создание благоприятных условий для развития гетеротрофных микроорганизмов и использование их в модельных экспериментах.

Для получения достоверных результатов использовалась современная приборная база: система капиллярного электрофореза «Капель-104-Т» (Россия), спектрофотометр «UNICO» (США), дифрактометр D2 PHASER (США), микроскоп высшего класса Nikon Eklipsis 100 Pol (Япония), экспресс-газоанализатор Escorprobe-5 (Чешская Республика), газовый анализатор Drager

X-am 7000 (Германия), оборудование для полевых исследований производства Hanna (Германия) и Solinst (Канада). Обработка данных велась с использованием специализированного программного обеспечения: Surfer 8 (Golden Software), RockWorks 14, AutoCAD, Corel Draw и др.

Личный вклад автора заключается в сборе и обработке данных о современных представлениях в части воздействия микробиологических процессов на геологическую среду, участии в разработке программы, организации и проведении полевых, камеральных работ, планировании и проведении модельных экспериментов, интерпретации полученных результатов исследований.

Научная новизна работы. Предложен и опробован комплекс полевых, лабораторных и экспериментальных работ, позволяющий оценить воздействие микробиологических процессов на инженерно-геологические показатели. Определены характер и направленность микробиологических процессов, формирующихся при строительстве и эксплуатации грунтовой плотины. Предложен биотехнологический метод укрепления грунтов тела плотины и определена оптимальная концентрация вносимых веществ.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Выявлены причины превышения нормативных значений по показателю мутности в дренажных водах. Крупной электрогенерирующей компанией задействована разработанная автором система наблюдений за развитием нежелательных микробиологических процессов в грунтовой плотине и оценено их влияние на безопасность плотины. Оценена возможность применения биотехнологического метода укрепления песков, который может быть использован для мелиорации грунтов не только плотины, но и в районе других инженерных сооружений.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались автором на: Международной научной конференции «Синтез знаний в естественных науках» (Пермь, 2011 г.); XIX Международной научной конференции «Ломоносов-2012» (Москва, 2012 г.); XII научной конференции «К 80-летию геологического факультета СПбГУ: Геология в различных сферах» (Санкт-Петербург, 2013 г.); Международной летней школе «Геоэкологические проблемы Приуралья 2013» (Пермь-Кунгур, 2013 г.); VIII научно-технической международной конференции «Гидротехника. Новые разработки и технологии» (Санкт-Петербург, 2014 г.); XIX Международном научном симпозиуме им. академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2015 г.); XI научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных

изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 2015 г.). По материалам диссертационных исследований опубликованы 20 работ, в том числе 4 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ (из них 1 в базе Scopus), 16 в материалах конференций (из них 7 в базе цитирования РИНЦ). Работа подготовлена при поддержке гранта Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/153 № 269 в сфере научной деятельности.

На защиту выносятся следующие научные положения.

1. Комплекс инженерно-геологических полевых, лабораторных, экспериментальных исследований, позволяющий на основании наиболее информативных показателей, выявить наличие биогенных процессов, влияющих на грунтовый массив и безопасность плотины.

2. Механизм формирования инженерно-геологических особенностей в грунтовой плотине связан с развитием микробиологических процессов, сменой геохимических параметров среды и выносом отдельных элементов вещества, приводящих к изменению прочностных и деформационных свойств грунтов.

3. Основы управления микробиологическими процессами, заключающиеся в активизации отдельной группы аборигенного микробного сообщества, позволяют изменить направленность микробиологических процессов и улучшить деформационные характеристики грунтов за счет осаждения биоцемента карбонатного состава.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения. Объем работы составляет 135 страниц, включает 45 рисунков и 25 таблиц. Список литературы насчитывает 141 источник, в том числе 82 на иностранном языке.

В *первой главе* «Современные представления о микробиологических процессах в инженерной геологии» приведен литературный обзор отечественных и зарубежных публикаций о влиянии микробиологических процессов на геохимические параметры среды, подземные воды и физико-механические свойства грунтов, также рассмотрены биотехнологические методы укрепления песчаных грунтов.

Во *второй главе* «Общая характеристика района грунтовой плотины» приведены сведения о территории исследований, а также рассмотрены основные конструктивные особенности грунтовой плотины с инженерно-геологической точки зрения.

В *третьей главе* «Оценка изменений инженерно-геологического массива района грунтовой плотины под влиянием микробиологических процессов»

представлен комплекс проведенных исследований, по результатам которых выявлены признаки развития микробиологических процессов, приведены результаты модельных экспериментов по оценке изменений физико-механических свойств грунтов при воздействии микробиологических процессов, а также результаты исследований по укреплению опытных образцов песчаных грунтов биотехнологическим методом.

В четвертой главе «Механизм трансформации инженерно-геологического массива на участке грунтовой плотины, обусловленный микробиологическими процессами» описаны основные природные и техногенные факторы, способствующие развитию микробиоты, а также процессы и явления, выявленные в ходе исследований, указывающие на активное протекание микробиологических процессов в грунтовой плотине, способных повлиять на ее эксплуатационную безопасность; предложена система наблюдений для выявления признаков активизации микробиологических процессов в грунтовых плотинах.

В заключении сформулированы *основные выводы* и результаты проведенных исследований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю к.г.-м.н., Заслуженному экологу РФ Николаю Георгиевичу Максимовичу за предложенную интересную научную проблему и ценные советы при написании диссертационной работы. Также автор благодарит сотрудников научно-исследовательской лаборатории геологии техногенных процессов ЕНИ ПГНИУ и особенно к.б.н. Вадима Тарасовича Хмурчика за поддержку и консультации в ходе выполнения работы. Автор выражает признательность сотрудникам кафедрам динамической геологии и гидрогеологии, инженерной геологии и охраны недр, минералогии и петрографии геологического факультета ПГНИУ и лично декану, д.г.-м.н., профессору Валерию Николаевичу Катаеву за помощь в научно-исследовательской работе. Автор благодарит за всестороннюю поддержку свою семью, близких и коллег при работе над диссертацией.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое научное положение. Комплекс инженерно-геологических полевых, лабораторных, экспериментальных исследований, позволяющий на основании наиболее информативных показателей, выявить наличие биогенных процессов, влияющих на грунтовый массив и безопасность плотины.

Грунтовая плотина, на которой проводились исследования, является крупным гидротехническим сооружением, расположенным на территории г. Перми. Плотина возведена в середине XX века, общая длина напорного фронта 2,5 км. Амплитуда колебаний уровня вод в верхнем бьефе созданного водохранилища может достигать 8 м. Плотина оборудована дренажными конструкциями. Одними из наиболее крупных элементов дренажной системы плотины являются: горизонтальный и вертикальный дренажи, а также магистральная дренажная канава. Грунтовая плотина возведена намывным способом и сложена песками мелкими и гравелисто-песчаными грунтами. Естественным основанием являются аллювиальные отложения, представленные глинами и тяжелыми суглинками, песками мелкими и гравийно-галечниковыми образованиями. В глинах и суглинках отмечены растительные остатки. Также в основании плотины распространены озерно-болотные (старичные) отложения, представленные глинами и суглинками в мягкопластичном и текучепластичном состоянии, иловыми отложениями засыпанного озера и торфом, который при строительстве гидротехнического сооружения был снят только участками.

Изучение микробиологических процессов, протекающих в грунтовой плотине, с инженерно-геологической точки зрения потребовало разработки комплексного подхода. Несмотря на значительное количество публикаций о воздействии микробиологических процессов на геологическую среду, до настоящего времени не разработан единый подход к оценке активности микробиоты, с точки зрения влияния на инженерно-геологические показатели. Методической основой для таких работ может служить комплекс исследований, позволяющий выявить признаки и последствия микробиологических процессов (таблица 1).

Таблица 1. Комплекс исследований

Метод исследования	Назначение
Полевые исследования	
Опробование дренажной системы и сети скважин гидротехнического сооружения	Оценка общей гидрохимической обстановки
Отбор отложений из дренажной системы плотины	Получение представлений о характере выносимого вещества
Отбор образцов грунтов ненарушенной структуры	Для последующего определения свойств грунтов и их изменения под воздействием микробиологических процессов
Газогеохимическая съемка – определение содержания CH_4 , летучих органических соединений (ЛОС) и CO_2 в дренажной системе и грунтах	Обнаружение зон вероятной микробиологической активности; определение направленности протекания микробиологических процессов
Лабораторные исследования	
Химический анализ состава проб воды – определение содержания ионов HCO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , Fe^{2+} , Fe^{3+} и др.	Обнаружение зон вероятной микробиологической активности

Минералогический анализ образцов грунта и донных отложений: - анализ фракционного состава, - оптические методы, - рентгено-дифрактометрический анализ	Обнаружение новообразованных минералов и минералов-индикаторов микробиологических процессов, определение обстановки направленности протекания микробиологических процессов
Исследование свойств грунтов: - определение физических характеристик грунтов - определение механических свойств грунтов	Определение актуального состояния грунтовых массивов, с точки зрения их прочностных и деформационных характеристик
Экспериментальные исследования	
Исследования свойств грунтов после воздействия активизированной микробиоты	Определение возможных изменений свойств грунтов в условиях повышенной микробиологической активности

Представленный комплекс исследований позволяет оценить современное состояние инженерно-геологического массива в районе гидротехнического сооружения, а также выявить потенциальные источники опасности для него, прогнозировать ход возможных биогеохимических процессов. Данный комплекс методов может быть основой для исследований не только на гидротехнических сооружениях, но и для других объектов, с внесением некоторых корректировок, в зависимости от их особенностей.

Второе защищаемое научное положение. Механизм формирования инженерно-геологических особенностей в грунтовой плотине связан с развитием микробиологических процессов, сменой геохимических параметров среды и выносом отдельных элементов вещества, приводящие к изменению прочностных и деформационных свойств грунтов.

Для изучения современного состояния *гидрохимических особенностей* в районе грунтовой плотины были отобраны пробы поверхностных и подземных вод из различных водоносных горизонтов. На основе части результатов химического анализа была построена диаграмма Дурова (рис. 1).

Всего было отобрано и проанализировано 147 проб поверхностных и подземных вод по следующему спектру компонентов: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Fe^{3+} , сухой остаток, минерализация. В связи с тем, что рассматривается развитие микробиологических процессов в грунтовой плотине, более детально рассмотрен приуроченный к ним водоносный горизонт, т.е. воды в теле плотины. В основном воды тела плотины и аллювиального водоносного горизонта имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав с минерализацией до 1 г/дм^3 . Пробы воды с минерализацией $2,7-5,0 \text{ г/дм}^3$ относятся к более глубокозалегающим водоносным горизонтам (верхнесоликамскому и нижнесоликамскому). Также были построены карты распространения соединений, которые могут служить индикаторами микробиологических процессов.

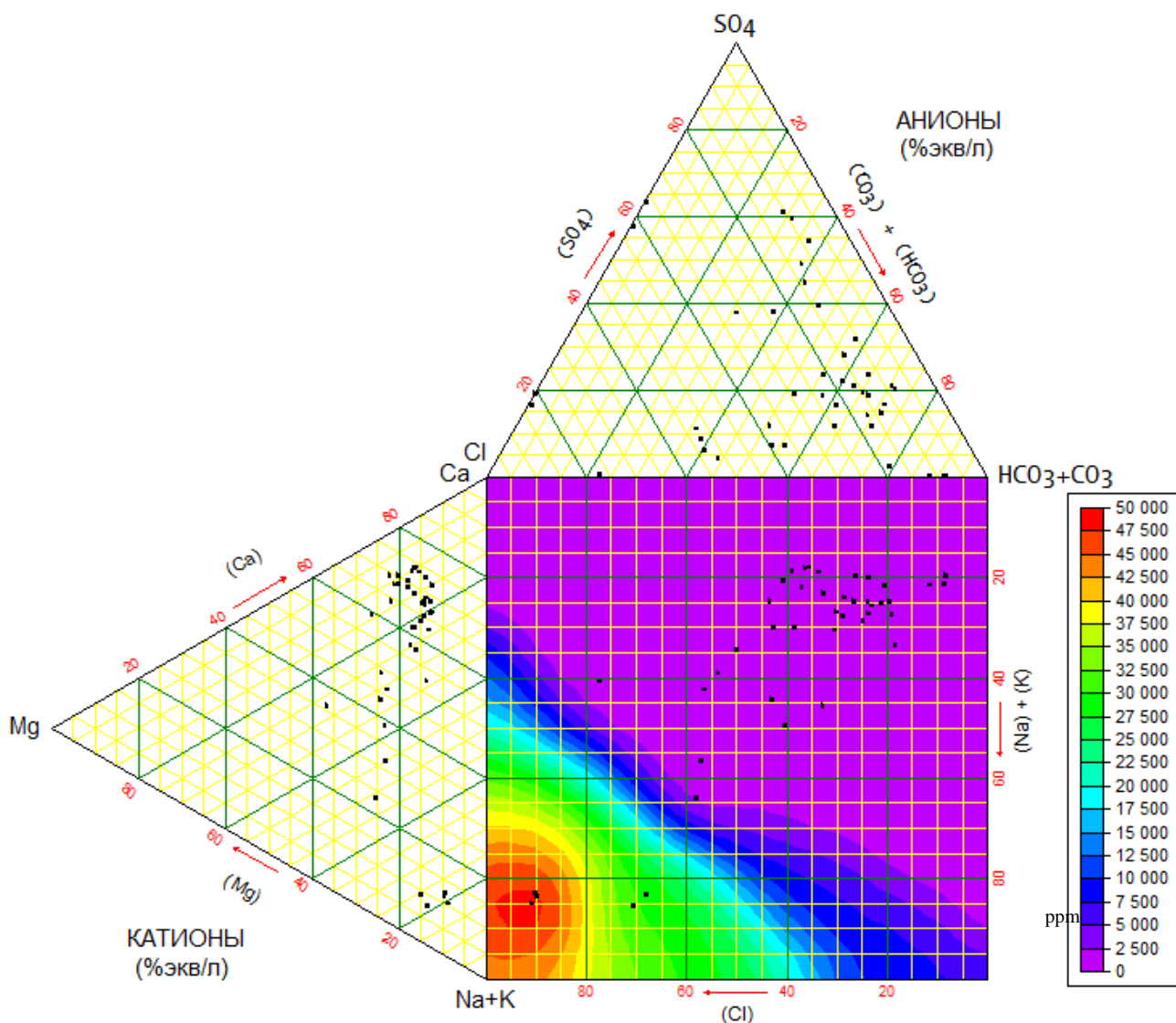


Рисунок 1. Химический состав подземных вод в районе грунтовой плотины

Об активном протекании микробиологических процессов в теле плотины свидетельствуют показатели концентраций соединений азота. В западной части плотины отмечено очаговое распространение ионов аммония (рис. 2). В этом же районе до строительства плотины на пойме находилось озеро, в донных отложениях которого содержалось большое количество легкодоступного органического вещества для микроорганизмов.

Поступающий кислород с водами из водохранилища быстро исчерпывается на окисление до нитрат-ионов, поэтому присутствие NO_3^- отмечается только со стороны верхнего бьефа грунтовой плотины (рис. 4). В связи с тем, что запасы кислорода по мере движения фильтрующихся вод от водохранилища к дренажной канаве сокращаются, в районе очага распространения ионов аммония кислорода уже недостаточно для его полного

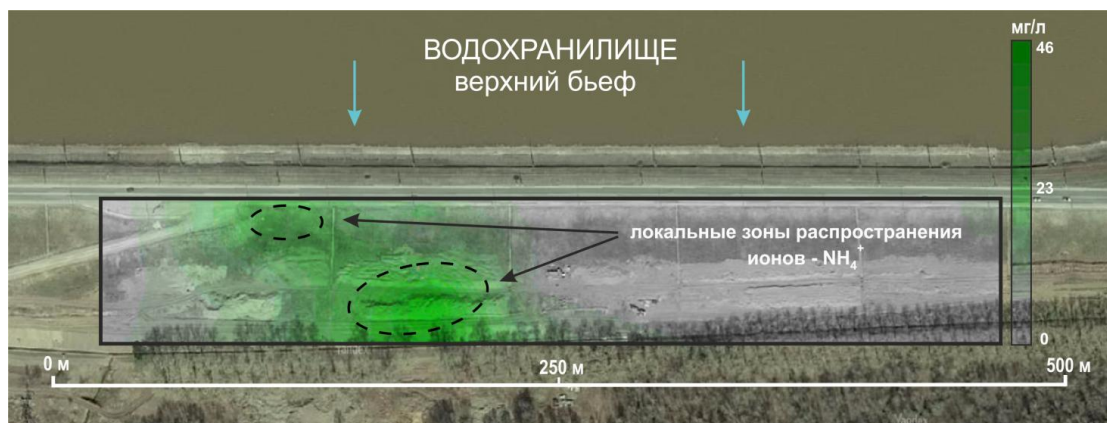


Рисунок 2. Распространение ионов аммония в воде тела плотины

окисления до NO_3^- , поэтому в данной зоне фиксируются только нитрит-ионы – продукты I фазы окисления ионов аммония (рис. 3). По мере продвижения фильтрующихся вод из водохранилища кислород полностью используется микроорганизмами на окисление соединений азота и органических веществ.

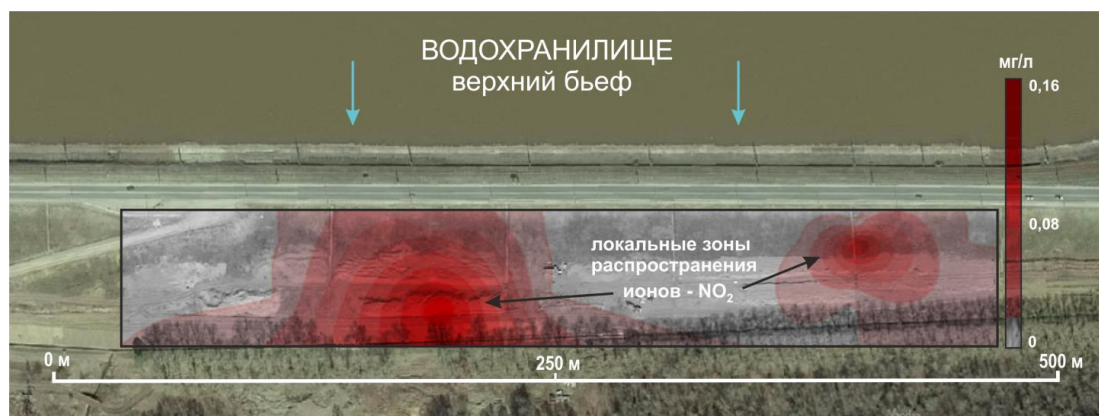


Рисунок 3. Распространение нитрит-ионов в воде тела плотины

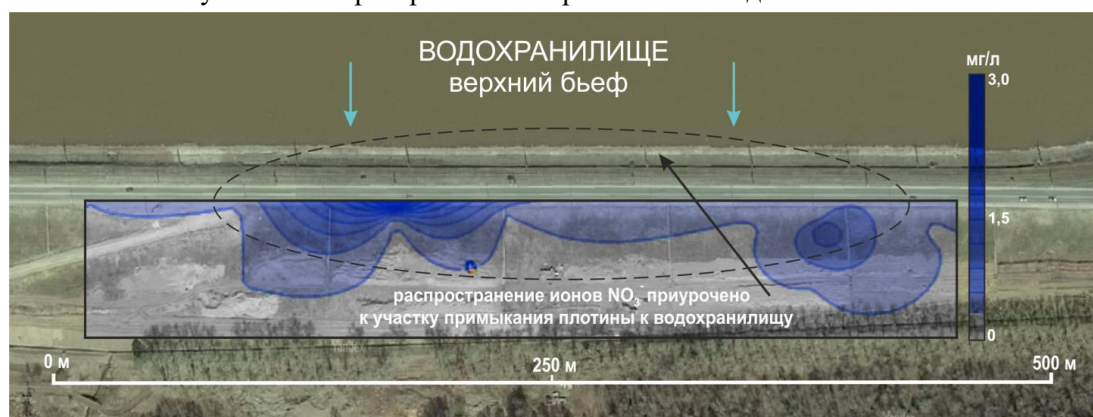


Рисунок 4. Распространение нитрат-ионов в воде тела плотины

Воды в теле плотины имеют тесную гидравлическую связь с водами аллювиального горизонта, поэтому их гидрогеохимические картины схожи. В области поступления сульфатов в аллювиальный водоносный горизонт из нижележащих толщ (рис. 5) в условиях бескислородной обстановки развивается микробиологический процесс сульфатредукции. Так в дренажных

колодцах отмечен запах сероводорода, а в их отложениях обнаружен новообразованный пирит (рис. 6).

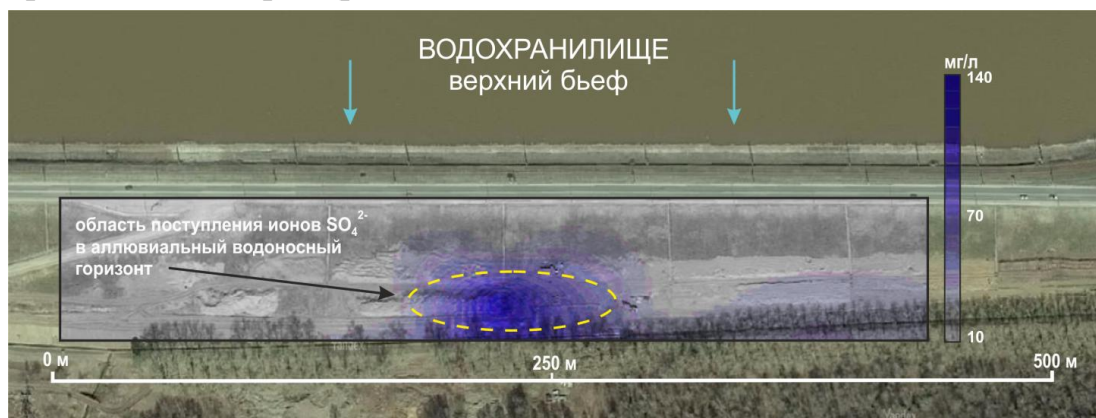


Рисунок 5. Распространение сульфат-ионов в аллювиальном водоносном горизонте

Микробиологические исследования проб воды проводились для определения численности гетеротрофных микроорганизмов ($4,5 \times 10^3$ кл/мл), а также численности отдельных физиологических групп: аммонификаторов ($2,5 \times 10^2$ кл/мл), сульфатредукторов и железобактерий ($8,5 \times 10^2$ кл/мл).

На некоторых участках грунтовой плотины наблюдались повышенные значения по показателю мутности дренажных вод. Замеры мутности дренажных вод являются одними из количественных и качественных контролируемых показателей состояния, уровня внешних воздействий и условий эксплуатации гидротехнического сооружения. Фиксируемые значения превышения мутности являются косвенным признаком развития суффозионных процессов в грунтовой плотине. Однако при регламентных наблюдениях за грунтовой плотинной других признаков суффозионных процессов обнаружено не было: отсутствуют превышения допустимых показателей по просадке поверхностных и глубинных марок, плотина суффозионно устойчива, вертикальные или горизонтальные смещения (осадки) сооружений и оснований не зафиксированы.

По результатам гидрохимических исследований было установлено, что воды в водохранилище характеризуются значительно меньшим содержанием железа (Fe^{2+} , Fe^{3+}) по сравнению с профильтровавшимися водами в плотине (дренажными водами), при этом были обнаружены характерные отложения гидроокислов железа на дне дренажной канавы. Источником железа в данном случае могут выступать грунты, слагающие тело и основание плотины, содержащие в своем составе железо в различных формах. Активная миграция железа может идти в восстановительных условиях, сформировавшихся при строительстве и эксплуатации гидротехнического сооружения, в том числе за счет потребления кислорода для осуществления жизнедеятельности микроорганизмами. При этом в теле плотины железо из трехвалентной формы

переходит в двухвалентную и выносится с потоком подземных вод, а при разгрузке вод на дневную поверхность и контакте с кислородом атмосферы проявляет себя обратный направленный процесс и железо отлагается в виде гидроокислов. Данное явление стало причиной фиксируемых превышений по показателю мутности в дренажных водах. То есть как таковой механической суффозии на плотине не происходит, однако известно, что при формировании восстановительной обстановки, обусловленной в том числе активизацией микробиологических процессов, при выносе элементов с переменной валентностью из грунта могут изменяться их физико-механические свойства, что, в свою очередь, влияет на безопасность эксплуатации грунтовой плотины.

Для изучения происхождения взвеси, выносимой из дренажных устройств, были проведены *минералогические исследования* отложений из колодца вертикального дренажа и грунта из тела плотины.

Осадок из дренажного колодца представлял собой песок мелкий и средней крупности светло-серого цвета с крупными, более 1 мм, выделениями гидроокислов железа. Дифрактометрические исследования показали, что в отложениях дренажного колодца наблюдалось преобладание минералов аутигенного комплекса (кальцита, аморфные гидроокислы железа, гетита, гидрогетита и пирита) над минералами аллотигенного комплекса (кварц). Кальцит представлял собой агрегаты (друзы) разно ориентированных кристаллов размером до 0,4 мм, цвет агрегатов темно-серый в центральной части до светло-серого на краях, также наблюдались срастания зерен кальцита и пирита (рис. 6).

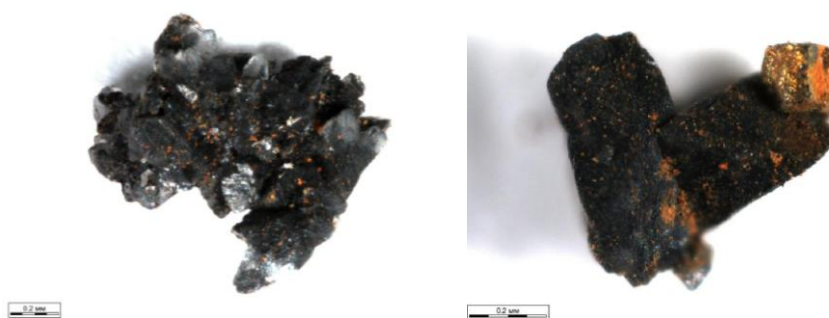


Рисунок 6. Новообразованный кальцит и пирит в отложениях дренажной системы

Отложения, отобранные из тела плотины, представляли собой песок мелкий и средней крупности светло-серого цвета с буроватым оттенком. При сравнительном анализе двух проб выявляется их резкое отличие, главным образом по содержанию минералов аутигенного комплекса. Следовательно, минеральный состав отложений дренажного колодца определяется процессами, происходящими в водной среде дренажной системы. Обнаруженный пирит образован биогенным путем. Необходимый для возникновения пирита

сероводород возникает за счет микробиологической сульфатредукции. Стоит отметить, что пирит обнаружен в дренажном колодце, расположенном в районе интенсивного поступления сульфат-ионов в подземные воды аллювиального горизонта. Таким образом, минералогические исследования свидетельствуют о том, что в грунтовой плотине развиваются микробиологические процессы, способствующие на некоторых участках поддержанию восстановительной обстановки.

Газогеохимическое опробование проводилось в июле 2016 г. совместно с сотрудниками Горного института УрО РАН. При интерпретации данных были использованы результаты проведенных в 2011 г. аналогичных работ в районе грунтовой плотины. Исследования включали опробование 82 шпуров (глубина 0,5-0,7 м) и колодцев 26 вертикального дренажа (ВД). Концентрации почвенных газов (CO_2 , CH_4) части грунтовой плотины представлены на рисунке 7.

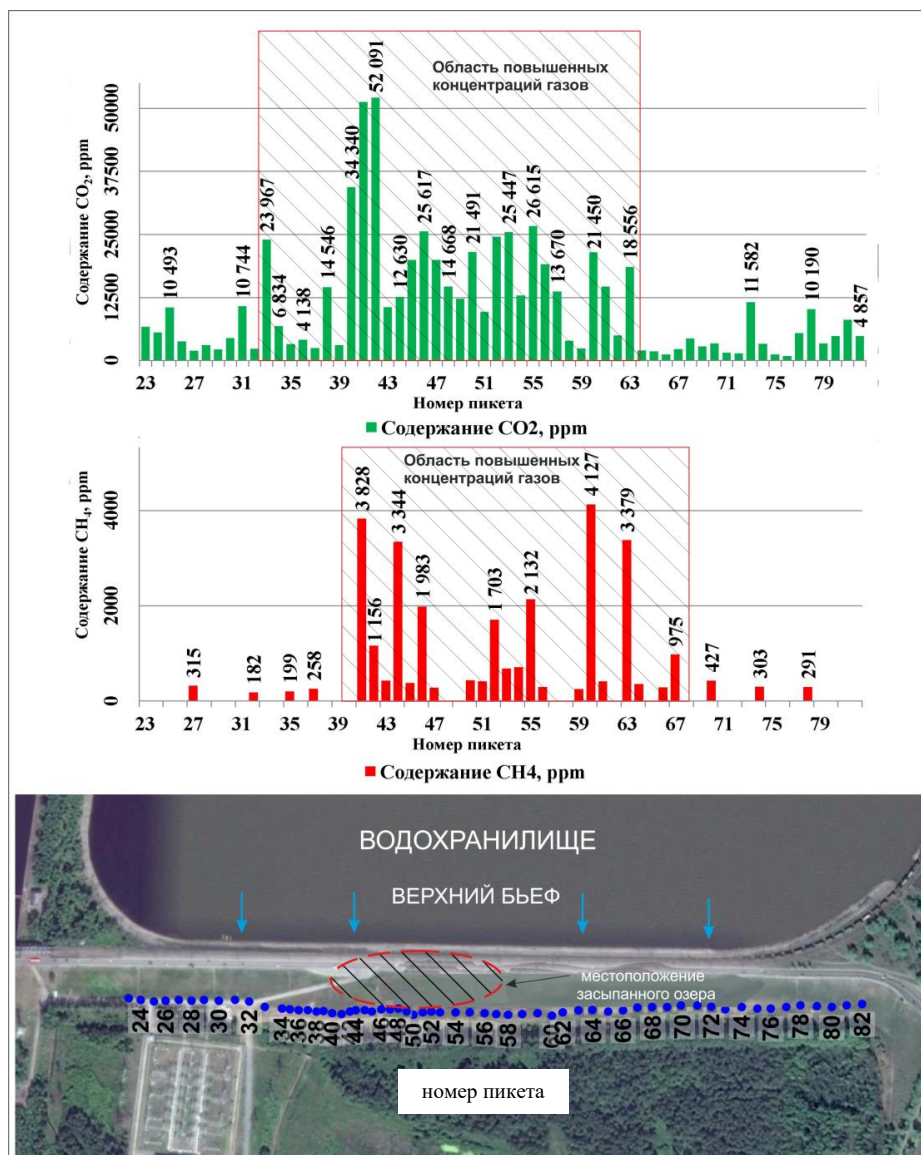


Рисунок 7. Газогеохимическая обстановка в почвенном воздухе грунтовой плотины

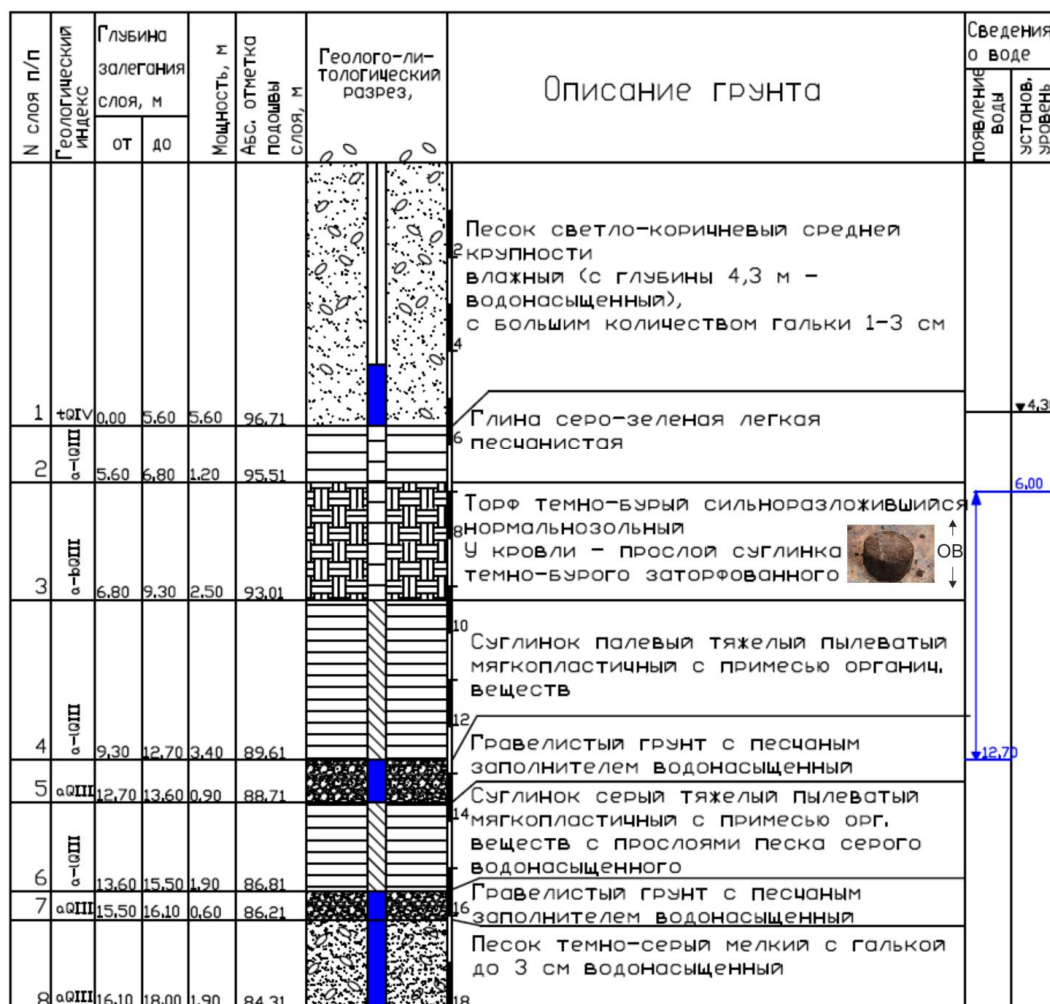
Газогеохимическое опробование свидетельствует о значительном возрастании содержания в подпочвенном воздухе метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2), особенно в районе засыпанного озера. В качестве наиболее вероятных источников данных компонентов являются процессы биохимического преобразования водорастворенного органического вещества в теле плотины. При этом не исключается поступление этих компонентов и из нижележащих отложений. Другим фактором, влияющим на повышенные концентрации газов в теле плотины, может быть наличие прослоев торфа в грунтах.

Исследования грунтов, слагающих тело и основание грунтовой плотины. Микробиологические процессы оказывают комплексное воздействие на компоненты геологической среды. Как известно, активное развитие микробиоты способно оказать влияние на грунты различными способами, что может привести к изменению их физико-механических характеристик. Изучено современное состояние грунтов, слагающих тело плотины, а также проведены модельные эксперименты по оценке возможных изменений физико-механических свойств глинистых грунтов при активизации микробиологических процессов, свойственных исследуемой грунтовой плотине.

Для отбора образцов грунтов в районе плотины проводилось механическое колонковое бурение трех скважин глубиной до 20 м. Из скважин отобраны образцы грунтов ненарушенной (монолиты) и нарушенной структуры для определения физических и механических характеристик. Типичное геолого-литологическое строение охарактеризовано по скважине 2 (рис. 8). В разрезе отмечаются биогенные грунты (торф сильноразложившийся), а также глинистые грунты с высоким содержанием органических веществ (до 8%), которые могут принимать активное участие в микробиологических процессах. Также отмечено наличие грунтов, изменивших свою окраску на серую в ходе смены кислородной обстановки на бескислородную после строительства грунтовой плотины. Некоторые исследователи отмечают, что в результате микробной трансформации твердой компоненты заметно изменяется микроагрегатный состав глинистых и супесчаных грунтов, что не может не отразиться на их физико-механических свойствах.

Микробиологические исследования образцов грунтов плотины были направлены на определение численности гетеротрофных микроорганизмов ($3,5 \times 10^5$ - $2,75 \times 10^7$ кл/г), а также численности отдельных физиологических групп: аммонификаторов ($6,3 \times 10^4$ - $2,75 \times 10^6$ кл/г), бродильщиков ($3,5 \times 10^3$ - $8,25 \times 10^5$ кл/г), железоредукторов (до $3,5 \times 10^6$ кл/г); присутствие

сульфатредуцирующих бактерий отмечено по характерным признакам их жизнедеятельности (выделению сероводорода, выпадению осадка сульфидов черного цвета) при помещении глинистого грунта основания плотины в среду Постгейта «В» для роста сульфатредукторов, а также по исследованиям вод основания плотины, в которых определена численность сульфатредукторов и железобактерий в количестве $8,5 \times 10^2$ кл/мл.



Условные обозначения

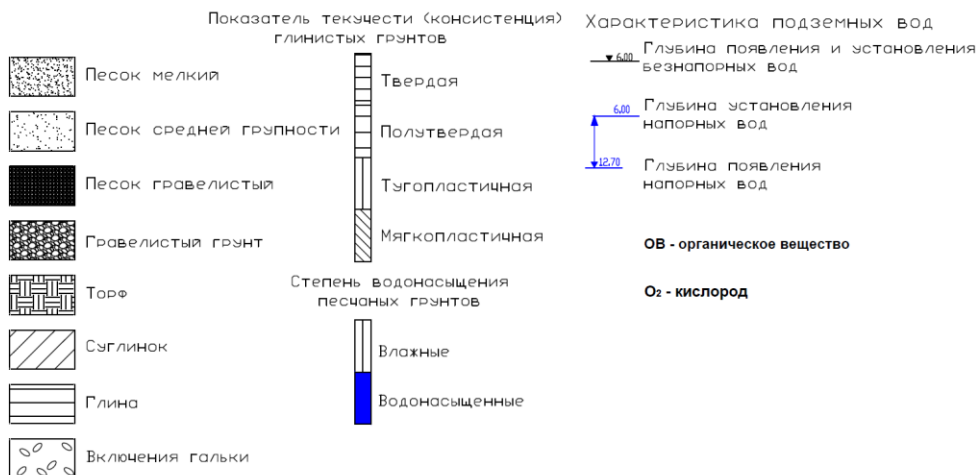


Рисунок 8. Геолого-литологическая колонка скважины 2, расположенной на грунтовой плотине

В модельных экспериментах использовались аэробные гетеротрофные и анаэробные сульфатредуцирующие бактерии, выделенные из грунтов, отобранных в ходе буровых работ. Для получения накопительных культур микроорганизмов асептически отбирали примерно 5 см³ суглинка тяжелого пылеватого из скважины 2 и наращивали на соответствующих средах. Выросшую культуру микроорганизмов использовали в качестве инокулята для засева 5 литров свежей стерильной среды и ею заливали кольца для компрессионных и сдвиговых испытаний с опытными образцами грунта, помещенными в эксикатор. Обработка колец с грунтом культурами микроорганизмов продолжалась до 64 суток, испытания грунтов производили в различное время инкубации.

Установлено, что бактериальная обработка образцов грунта как аэробными, так и анаэробными микроорганизмами снижала модуль деформации грунта при компрессионных испытаниях. Для одних грунтов двукратное уменьшение величины модуля деформации наблюдалось уже после 29 суток эксперимента (глина легкая - изменение модуля деформации составило с 3,41 МПа до 1,56 МПа), для других даже после 64 суток эксперимента величина модуля снижалась только в 1,1 раза (суглинок легкий - изменение модуля деформации составило с 3,92 МПа до 3,41 МПа).

На примере глины легкой пылеватой установлено, что обработка анаэробными сульфатовосстанавливающими микроорганизмами оказывала большее воздействие на изменение величины модуля деформации грунта, чем обработка аэробными гетеротрофными микроорганизмами (на 29-е сутки обработки анаэробами модуль деформации уменьшился почти в два раза с 2,82 МПа до 1,39 МПа, тогда как подобные изменения модуля деформации грунта, обработанного аэробными бактериями, зафиксированы только на 64-е сутки обработки). После бактериальной обработки снизилась плотность грунтов, в т.ч. плотность скелета. В грунтах уменьшился угол внутреннего трения, а вот изменение сцепления между частицами грунта было противоположно направленным: в одном грунте сцепление уменьшилось в 3 раза, а в другом увеличилось на равную величину. После 64-х суток обработки грунтов аэробными гетеротрофными микроорганизмами требовалась меньшая в 1,1-2,7 раза величина касательной нагрузки на грунт, чтобы произвести сдвиг. Таким образом, установлена тенденция к ухудшению прочностных и деформационных показателей грунтов вследствие микробиологического воздействия, что подтверждает необходимость учета возможных изменений физико-

механических свойств грунтов для обеспечения безопасной эксплуатации плотины.

На основании результатов проведенных комплексных исследований, установлены основные микробиологические процессы, которые могут протекать внутри тела плотины, – это процессы аэробного метаболизма, ферментация (брожение), восстановление нитрат- и нитрит-ионов, восстановление ионов железа (III), восстановление сульфат-ионов, метаногенез.

После создания комплекса гидротехнических сооружений и образования водохранилища свободный доступ кислорода к грунтам основания плотин был приостановлен, при этом водохранилище стало источником большого количества органического вещества (рис. 9). Оставшийся кислород был довольно быстро израсходован на осуществление жизнедеятельности аэробными микроорганизмами, и в грунтовых плотинах начала формироваться восстановительная (бескислородная) обстановка, характеризующаяся различными биогенными процессами: образованием газов, восстановлением элементов с переменной валентностью, образованием новых минералов и т.д. Смена окислительной обстановки на восстановительную повлияла на инженерно-геологический массив участка грунтовой плотины, а именно на грунты, слагающие основание плотины: содержащееся в грунтах железо было восстановлено до 2-х валентной формы, способной к относительно быстрой миграции с потоком подземных вод, изменилась окраска грунтов на серую, серо-зеленую, изменились их физико-механические свойства. Отрицательным фактором, влияющим на свойства грунтов, стала повышенная газогенерация.



Рисунок 9. Ориентировочная схема последствий развития микробиологических процессов в грунтовой плотине (ВД - колодец вертикального дренажа; С-1 - скважина; ↑ - увеличение; ↓ - уменьшение)

В настоящее время в плотинах активно развиваются микробиологические процессы за счет поступления большого количества питательных веществ для микробиоты из водохранилища. Также источником органического вещества являются прослой торфа и оставшиеся донные отложения на месте засыпанного озера.

Для безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения важны регулярные наблюдения за современным состоянием компонентов геологической среды вкупе с анализом получаемых результатов с точки зрения характера и направленности микробиологических процессов. Система наблюдений для выявления признаков активизации микробиологических процессов должна включать: замеры мутности вод дренажной системы, газогеохимическую съемку, химические анализы поверхностных и подземных вод, определение содержания водорастворенного органического вещества в водах, поступающих в тело плотины, а также рекогносцировочные обследования объекта для общего контроля и выявления возможных аномалий. Периодичность наблюдений должна носить системный характер и предусматривать основные технологические процессы комплекса гидротехнических сооружений, а также климатические особенности региона. Крупной электрогенерирующей компанией включена разработанная автором система наблюдений за развитием нежелательных микробиологических процессов в грунтовой плотине.

Третье защищаемое научное положение. Основы управления микробиологическими процессами, заключающиеся в активизации отдельной группы аборигенного микробного сообщества, позволяют изменить направленность микробиологических процессов и улучшить деформационные характеристики грунтов за счет осаждения биоцементного карбонатного состава.

Микробиота не всегда оказывает негативное воздействие на свойства грунтов. Биотехнологические методы позволяют изменить характер и направленность микробиологических процессов. В рамках настоящей работы рассматривается возможность укрепления песков тела грунтовой плотины с применением технологии биоцементации. Проведено несколько серий экспериментов по укреплению песчаных грунтов, направленных на подбор оптимальных концентраций веществ, вносимых с раствором в песчаные грунты, установление необходимого временного периода обработки песчаных грунтов, оценку изменения деформационных характеристик песчаных грунтов после обработки.

Первая серия экспериментов подразумевала внесение в исследуемые грунты дополнительной биомассы уробактерий, необходимых для развития процесса осаждения кальцита. Из образца грунта тела плотины были выделены аборигенные микроорганизмы. Наращивание накопительной культуры уробактерий происходило на среде Зенгена следующего состава: мочевины - 20 г/л, мясопептонный бульон (МПБ) - 1,5 г/л, для контроля за изменением pH среды использовался индикатор бромтимоловый синий. Инкубировали при комнатной температуре с дополнительной аэрацией в течение 7-10 суток. Отделение биомассы уробактерий производилось центрифугированием в течение 5 минут при 3000 об/мин. В образцы грунтов добавлялся раствор для биоцементации следующего состава: МПБ, мочевины, хлорид кальция (CaCl_2), выращенная биомасса. Через 7-9 дней из обработанного песка вырезались кольца для последующих компрессионных испытаний. На рисунке 10 представлена схема эксперимента.

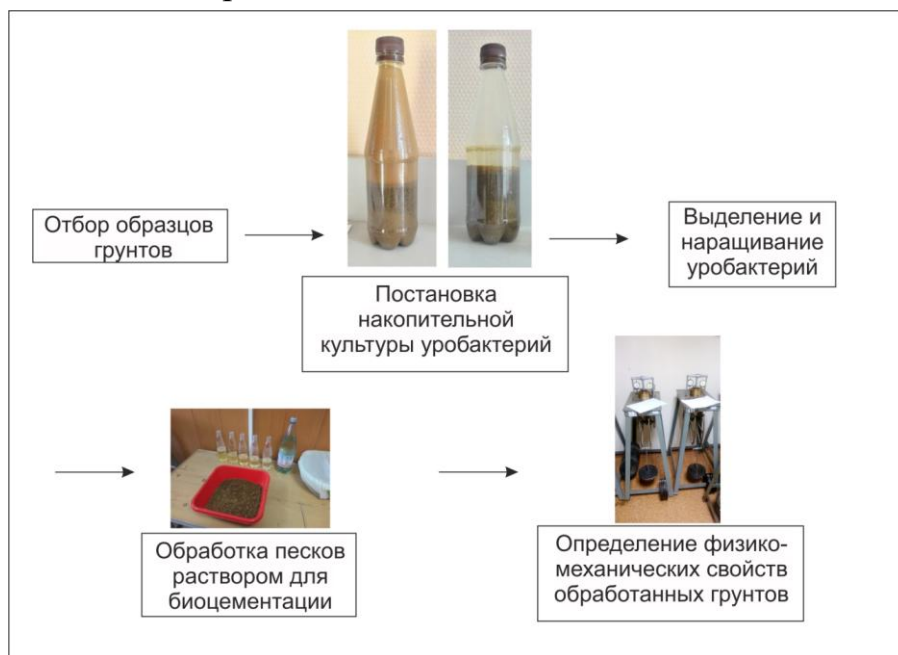


Рисунок 10. Схема эксперимента

Концентрации веществ в растворе и количество вносимой биомассы различны и представлены в таблице 2. Проведенный комплекс экспериментов позволяет сделать вывод о том, что с помощью микробиологического осаждения кальцита можно повысить деформационные свойства несвязных грунтов (таблица 2). Привнесенная биомасса уробактерий в исследуемые грунты влияет на модуль деформации обработанных песков, что позволяет сделать вывод о том, что активизация микробиологических процессов способствует ходу эксперимента за счет изменения условий в искусственно созданной среде. В результате разложения мочевины уробактериями продуцируются ионы аммония (NH_4^+), а также углекислый газ (CO_2), влияющие

на увеличение рН (защелачивание) среды и приводящие к накоплению в ней карбонат-ионов (CO_3^{2-}) и их последующему осаждению с ионами Ca^{2+} в виде твердых частиц кальцита.

Таблица 2. Результаты и модель эксперимента (I серия)

№ п/п	Наименование грунта (подготовка)	Время обработки грунта	Концентрации веществ в растворе, г/л	Количество вносимой биомассы, г/кг	Модуль деформации (E, МПа)
1	Песок мелкий (абиотический контроль)	7 сут.	МПБ – 1,5; мочевины – 20; CaCl_2 – 5	-	13,3
2	Песок мелкий	7 сут.	МПБ – 1,5; мочевины – 20; CaCl_2 – 5	1,6	19,4
3	Песок мелкий	9 сут.	МПБ – 1,5; мочевины – 20; CaCl_2 – 37,5	0,5	17,9
4	Песок мелкий	9 сут.	МПБ – 1,5; мочевины – 20; CaCl_2 – 37,5	1,0	18,1
5	Песок мелкий	8 сут.	МПБ – 1,5; мочевины – 20; CaCl_2 – 37,5	1,6	24,9

Перспективным направлением биоцементации песков является применение технологии, подразумевающей возможность использования аборигенного сообщества грунта без внесения дополнительной биомассы. Способность к разложению мочевины широко распространена среди микроорганизмов, в связи с чем автором проведены эксперименты по укреплению песчаных грунтов за счет осаждения кальцита аборигенной микрофлорой грунтов, т. е. без внесения дополнительной биомассы. Во второй серии экспериментов были использованы образцы песков, отобранных в районе территории исследований с глубины до 2 м. В отличие от первой серии экспериментов выделение и наращивание аборигенных микроорганизмов не производились. В опытные образцы добавлялась только среда для стимулирования природного микробного сообщества, а также раствор с различными концентрациями хлорида кальция CaCl_2 и других компонентов (таблица 3).

Опытные образцы грунта обрабатывались раствором из расчета 60 мл на 1 кг грунта. Раствор готовился на основе дистиллированной и речной воды, в него вносились: глюкоза, мочевины, хлорид кальция (CaCl_2), МПБ. После 21 суток выдержки определялись деформационные свойства грунтов.

Во время эксперимента замерялись соотношения концентраций газов в искусственно созданной среде. Для данных исследований представительным является соотношение кислорода (O_2), и углекислого газа (CO_2) в среде. В настоящем эксперименте выделение углекислого газа в среду является одним из индикаторов протекания микробиологических процессов. Стоит отметить, что при исследованиях ощущался характерный запах аммиака, что

свидетельствует о процессе разложения мочевины уробактериями. Микробная деятельность активно развивается на 7-е сутки выдержки, на 15-е сутки концентрации углекислого газа существенно сократились, следовательно, оптимальный срок обработки грунтов составляет до 14-21 суток.

Таблица 3. Результаты и модель эксперимента (II серия)

№ п/п	Основа раствора (вода)	Глюкоза, г/л	МПБ, г/л	CaCl ₂ , г/л	Мочевина, г/л	Модуль деформации (E, МПа)
1	дистиллированная	5	0,75	37,5	20	5,11
2	дистиллированная	10	1,5	37,5	20	6,20
3	дистиллированная	15	2,25	37,5	20	8,54
4	речная	10	1,5	37,5	20	9,49
5	дистиллированная	20	3,0	37,5	20	8,68
6	дистиллированная	20	3,0	75	40	8,03

При исследовании обработанных песчаных грунтов на электронном микроскопе, был обнаружен новообразованный кальцит, который скреплял между собой несвязные до обработки зерна песчаного грунта.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что концентрации различных компонентов в растворе, вносимом в грунт, влияют в дальнейшем на степень повышения деформационных характеристик несвязных песчаных грунтов.

Однако при физико-механических испытаниях грунтов максимальный модуль деформации зафиксирован у образца 3 и 5 (за исключением образца 4) при том, что концентрации компонентов в растворе, вносимом в образец 3, составляли половину от максимальных концентраций раствора, вносимого в образец 6. Модуль деформации возрастал в прямой зависимости от повышения концентраций компонентов раствора для обработки грунтов в образцах 1-3, 5, что говорит о том, что общее количество микроорганизмов растет и способствует осаждению кальцита. В образцах 5 и 6 модуль деформации грунтов незначительно снизился или оставался примерно равным образцу 3, т.е. одновременно с увеличением концентрации питательных веществ и увеличением концентрации вносимой мочевины - величина модуля деформации достигает определенного предела, что связано с приближением к максимально возможной скорости разложения мочевины микроорганизмами, поэтому дальнейшее увеличение концентрации мочевины не приводит к повышению модуля деформации. Максимальный модуль деформации зафиксирован у образца 4, что, вероятно, связано с используемой для основы раствора речной водой, содержащей в себе дополнительную биомассу. Таким образом, с точки зрения экономии расходов реагентов, по результатам

эксперимента, для укрепления несвязных песчаных грунтов плотины оптимальным является раствор со следующими концентрациями компонентов: глюкоза – 15 г/л, МПБ – 2,25 г/л, хлорид кальция CaCl_2 – 37,5 г/л, мочевины – 20 г/л.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Изучение проблемы воздействия микробиологических процессов на инженерно-геологические показатели грунтовой плотины потребовало разработки комплекса методов, включающего в себя полевые, лабораторные и экспериментальные работы. Проведенные по разработанной методике исследования позволили получить следующие результаты.

1. Установлена причина зафиксированных на грунтовой плотине негативных явлений, которая связана с тем, что в настоящее время в ней активно развиваются микробиологические процессы, за счет поступления из водохранилища питательных веществ; также источником органического вещества являются грунты с высоким его содержанием, прослой торфа и оставшиеся донные отложения на месте засыпанного озера.

2. В ходе буровых работ, гидрохимических исследований поверхностных и подземных вод, газогеохимического опробования дренажной системы и подпочвенного воздуха грунтовой плотины, а также минералогических исследований выявлены явные признаки развития микробиологических процессов, способных повлиять на компоненты геологической среды в районе грунтовой плотины.

3. Установлены основные механизмы трансформации инженерно-геологического массива на участке грунтовой плотины, которые могут быть обусловлены микробиологическими процессами: аэробного метаболизма, ферментацией (брожением), восстановлением нитрат- и нитрит-ионов, восстановлением ионов железа (III), восстановлением сульфат-ионов, метаногенезом. В ходе экспериментальных исследований установлено, что при воздействии микроорганизмов на грунты происходит ухудшение их физико-механических свойств, что в последствии может негативно сказаться на эксплуатационной безопасности плотины.

4. Экспериментальным путем была подтверждена возможность мелиорации песчаных грунтов территории исследований биотехнологическим методом. Проведено две серии экспериментов по специально разработанным методикам: с внесением питательных растворов и дополнительной биомассы в исследуемые грунты, а также с внесением питательных растворов без

дополнительной биомассы, т.е. стимулированием только аборигенной микрофлоры грунтов. Укрепленные грунты с внесением дополнительной биомассы, имели величину модуля деформации на 35-80% больше по сравнению с абиотическим контролем. Величина модуля деформации песков, укрепленных без внесения дополнительной биомассы, несколько меньшая, однако эффективность данной методики также установлена.

5. На объектах повышенной ответственности, таких как грунтовые плотины, необходимо проводить мониторинг возможных нежелательных микробиологических процессов, также эксплуатирующая организация должна иметь регламент действий в случае развития микробиологических процессов, угрожающих инженерному сооружению. Крупной электрогенерирующей компанией включена разработанная автором система наблюдений за развитием микробиологических процессов в грунтовой плотине, включающая в себя замеры мутности вод дренажной системы, газогеохимическую съемку, опробование поверхностных и подземных вод, определение содержания водорастворенного органического вещества в водах, поступающих в тело плотины, а также постоянные рекогносцировочные обследования объекта.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях международной базы цитирования Scopus

1. Maksimovich, N. G. The Role of Microorganisms in Elevating the Turbidity of Dam Seepage Water / N. G Maksimovich,. V. T. Khmurchik, **A. D. Demenev** / Power Technology and Engineering, Vol. 50, №1- Springer, 2016 - P.6-9.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

2. Максимович, Н. Г. Изучение микробиологических процессов в комплексе инженерных изысканий / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, Е. А. Хайрулина, **А. Д. Деменев** / Инженерные изыскания - 2015 - № 9 - С.40-44.

3. Максимович, Н. Г. Комплекс методов исследования микробиологической активности в грунтовых плотинах / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, М. А. Лаздовская, **А. Д. Деменев** / Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология, география - 2014 - № 4, С.88-100.

4. Максимович, Н. Г. Роль микроорганизмов в повышении мутности дренажных вод плотины / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, **А. Д. Деменев** / Гидротехническое строительство. - 2015 - № 11 - С.84-86.

Прочие публикации

5. **Деменев, А. Д.** Изменение свойств грунтов плотины под влиянием микробиологических процессов / А. Д. Деменев, В. Т. Хмурчик / Тез. докл. международной конф. «Синтез знаний в естественных науках 2011» - Пермь - 2011, С.35-40.

6. **Деменев, А. Д.** Изменение прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов под влиянием микробиологических процессов / А. Д. Деменев, П. В. Иванов / Тез. докл. XIX международной конф. «Ломоносов-2012» - Москва - 2012 г. – URL:http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2012/1725/46097_53f4.pdf (дата обращения: 07.03.2017).

7. **Деменев, А. Д.** Формирование химического состава подземных вод под влиянием техногенной нагрузки / А. Д. Деменев / Тез. докл. международной V конф. «Геология в развивающемся мире» - Пермь - 2012 - С.80-83.
8. **Деменев, А. Д.** Изменение свойств дисперсных грунтов под влиянием микробиологических процессов / А. Д. Деменев, П. В. Иванов / Тез. докл. всерос. XIII конф. памяти профессора В.Г. Очева «Геологи XXI века» - Саратов - 2012 - С.77-79.
9. Максимович, Н. Г. Техногенное минералообразование в теле плотины под влиянием микробиологических процессов / Н. Г. Максимович, С. А. Губин, В. Т. Хмурчик, **А. Д. Деменев**, П. В. Иванов / Тез. докл. международной конф. «Минералогическая кристаллография 2012» - Сыктывкар - 2012 - С.151-153.
10. Максимович, Н. Г. Влияние микробиологических процессов на подземные воды и грунты в основании плотины / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, П. В. Иванов, **А. Д. Деменев**, С. А. Губин / Тез. докл. XX всерос. совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока – Иркутск – 2012 - С.107-110.
11. **Деменев, А. Д.** Влияние микробиологических процессов на свойства дисперсных грунтов / А. Д. Деменев, П. В. Иванов / Тез. докл. XII конф. «К 80-ти летию Геологического факультета СПбГУ: Геология в различных сферах» - Санкт-Петербург – 2013 - С.28-30.
12. **Demenev, A. D.** Influence of microbial processes on soil in the dam ground basement / A. D. Demenev, P. V. Ivanov / Results of International school - Perm -2013 - P.87-90.
13. **Деменев, А. Д.** Газогенерирующий потенциал глинистых грунтов / А. Д. Деменев, Е. П. Катаева / Тез. докл. международной VII конф. «Геология в развивающемся мире» - Пермь - 2014 - С.20-23.
14. **Деменев, А. Д.** Роль микроорганизмов в миграции железа в глинистых грунтах / А. Д. Деменев, В. Т. Хмурчик / Тез. докл. международной конф. «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» - Пермь - 2014 - № 14 - С.103-105.
15. Максимович, Н. Г. Методы исследований микробиологической активности в грунтовых плотинах с целью обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, **А. Д. Деменев** / Тез. докл. VIII конф. «Гидротехника. Новые разработки и технологии» - Санкт-Петербург - 2014 - С.55-56.
16. **Деменев, А. Д.** Вопросы безопасности эксплуатации грунтовых плотин / А. Д. Деменев / Тез. докл. XIX международной конф. им. Академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» - Томск - 2015 - № 1 - С.373-375.
17. Максимович, Н. Г. Возникновение глеевой обстановки в теле грунтовой плотины под действием микробиологических процессов и их последствия / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, **А. Д. Деменев**/ Тез. докл. XXI всерос. совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока - Якутск - 2015 - С.220-224.
18. Максимович, Н. Г. Признаки возникновения и протекания неблагоприятных микробиологических процессов / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, **А. Д. Деменев** / Тез. докл. XI конф. «Инженерные изыскания в строительстве» - Санкт-Петербург - 2015 - С.205-207.
19. **Деменев, А. Д.** Микробиология геологической среды и инженерные изыскания / А. Д. Деменев, Н. Г. Максимович, Е. А. Хайрулина, В. Т. Хмурчик / Тез. докл. международной конф. «Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи» - Москва - 2016 - С.736-740.
20. **Деменев, А. Д.** Биоцементация песчаных грунтов / А. Д. Деменев / Тез. докл. IX международной конф. «Геология в развивающемся мире» - Пермь - 2016 - С.440-443.