

На правах рукописи



ХМУРЧИК ВАДИМ ТАРАСОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ГРУНТОВ
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение
и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный консультант:

Середин Валерий Викторович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр геологического факультета ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь)

Официальные оппоненты:

Абатурова Ирина Валерьевна – доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры «Гидрогеология, инженерная геология и геоэкология» ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург)

Панова Елена Геннадьевна - доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры «Геохимия» Института наук о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (г. Санкт-Петербург)

Строкова Валерия Валерьевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология материалов» ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (г. Белгород)

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита диссертации состоится «28» апреля 2022 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.03.10, созданного на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета, по адресу: 614090, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и на сайте: <http://www.pstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Маковецкий О. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Известно, что микроорганизмы, являясь составной частью биотической компоненты грунта, широко распространены в грунтах разного возраста и генезиса. Потребляя из грунта необходимые им химические элементы и питательные вещества и продуцируя метаболиты различной природы, микроорганизмы изменяют состав и свойства твердой, жидкой и газовой компонент грунта, что в свою очередь приводит к изменению его прочностных и деформационных свойств. Это воздействие микроорганизмов на грунт может иметь как положительные, так и отрицательные последствия для устойчивости инженерных сооружений.

Изучением воздействия микроорганизмов на грунт занимается достаточно ограниченное число исследователей. При этом большее внимание уделяется изучению негативного воздействия микроорганизмов на свойства грунта, а именно: снижению его прочностных и деформационных свойств. Так, согласно данным Р.Э. Дашко, в результате жизнедеятельности микроорганизмов произошло снижение прочности суглинков в основании Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге, что привело к неравномерной осадке здания, которая наблюдалась уже на этапе строительства, и образованию трещин. При этом перепад высот грунта в результате деформации составил 0,85 м. Активизация жизнедеятельности микроорганизмов в глинистых грунтах приводит к их переходу в квазипластичное состояние. Развитие микроорганизмов в песчаном грунте может придавать ему плавунные свойства, что отмечалось В.В. Радиной еще в 70-е годы прошлого века. Образование в результате жизнедеятельности микроорганизмов малорастворимых в воде газов, таких как азот, водород, метан, и их накопление в песчано-глинистых грунтах вызывает изменение их напряженно-деформированного состояния и может приводить как к газо-грязевым выбросам, так и деформации подземных сооружений. Известна и коррозионная активность микроорганизмов по отношению к строительным материалам и конструкциям.

Положительное воздействие микроорганизмов на грунт изучено гораздо хуже. Обычно выделяют два таких воздействия, которые используются на практике. Первое – способность грунтов к самоочищению от различных загрязнений в результате жизнедеятельности микроорганизмов грунта, что нашло достаточно широкое применение во всем мире в природоохранных биотехнологиях. Второе – это индуцированное микроорганизмами осаждение кальцита.

Однако, широкие метаболические возможности микроорганизмов, а они способны использовать в процессе своей жизнедеятельности практически все природные соединения и обитают в условиях разных температур, солености, величин окислительно-восстановительного потенциала и разных кислотно-щелочных условиях, – все это является предпосылкой для более широких исследований воздействия микроорганизмов на грунт. Понимание принципов и механизмов воздействия микроорганизмов на грунт может позволить использование микроорганизмов грунта для изменения его свойств в заданном направлении, т.е. для технической мелиорации грунта. Таким образом, вопросы формирования заданных свойств грунта путем воздействия на микробное сообщество остаются открытыми. Исследования же в этом направлении, реализованные в виде технологий, позволят повысить устойчивость и надежность зданий и сооружений.

Биотехнологические методы могут быть более финансово затратными в сравнении с традиционными методами мелиорации грунта. Однако, они могут оказаться единственно возможными для применения в условиях трудной технической доступности и условиях особых санитарно-гигиенических или иных требований.

Цель исследования – разработка методологии формирования состава и заданных свойств грунтов биотехнологическими методами.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработана методология формирования заданных свойств твердой, жидкой и газовой компонент грунта;

2. Разработан биотехнологический метод формирования заданных состава и свойств твердой компоненты дисперсного грунта;
3. Разработан биотехнологический метод формирования заданного состава жидкой компоненты грунта;
4. Разработан биотехнологический метод формирования заданного состава газовой компоненты обводненного грунта.

Объектом исследования являются природные и природно-техногенные грунты.

Предметом исследований являются закономерности формирования заданных свойств грунта при помощи микробиологических процессов.

Личный вклад автора. Защищаемая работа является результатом многолетних (1990–2021 гг.) исследований автора в качестве исполнителя и руководителя научно-исследовательских работ. Основные результаты получены лично автором либо коллективом сотрудников с учетом его идей и разработанных методических приемов.

Основные положения работы были разработаны в рамках научно-исследовательских и договорных научно-производственных работ, проводившихся Институтом экологии и генетики УрО РАН, г. Пермь (1990–1998 гг.), Естественнонаучным институтом Пермского государственного национального исследовательского университета (1999–2021 гг.). Автор самостоятельно планировал научные исследования, участвовал в них, выполнял обработку материалов, анализировал и обобщал результаты и, в конечном итоге, написал диссертационную работу.

Научная новизна работы:

- обобщены результаты отечественных и зарубежных исследований изменения свойств твердой, жидкой и газовой компонент грунта в результате жизнедеятельности микроорганизмов;
- на основе обобщения опубликованных и собственных лабораторных данных разработана методология формирования заданных состава и свойств

грунта биотехнологическими методами с использованием микроорганизмов, которая была опробована в полевых условиях;

– разработан биотехнологический метод повышения деформационных и снижения фильтрационных характеристик дисперсного грунта активированием жизнедеятельности аммонифицирующих микроорганизмов, приводящей к осаждению кальцита в поровом пространстве грунта;

– разработан биотехнологический метод повышения устойчивости склона породного отвала угольной промышленности активированием жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих микроорганизмов, приводящей к нейтрализации кислой жидкой компоненты грунта отвала;

– для случаев поступления в обводненный грунт грунтовой плотины повышенных концентраций органических соединений в результате аварийных утечек и сбросов, приводящих к усилению в грунте газообразования и снижению коэффициента запаса плотины, разработан биотехнологический метод подавления газообразования активированием жизнедеятельности железовосстанавливающих микроорганизмов, потребляющих органические соединения без образования газообразных продуктов.

Достоверность научных положений. Исследование и анализ проходящих в грунтах микробиологических процессов показали, что эти процессы способны изменять состав и свойства грунтов, что потребовало применения различных микробиологических, химических и геологических методов исследования с использованием современной приборной базы ПГНИУ. Проведены оригинальные лабораторные исследования, статистическую обработку результатов которых проводили с помощью современных статистических программ. Достоверность полученных результатов лабораторных исследований была подтверждена в ходе полевых и модельных экспериментов. Результаты прошли апробацию на международных и российских конференциях и симпозиумах. Защищаемые положения диссертации достаточно полно аргументированы приведенным в работе фактическим материалом.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Практическая значимость результатов заключается в разработке методологии формирования свойств грунта биотехнологическими методами с помощью микроорганизмов самого грунта, что позволяет целенаправленно изменять свойства грунта, формируя их в соответствии с инженерно-геологическими требованиями. Биотехнологические методы формирования свойств грунта могут найти широкое применение как в условиях плохой технической доступности к объектам, так и в случаях предъявления особых, например санитарно-гигиенических, требований к условиям проведения работ по мелиорации грунта.

Всего по результатам работы получено 6 патентов на изобретения и поданы 3 заявки на изобретения. Правами на данные патенты владеют такие организации, как ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО «Природоохранные технологии», ФГАОУ ВО ПГНИУ.

Результаты теоретических и практических исследований, изложенных в диссертации, могут явиться основой специализированного учебного курса «Современные методы технической мелиорации грунтов» для магистров кафедры инженерной геологии и охраны недр геологического факультета ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Методология формирования заданных состава и свойств грунта, заключающаяся в том, что первоначально оцениваются состав и свойства природного или техногенного грунтового массива, затем в нем выявляются специализированные группы микроорганизмов, разрабатываются технологии активации микроорганизмов, включающие в себя определение состава активатора и технологические схемы обработки грунта. После чего исследуются закономерности изменения свойств грунта в зависимости от технологических схем активации, и на основании выявленных закономерностей

определяется оптимальная технология формирования заданных свойств твердой, жидкой и газовой компонент грунта.

2. Формирование заданных свойств твердой компоненты дисперсного грунта, заключающееся в оценке состава и свойств природного грунта, выявлении в нем микроорганизмов, индуцирующих образование кальцита, выборе технологий их активирования и, как следствие, получении заданных физико-механических и физико-химических свойств грунта.

3. Формирование водородного показателя жидкой компоненты грунта, заключающееся в оценке состава и свойств природного грунта, выявлении в нем сульфатовосстанавливающих микроорганизмов, их активировании и, как следствие, снижении кислотности порового раствора и содержания сульфатов в нем.

4. Формирование заданного состава и свойств газовой компоненты грунта, заключающееся в том, что при поступлении в грунт органического вещества увеличивается газообразование за счет метана, что снижает прочностные и деформационные свойства грунта; для формирования заданных свойств газовой компоненты грунта в нем выявляют и активируют железовосстанавливающие микроорганизмы, которые потребляют органическое вещество и изменяют содержание метана в газовой компоненте грунта. С уменьшением в грунте содержания метана уменьшается пористость грунта и увеличивается его прочность, что повышает устойчивость инженерного сооружения.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях, в том числе: International Symposium on Subsurface Microbiology – The United Kingdom, 1993, Switzerland, 1996, USA, 1999, 2005, Denmark, 2002; International Geological Congress – China, 1996; «Научно-технический потенциал Западного Урала для конверсии военно-промышленного комплекса» – Пермь, 2001; «Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа» – Москва, 2001, 2002, 2004, 2005; «Геохимия биосферы» – Ростов-на-Дону, 2001; «Дегазация земли: геодинамика,

геофлюиды, нефть и газ» – Москва, 2002, 2003, 2006, 2008; «Biosphere origin and evolution» – Новосибирск, 2005, Greece, 2007; «Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия» – Сыктывкар, 2007; Всеросс. совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока – Иркутск, 2012, Якутск, 2015; «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» – Москва, 2013; «Сергеевские чтения» – Москва, 2014, 2016, Пермь, 2019; IAEG Congress - Italy, 2014, USA, 2018; Всеросс. чтения памяти акад. А.Е. Ферсмана – Чита, 2014, 2016; «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» – Санкт-Петербург, 2014; Goldschmidt Conference – Japan, 2016, Spain, 2019; IMWA Conference – Germany, 2016, South Africa, 2018, Пермь, 2019, New Zealand, 2020; «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» – Улан-Удэ, 2020.

Основные результаты исследований отражены более чем в 120 публикациях, в том числе 14 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 17 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных *Web of Science* и *Scopus* и 2 монографиях (в соавторстве). По результатам исследований получено 7 патентов на изобретения и 2 заявки на изобретения находятся на рассмотрении.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 33 таблицы и 29 рисунков. Список литературы содержит 570 наименований, из них 398 на иностранных языках. Диссертационная работа выполнена на базе ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Благодарности. Автор выражает благодарность всем коллегам, с которыми в разное время работал по тематике, связанной с диссертационной работой – сотрудникам лабораторий техногенных экосистем и геологической микробиологии ИЭГМ УрО РАН, лабораторий экологической геологии и геологии техногенных процессов ЕНИ ПГНИУ, кафедры «Геологии нефти и

газа» ПНИПУ. Автор выражает благодарность научному консультанту – д.г.-м.н., профессору В.В. Середину за внимание к работе, ценные советы и конструктивные замечания, исключительно способствовавшие повышению качества диссертационной работы. За постоянную многолетнюю поддержку и ценные консультации автор выражает признательность заведующему лабораторией геологии техногенных процессов ЕНИ ПГНИУ, к.г.-м.н., Заслуженному экологу РФ Н.Г. Максимовичу. Автор благодарен своим первым наставникам в области экологии микроорганизмов и геологической микробиологии д.б.н. С.А. Иларионову и д.г.-м.н. А.А. Оборину, открывшим автору научные перспективы и руководившим его исследованиями в данных областях науки на начальном этапе.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

***Первое защищаемое научное положение.* Методология формирования заданных состава и свойств грунта, заключающаяся в том, что первоначально оцениваются состав и свойства природного или техногенного грунтового массива, затем в нем выявляются специализированные группы микроорганизмов, разрабатываются технологии активации микроорганизмов, включающие в себя определение состава активатора и технологические схемы обработки грунта. После чего исследуются закономерности изменения свойств грунта в зависимости от технологических схем активации, и на основании выявленных закономерностей определяется оптимальная технология формирования заданных свойств твердой, жидкой и газовой компонент грунта.**

Вышеприведенные исследования воздействия микроорганизмов на компоненты грунта показали, что в микробных популяциях грунта есть достаточное количество разнообразных микроорганизмов, способных как разлагать, так и образовывать различные соединения. Разные условия среды (наличие или отсутствие тех или иных доноров и акцепторов электронов,

окислительно-восстановительный потенциал, кислотно-щелочные условия, температура и проч.) благоприятствуют развитию разных групп микроорганизмов, поэтому формирование заданных свойств грунта с помощью микроорганизмов должно учитывать их физиологические особенности.

Предложенная нами методология формирования заданных свойств грунта [Khmurchik *et al.*, 2021] основывается на создании в грунте путем внесения различных химических соединений и изменения окислительно-восстановительного потенциала и pH среды определенных условий для усиленного развития конкретной группы микроорганизмов, то есть ее активирование, процессы жизнедеятельности которой способны привести к соответствующим изменениям в компонентах грунта и, в целом, к формированию заданных свойств грунта. Предлагаемая методология подразумевает последовательное выполнение следующих этапов работы (рисунок 1).

1 этап - оценка состава, состояния и свойств грунта. На данном этапе производится оценка минерального и гранулометрического состава, а также состояние и физико-механические свойства твердой компоненты грунта. Оцениваются химический состав и свойства жидкой компоненты, включающие



Рисунок 1 – Методологическая схема формирования заданных свойств грунта

оценку рН порового раствора грунта и его минерализацию, а также химический состав газов и их концентрация в газовой компоненте грунта.

2 этап - оценка микробной составляющей грунта. Работы данного этапа призваны определить групповой состав микробного сообщества грунта, выявить роль каждой группы микроорганизмов в изменении тех или иных свойств компонент грунта, ранжировать группы микроорганизмов по степени их воздействия на грунт, а также выбрать группу микроорганизмов для активирования.

3 этап - разработка технологии активирования микроорганизмов. Работы данного этапа включают в себя определение оптимальных условий для жизнедеятельности микроорганизмов (температура, кислотно-щелочные условия, окислительно-восстановительный потенциал, содержание химических соединений для роста микроорганизмов), подбор состава соответствующих растворов для активирования микроорганизмов, выявление закономерностей изменения свойств грунта в зависимости от технологии активирования микроорганизмов и выбор технологии активирования.

4 этап - разработка технологии формирования состава и свойств грунта. На данном этапе разрабатываются способы создания в грунте условий, благоприятных для развития микроорганизмов, разрабатываются технологические схемы активирования микроорганизмов в грунте (определяются состав растворов для обработки грунта, способы и периодичность их внесения, длительность обработки), производится выбор технологической схемы для применения и определяются способы и методы контроля за ходом процесса и оценки полученных результатов.

Таким образом, нами разработана методология формирования заданных состава, физико-механических и физико-химических свойств грунтов, являющихся основанием и средой инженерных сооружений, биотехнологическими методами с использованием микроорганизмов самого грунта. На основании данной методологии разработано 10 технологий формирования заданных состава и свойств грунтов. Из них на 7 технологий

получены патенты на изобретения и на 2 технологии поданы заявки на изобретения.

Второе защищаемое научное положение. Формирование заданных свойств твердой компоненты дисперсного грунта, заключающееся в оценке состава и свойств природного грунта, выявлении в нем микроорганизмов, индуцирующих образование кальцита, выборе технологий их активирования и, как следствие, получении заданных физико-механических и физико-химических свойств грунта.

Аварийные ситуации на нефтехранилищах как местного, так и мирового масштаба (например, разгерметизация резервуара с дизельным топливом в г. Норильске) требуют, с одной стороны, повысить несущую способность грунтового основания, а с другой, понизить проницаемость грунтов. Для решения вышеприведенной проблемы с резервуарами, расположенными в Пермском крае, в пределах дамбы обвалования грунты до глубины 0,2-0,3 м должны характеризоваться модулем деформации (E) 24-26 МПа и коэффициентом фильтрации ($Kф$) 1-2 м/сут. для повышения защищенности подземного водоносного горизонта от загрязнения с поверхности (Середин, 1998).

Нами проводились исследования по снижению фильтрационных характеристик природного грунта с целью повышения защищенности подземного водоносного горизонта от загрязнения с поверхности при размещении промышленных объектов.

Была проведена ***оценка состава и свойств природного грунта***, результаты которой представлены в таблицах 1 и 2.

Оценка микробной составляющей грунта выявила наличие в нем гетеротрофных аэробных микроорганизмов, способных использовать органические соединения для своего роста, в количестве до нескольких млн. кл/г. Количество аммонифицирующих микроорганизмов, способных метаболизировать мочевины, достигало 1 млн. кл/г. В грунте также обнаружены

Таблица 1 – Гранулометрический состав и физико-механические свойства грунта [Demenev *et al.*, 2021]

Наименование грунта	Глубина залегания, м	Плотность, г/см ³	Коэффициент пористости	Модуль деформации E, МПа	Коэффициент фильтрации, м/сут.	Гранулометрический состав, %					
						2.0- 0,5 мм	0,5- 0,25 мм	0,25- 0,1 мм	0,1- 0,05 мм	0,05- 0,005 мм	0,005 мм и менее
Песок мелкий	0,2	1,64	0,725	13,33	5,0-5,76	3,81	44,38	46,36	5,45		
Песок средней крупности	0,4	1,74	0,737	16,00		2,51	63,36	25,38	8,75		
Суглинок	1,2	1,78	0,751	18,00	0,45		1,39	11,51	20,0	47,18	18,92

Таблица 2 – Минеральный состав грунта [Demenev *et al.*, 2021]

Наименование грунта	Содержание, мас. %				
	Кварц	Полевые шпаты	Гидрослюды	Кальцит	Гипс
Песок мелкий	84,2	12,3	3,5	ниже уровня определения	ниже уровня определения

микроорганизмы, способные к денитрификации и восстановлению железа (в количестве нескольких тыс. кл/г). Все выявленные группы микроорганизмов в процессе своего роста на органических соединениях образуют углекислый газ и, следовательно, активизация их жизнедеятельности будет способствовать выпадению кальцита при наличии в среде ионов кальция. Однако, аэробные условия среды не благоприятствуют развитию денитрифицирующих и железовосстанавливающих микроорганизмов. Осаждению кальцита благоприятствуют щелочные условия среды, поэтому при использовании аэробных гетеротрофных микроорганизмов вместе с органическим веществом потребуется внесение щелочных добавок. Использование же аммонифицирующими микроорганизмами мочевины сопровождается не только образованием углекислого газа, но и защелачиванием среды вследствие выделения аммиака. Эти причины предопределили выбор аммонифицирующих микроорганизмов для их последующего использования.

Разработка технологии активирования микроорганизмов. Были проведены лабораторные исследования по активированию аммонифицирующих микроорганизмов мочевиной, которые показали, что объем выделенного газа возрастает на 7 сутки и существенно уменьшается на 15 сутки после обработки мочевиной [Оценка..., 2011]. Была определена закономерность изменения деформационных характеристик песчаного грунта в зависимости от количества аммонифицирующих микроорганизмов – увеличение численности данных микроорганизмов приводило к росту модуля деформации песка мелкого с 13,33 МПа до 24,99 МПа и снижению коэффициента пористости грунта до 0,525 [Demenev et al., 2021]. При этом наблюдалась прямая нелинейная статистически значимая зависимость между количеством внесенной биомассы и модулем деформации ($r = 0.73$ при $p = 0.002$). Подбирали состав и концентрацию раствора для активирования аммонифицирующих микроорганизмов. Для стимулирования роста в грунте численности аммонифицирующих микроорганизмов был подобран состав питательной среды, содержащей глюкозу и мясо-пептонный бульон, а для

активирования их жизнедеятельности – мочевины.

Разработка технологии формирования состава и свойств твердой компоненты грунта. Разработали технологию формирования свойств грунта активированием жизнедеятельности аммонифицирующих микроорганизмов, которая осуществляется поэтапно: на первом этапе производится обработка грунта раствором для активирования микроорганизмов, на втором этапе грунт обрабатывается раствором для осаждения биогенного кальцита. Обработка второго этапа проводится через 10 сут. после обработки первого этапа. Обязательными компонентами раствора для осаждения биогенного кальцита являются CaCl_2 (в количестве 37 г/л) и мочевина (20 г/л).

Было разработано четыре технологические схемы обработки грунта, отличающиеся как количеством обработок грунта и, соответственно, общей длительностью обработки, так и расчетным количеством осажденного кальцита, коэффициента пористости и финансовыми затратами на обрабатываемые растворы. В результате для использования в полевых условиях были выбраны две схемы обработки грунта. Результаты их применения представлены в таблице 3. Плотность грунта верхней части разреза (песка мелкого) с активированными микроорганизмами по отношению к исходному грунту возрастала с $1,64 \text{ г/см}^3$ до $1,72 \text{ г/см}^3$, а пористость и коэффициент фильтрации уменьшались соответственно с 0,725 до 0,682 и с 5,76 м/сут до 1,04 м/сут. Подобные же изменения были характерны для песка средней крупности.

Электронно-микроскопические исследования показали заполнение пор грунта новообразованными частицами (рисунок 2), а результаты рентгенодифракционного анализа показали, что данные новообразованные частицы представлены кальцитом (таблица 4).

Результаты наших исследований, а также исследований других авторов показывают, что при активировании жизнедеятельности аммонифицирующих микроорганизмов в грунте протекают следующие процессы: разложение мочевины с образованием углекислого газа и аммиака и защелачивание среды.

Таблица 3 – Формирование свойств грунта в полевых условиях активированием аммонифицирующих микроорганизмов [Demenev *et al.*, 2021]

Вид грунта	Плотность, г/см ³	Коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации, м/сут.	Гранулометрический состав, %				Технология обработки
				2.0-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	
Песок мелкий	1,64	0,725	5,0-5,76	3,81	44,38	46,36	5,45	Природные условия (без обработки)
Песок средней крупности	1,74	0,737		2,51	63,36	25,38	8,75	
Песок мелкий	1,70	0,692	1,04	2,51	53,02	38,52	5,94	По схеме № 3
	1,72	0,682		2,40	50,61	36,77	10,22	
Песок средней крупности	1,68	0,682		3,37	65,15	26,82	4,65	
	1,71	0,650		3,20	61,78	25,43	9,59	
Песок мелкий	1,69	0,692	3,50	1,85	50,30	38,17	9,67	По схеме № 4
	1,68	0,692		1,94	52,70	39,99	5,37	
Песок средней крупности	1,55	0,796		2,12	53,78	37,92	6,19	
	Н.д.	Н.д.		2,04	51,94	36,62	9,39	

Н.д. – не делали.

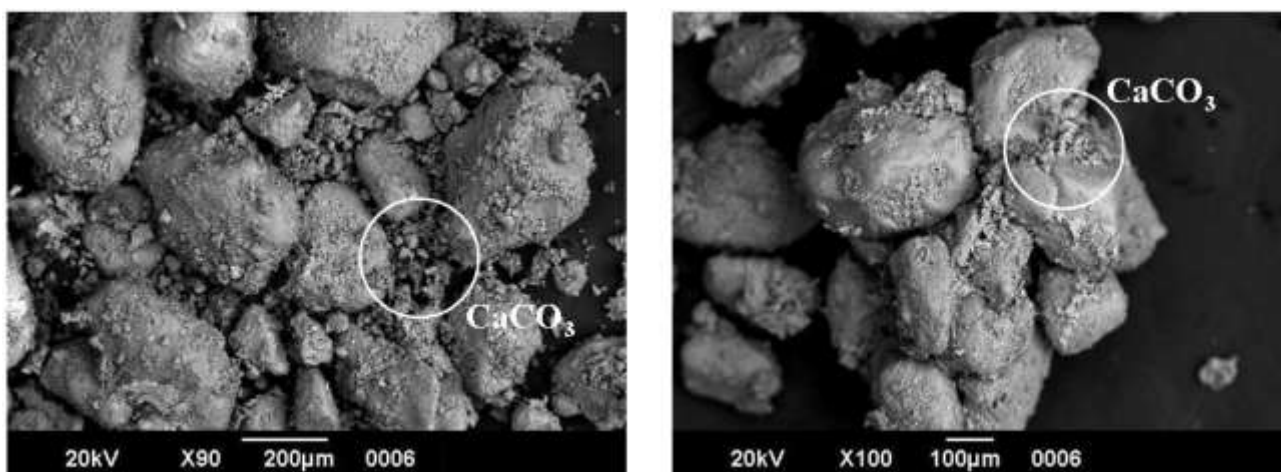


Рисунок 2 – Изменение пористости грунта при активировании микроорганизмов [Demenev *et al.*, 2021]

Таблица 4 – Изменение минерального состава грунта при активировании микроорганизмов [Demenev *et al.*, 2021]

Наименование грунта	Содержание, мас. %					Технология обработки
	Кварц	Полевые шпаты	Гидрослюды	Кальцит	Гипс	
Песок мелкий	84,2	12,3	3,5	ниже уровня определения	ниже уровня определения	Природные условия
	77,0	12,7	7,2	3,1	ниже уровня определения	По схеме № 3
	79,8	12,8	4,9	2,5	ниже уровня определения	По схеме № 4

Добавление в среду ионов кальция приводит к образованию и осаждению кальцита. В результате выпадения в поровом пространстве кальцита происходит снижение пористости и коэффициента фильтрации грунта, образование в грунте новых структурных связей и рост прочностных и деформационных свойств грунта.

Таким образом, технология формирования состава и свойств твердой компоненты грунта путем активирования жизнедеятельности аммонифицирующих микроорганизмов грунта была апробирована в полевых условиях. Результаты исследования были защищены патентом на изобретение (Патент РФ № 2646279).

Третье защищаемое научное положение. Формирование водородного показателя жидкой компоненты грунта, заключающееся в оценке состава и свойств природного грунта, выявлении в нем сульфатовосстанавливающих микроорганизмов, их активировании и, как следствие, снижении кислотности порового раствора и содержания сульфатов в нем.

Разработка недр предприятиями горно-промышленного комплекса связана с извлечением на поверхность земли большого количества отработанных пород, которые складываются на поверхности в виде отвалов. В результате процессов выветривания и при непосредственном участии микроорганизмов в теле отвалов развивается сернокислотный процесс, а образующаяся серная кислота разрушает структурные связи в грунте отвала, снижая прочностные характеристики грунта, что влечет за собой изменения в устойчивости откоса отвала. Исследования Блодау (2006), Холберга (2009) и многих других показали, что на прочностные свойства пород большое влияние оказывает рН порового раствора, при этом критическим значением рН является 4,5 – при $pH \geq 4,5$ склон будет находиться в устойчивом состоянии.

Оценка состава и свойств грунта. Исследовали грунт техногенного отвала шахты Северная Кизеловского угольного бассейна Пермского края. Вследствие развития сернокислотного процесса произошло возгорание грунта на части отвала, что сопровождалось изменением минерального состава грунта как показано в таблице 5. Характеристика жидкой компоненты грунта (дренажных вод отвала), отобранной в месте ее выхода из тела отвала на дневную поверхность, представлена в таблице 6. При этом водородный показатель водной вытяжки негорелого грунта, определенный в лабораторных условиях, был равен 2,8, а горелого грунта – 3,8.

Оценка микробной составляющей грунта. Микробное сообщество, населяющее грунт отвала, было представлено следующими группами микроорганизмов: аэробными ацидофильными органотрофными микроорганизмами, окисляющими органические соединения;

Таблица 5 – Минеральный состав горелого и негорелого грунта плоского отвала шахты Северная [Maksimovich *et al.*, 2020]

Грунт	Кварц	Гематит	Диаспор	Алунит	Ярозит	Каолинит	Гидрослюда (иллит)	Полевые шпаты
горелый	64,6	14,6	9,4	9,5	1,9	0	0	0
негорелый	43,6	2,8	0	7,1	3,3	14,0	21,6	7,6

Таблица 6 – Химический состав дренажных вод плоского отвала шахты Северная [Отчет..., 2019]

рН	Показатели химического состава, мг/л							
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
2,2	2458	20	1,1	0,02	0,002	499	39	2,5

Продолжение таблицы 6

Показатели химического состава, мг/л								
Fe _{общ.}	Al ³⁺	Co ²⁺	Ni ²⁺	Mn ⁴⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Cr _{общ.}	Сухой остаток
320	88	0,21	0,49	3,4	0,44	1,4	0,11	4350

микроорганизмами, окисляющими железо; микроорганизмами, окисляющими серу и восстановленные ее соединения; микроорганизмами, окисляющими пирит и сульфидные минералы; ацидофильными микроорганизмами, восстанавливающими железо; сульфатовосстанавливающими микроорганизмами. Процессы жизнедеятельности только трех из присутствующих групп микроорганизмов – аэробных ацидофильных органотрофных микроорганизмов, ацидофильных железовосстанавливающих микроорганизмов и сульфатовосстанавливающих микроорганизмов – ведут к увеличению водородного показателя порового раствора. Наибольший интерес из них вызывают сульфатовосстанавливающие микроорганизмы, жизнедеятельность которых оказывает большой нейтрализующий эффект вследствие образования не только углекислого газа, но и сероводорода, который может образовывать нерастворимые сульфиды с ионами железа и других металлов, предотвращая тем самым реакции их гидролиза и снижая общую кислотность среды. Жизнедеятельность сульфатовосстанавливающих микроорганизмов приводит также к снижению содержания в поровых водах сульфат-ионов, а следовательно, к снижению ионной силы раствора.

Разработка технологии активирования микроорганизмов.

Проведенные лабораторные исследования показали, что жизнедеятельность присутствующих в грунте сульфатовосстанавливающих микроорганизмов активировалась при добавлении в грунт органических соединений. При этом наблюдалось почернение грунта, вызванное, по-видимому, образованием частиц сульфидов металлов. Был подобран состав раствора для активирования сульфатовосстанавливающих микроорганизмов, содержащий глюкозу и ацетат натрия (по 0,5 г/л каждого вещества).

Исследовали влияние длительности активирования сульфатовосстанавливающих микроорганизмов на изменение рН порового раствора грунта отвала при ежесуточном внесении раствора для активирования сульфатовосстанавливающих микроорганизмов (рисунки 3 и 4).

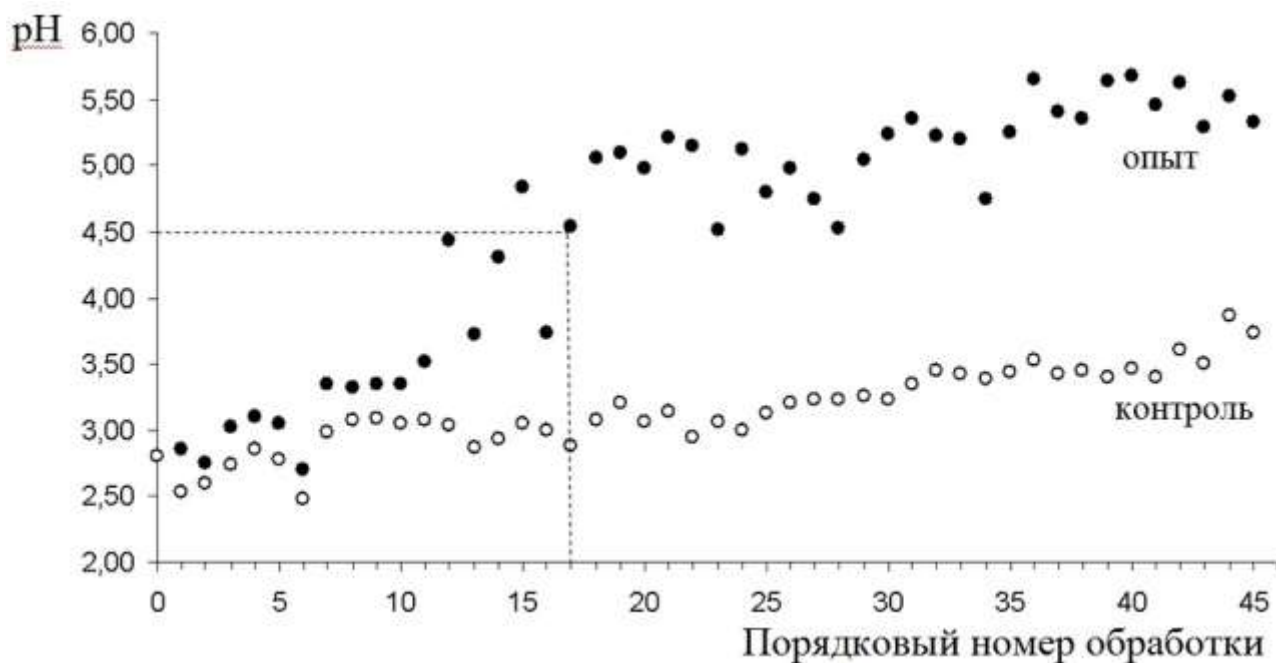


Рисунок 3 – Влияние длительности активирования сульфатвосстанавливающих микроорганизмов на изменение рН порового раствора негорелого грунта отвала шахты Северная [Maksimovich *et al.*, 2020]

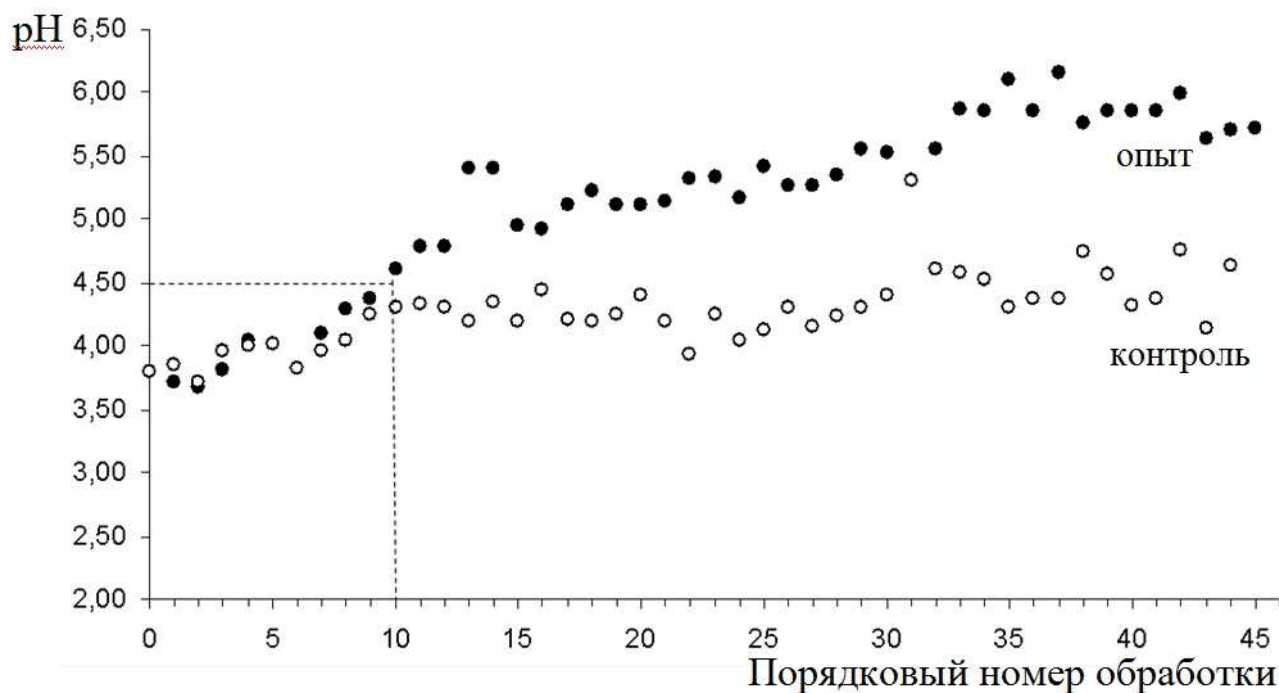


Рисунок 4 – Влияние длительности активирования сульфатвосстанавливающих микроорганизмов на изменение рН порового раствора горелого грунта отвала шахты Северная [Maksimovich *et al.*, 2020]

Результаты исследования показали, что для достижения требуемой величины рН в поровых водах грунта отвала необходимо произвести 17 обработок негорелого грунта и 10 обработок горелого. По окончании эксперимента в грунте породного отвала с активированными сульфатвосстанавливающими микроорганизмами наблюдали цементацию грунта новообразованными частицами сульфидов.

Разработка технологии формирования состава и свойств жидкой компоненты грунта. На основе проведенных исследований была разработана технология, которая заключалась в ежесуточном одноразовом внесении в грунт раствора глюкозы и ацетата натрия (по 0,5 г/л каждого вещества) в количестве 0,2 м³/т грунта. При этом в грунте происходят следующие процессы. Сульфатвосстанавливающие микроорганизмы потребляют вносимые органические соединения и восстанавливают сульфат-ионы порового раствора с образованием углекислого газа и сероводорода. Образующийся углекислый газ нейтрализует кислотность поровых вод, а сероводород связывается с ионами металлов, образуя нерастворимые сульфиды и предотвращая тем самым гидролиз ионов металлов и появление добавочных протонов в поровых водах. Выпадение сульфидов сопровождается снижением пористости грунта, образованием в нем новых структурных связей и, как следствие, ростом прочности и устойчивости склона отвала.

Таким образом, разработанная технология формирования состава и свойств жидкой компоненты грунта заключается в активировании жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих микроорганизмов породного отвала путем добавления органических соединений, что приводит к изменениям химической характеристики жидкой компоненты грунта, а именно, снижению кислотности поровых вод. По результатам исследования подана заявка на изобретение (Заявка № 2021119326).

Четвертое защищаемое научное положение. Формирование заданного состава и свойств газовой компоненты грунта, заключающееся в том, что

при поступлении в грунт органического вещества увеличивается газообразование за счет метана, что снижает прочностные и деформационные свойства грунта; для формирования заданных свойств газовой компоненты грунта в нем выявляют и активируют железовосстанавливающие микроорганизмы, которые потребляют органическое вещество и изменяют содержание метана в газовой компоненте грунта. С уменьшением в грунте содержания метана уменьшается пористость грунта и увеличивается его прочность, что повышает устойчивость инженерного сооружения.

Известно, что при поступлении в обводненный грунт органических соединений в нем развиваются анаэробные микробиологические процессы, сопровождающиеся газообразованием. Накопление нерастворимых газов (например, метана) в поровом пространстве обводненного грунта способствует значительному разуплотнению грунта и снижению его несущей способности. Ранее исследованиями Р.Э. Дашко, А.Д. Деменева, Н.Г. Максимовича было показано, что развитие в грунтах микробиологических процессов приводит к снижению величины силы сцепления и угла внутреннего трения песчаных и глинистых грунтов в среднем на 20%. При этом на 10-12% снижается и плотность сложения грунта. Возникновение вышеуказанных процессов в грунтах гидротехнических сооружений представляет особую опасность с точки зрения их устойчивости.

Оценка состояния одной из земляных плотин, расположенных на территории Пермского края, показала, что в теле плотины протекают микробиологические процессы, в том числе образование метана. Расчеты показали, что повышенное поступление в тело плотины органических веществ с фильтрующимися речными водами вызывает рост газообразования, которое влечет за собой разуплотнение грунта и увеличение фильтрации вод, что понижает устойчивость сооружения в целом. Были проведены исследования по формированию состава и свойств газовой компоненты обводненного грунта земляной плотины, а именно, прекращению микробного процесса

метанобразования за счет активирования железовосстанавливающих микроорганизмов, конкурирующих с метанобразующими микроорганизмами за субстрат и тем самым подавляющих их развитие и образование метана.

Оценка состава и свойств грунта. Была проведена оценка свойств грунтов тела плотины и ее основания (таблица 7).

Характеристика жидкой компоненты грунта показала наличие в ней повышенного по сравнению со средними показателями по региону содержания органического вещества неуглеводородной природы (содержание $C_{орг}$ 108–122 мг/дм³), источником которого могли быть как коммунальные стоки, так и стоки предприятия, расположенного выше по течению.

Характеристика газовой компоненты грунта показала наличие в ней метана, распределение которого было неравномерно по профилю плотины, а концентрация изменялась в разные годы, что свидетельствует в пользу его микробиологического происхождения и связано, по-видимому, с неравномерным характером поступления органических соединений в речные

Таблица 7 – Оценка состава и свойств грунтов, слагающих основание и тело земляной плотины [Оценка..., 2011]

Тип грунта	Плотность при естественной влажности, т/м ³	Плотность при полном водонасыщении, т/м ³	Коэффициент внутреннего трения, tg φ	Сцепление, кг/см ²
Тело плотины – намывной песок	1,94	2,09	0,58	0
Основание – торф	1,10	1,10	0,34	0
Основание – суглинок зеленовато-серый илистый	1,92	1,93	0,35	0,18
Основание – песок мелко- и тонкозернистый	1,46	1,94	0,61	0
Основание – супесь желтовато-серая илистая	1,84	1,92	0,33	0,80

воды. Проведенные лабораторные исследования показали зависимость величины скорости газообразования в грунте от количества поступающих органических соединений (рисунок 5).

Рассчитали влияние содержания органического вещества на свойства грунтов (таблица 8) и коэффициент запаса (устойчивости) плотины (рисунок 6). Расчеты показали, что повышение содержания в грунте органического вещества приводит к снижению значения коэффициента запаса плотины.

Оценка микробной составляющей грунта. В водонасыщенном грунте плотины обнаруживались анаэробные гетеротрофные микроорганизмы в количестве до $3,5 \times 10^5$ кл/г, аммонифицирующие микроорганизмы – до $6,3 \times 10^4$ кл/г, микроорганизмы с метаболизмом бродильного типа – до $3,5 \times 10^3$ кл/г, железовосстанавливающие микроорганизмы – до $3,5 \times 10^7$ кл/г. Лабораторные исследования показали также наличие в грунте жизнеспособных анаэробных

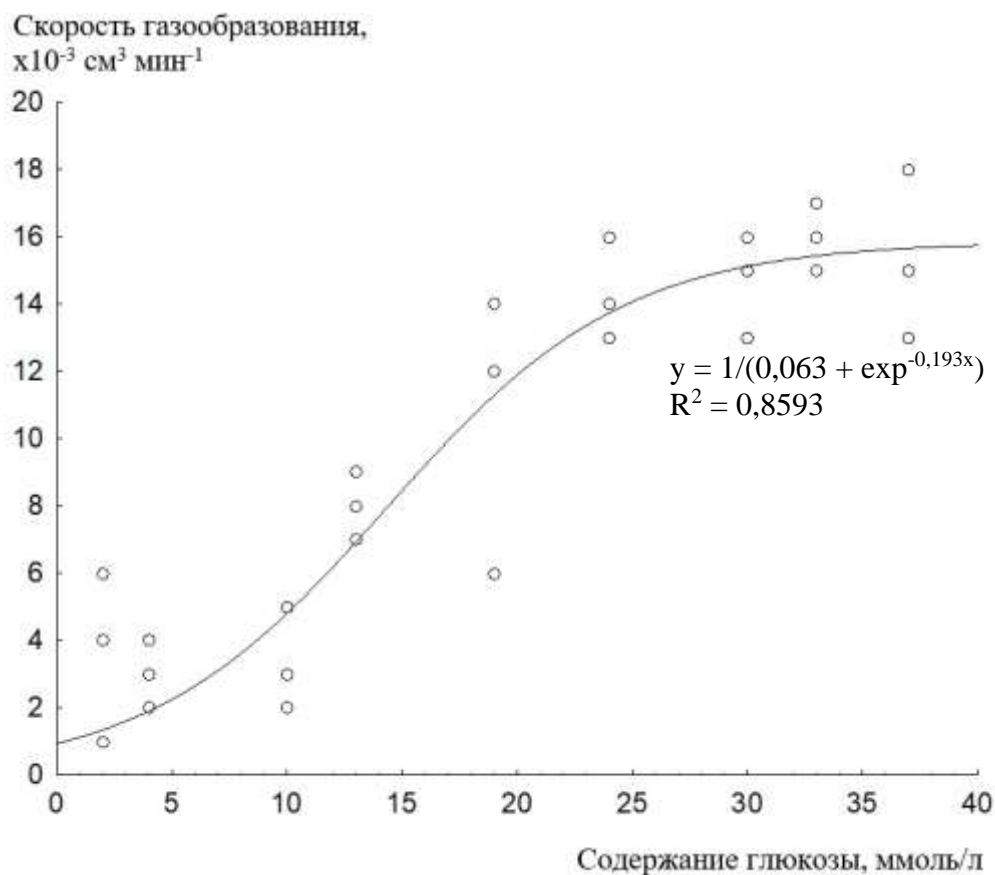


Рисунок 5 – Зависимость скорости газообразования в грунте от концентрации органического вещества [Мониторинг..., 2017]

Таблица 8 – Влияние концентрации органического вещества на свойства грунтов [Мониторинг..., 2017]

Содержание органического вещества в поровых водах грунта, г/л	Свойства грунта		Коэффициент запаса (устойчивости) плотины
	песок	суглинок	
0,08	$\rho = 1,83 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 35^\circ$, $C = 0 \text{ кПа}$	$\rho = 1,88 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 17^\circ$, $C = 44 \text{ кПа}$	2,8
0,09	$\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 28^\circ$, $C = 0 \text{ кПа}$	$\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 14^\circ$, $C = 35 \text{ кПа}$	2,3
0,11	$\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 27^\circ$, $C = 0 \text{ кПа}$	$\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 13^\circ$, $C = 35 \text{ кПа}$	2,2
0,12	$\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 14^\circ$, $C = 0 \text{ кПа}$	$\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 7^\circ$, $C = 17,6 \text{ кПа}$	1,2
0,16	$\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 13^\circ$, $C = 0 \text{ кПа}$	$\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 7^\circ$, $C = 17,6 \text{ кПа}$	1
0,18	$\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 12^\circ$, $C = 0 \text{ кПа}$	$\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 6^\circ$, $C = 15,4 \text{ кПа}$	1

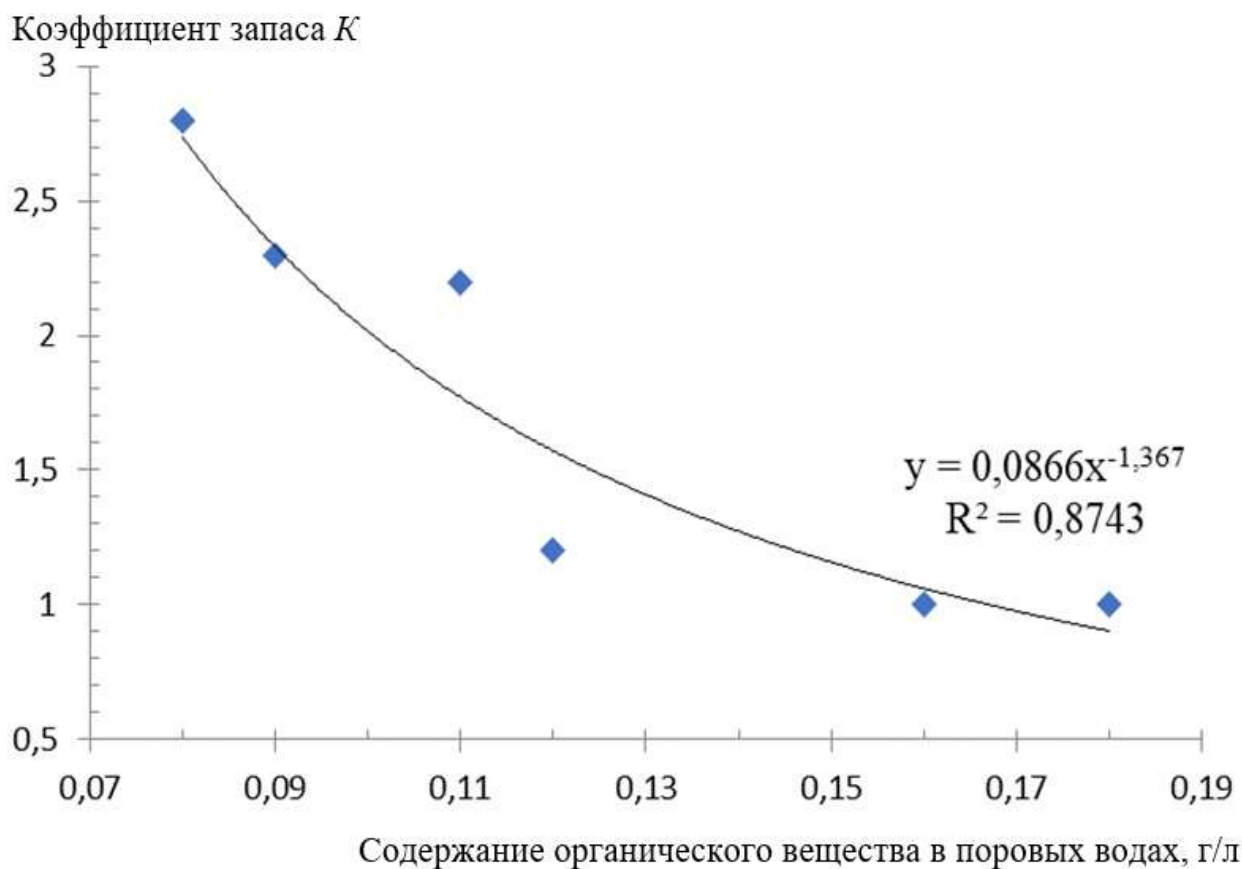


Рисунок 6 – Влияние концентрации органического вещества на коэффициент запаса (устойчивость) земляной плотины [Мониторинг..., 2017]

газообразующих микроорганизмов – метанобразующих микроорганизмов [Оценка..., 2011]. Процессы жизнедеятельности этих групп микроорганизмов вызывают следующие изменения состава газовой компоненты обводненного грунта (таблица 9).

Для подавления в теле плотины процесса метанобразования была выбрана группа железовосстанавливающих микроорганизмов, которые, согласно исследованиям Achtnich *et al.* (1995), Chidthaisong, Conrad (2000), Lovley, Phillips (1987), Roden, Wetzel (2003), успешно конкурируют с метанобразующими микроорганизмами за поступающие органические соединения и вызывают тем самым угнетение метанобразующих микроорганизмов и прекращение образования ими метана. Для жизнедеятельности данной группы микроорганизмов необходимо наличие в среде их обитания соединений трехвалентного железа или ионов трехвалентного железа, которые можно внести в виде водорастворимых солей.

Таблица 9 – Влияние микроорганизмов обводненного грунта на его свойства

Изменение свойств газовой компоненты	Группа микроорганизмов	Процессы в газовой компоненте грунта
Не изменяется	Анаэробные гетеротрофные микроорганизмы	Нет
Не изменяется	Аммонифицирующие микроорганизмы	Нет
Не изменяется	Микроорганизмы с бродильным типом обмена	Нет
Предотвращение образования газа	Железевосстанавливающие микроорганизмы	Прекращение образования метана
Рост газоносности, рост газосодержания	Метанобразующие микроорганизмы	Рост содержания метана

Разработка технологии активирования микроорганизмов. В ходе лабораторных исследований использовали раствор, содержащий в качестве источника углерода и энергии для микроорганизмов 0,3 г/л глюкозы (0,12 г/л в пересчете на углерод), что соответствовало содержанию органического углерода, обнаруженному в пробах речной воды. Было разработано несколько технологических схем активирования жизнедеятельности железовосстанавливающих микроорганизмов в грунте добавлением растворов хлорида железа со следующим его содержанием: 1, 2,5, 5, 10, 20, 40 и 80 мг/л. Все использованные концентрации хлорида железа вызывали остановку процесса газообразования в грунте в течение первого часа. Однако, при концентрации хлорида железа 1 мг данный эффект сохранялся не более 1 суток, в то время как остальные использованные концентрации хлорида железа сохраняли подавляющее действие на процесс газообразования в течение 7 суток эксперимента. Таким образом, минимальной концентрацией хлорида железа, необходимой для активирования жизнедеятельности железовосстанавливающих микроорганизмов и прекращения газообразования в грунте, является 2,5 мг/л [Мониторинг..., 2017].

Разработка технологии формирования состава и свойств жидкой компоненты грунта. Для разработки технологии формирования состава и свойств газовой компоненты грунта была выбрана технологическая схема, позволяющая подавить образование метана в условиях двукратного увеличения разбавления активирующего раствора речными водами. Был проведен эксперимент по подавлению газообразования в грунте плотины с использованием лабораторной установки, имитирующей земляную плотину. В эксперименте использовали раствор, содержащий глюкозу в концентрации 1 г/л, чтобы скорость генерации газа в грунте была максимально возможной – данная концентрация глюкозы имитировала залповый выброс органических веществ в воду реки. После активирования жизнедеятельности железовосстанавливающих микроорганизмов раствором, содержащим 5 мг/л хлорида железа, химический анализ газовой фазы установки показал полное

отсутствие в ней метана, а содержание углекислого газа было около 0,1–0,2% об. [Мониторинг..., 2017].

Таким образом, активирование в грунте жизнедеятельности железобактериальных микроорганизмов приводит к изменению состава газовой компоненты грунта. По результатам проведенных исследований получено 3 патента на изобретения (Патенты РФ №№ 2565409, 2592268, 2697272), а также разработан регламент работ, необходимых для подавления газообразования в грунте в случаях повышенного поступления органических соединений в воды реки в результате аварийных сбросов или утечек, переданный организации, осуществляющей эксплуатацию и надзор за состоянием плотины.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроорганизмы, являясь неотъемлемой частью биотической компоненты грунтов и будучи распространенными в грунтах разного состава и генезиса, осуществляя свои метаболические потребности, изменяют состав и свойства отдельных компонент грунта и грунта в целом. В результате многолетних исследований воздействия микроорганизмов на грунты автором разработана методология формирования заданных состава и свойств грунта биотехнологическими методами с использованием населяющих грунт микроорганизмов. Данная методология заключается в последовательном выполнении следующих этапов работ:

- оценка текущего состояния грунта;
- оценка микробной составляющей грунта;
- разработка технологии активирования микроорганизмов грунта;
- разработка технологии формирования состава и свойств грунта.

Исследования, проведенные в соответствии с разработанной методологией, позволили снизить фильтрационные характеристики песчаного грунта активированием жизнедеятельности аммонифицирующих

микроорганизмов, способствующей отложению кальцита в поровом пространстве грунта.

Изменение состава и свойств жидкой компоненты грунта породного отвала угледобывающей промышленности было достигнуто активированием жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих микроорганизмов, что приводило к снижению кислотности и ионной силы порового раствора.

Прекращение микробиологического процесса образования метана в теле земляной плотины в соответствии с разработанной методологией было достигнуто активированием жизнедеятельности железовосстанавливающих микроорганизмов, которые успешно конкурировали с метанобразующими микроорганизмами за органические соединения, подавляя тем самым их жизнедеятельность и, соответственно, газообразование.

На основании выявленных закономерностей изменения состава твердой, жидкой и газовой компонент грунта под действием процессов жизнедеятельности микроорганизмов разработаны биотехнологические методы формирования заданных свойств грунтов, которые нашли отражение в публикациях и патентах на изобретения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах автора:

в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Максимович Н.Г., Деменев А.Д., Хмурчик В.Т. Трансформация минерального состава дисперсного грунта в условиях микробиологического воздействия // Вестник Пермского университета, Сер. Геология, 2021, т. 20, № 1, с. 24-32.

2. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Деменев А.Д., Сединин А.М. Биотехнологический метод подавления метаногенеза в грунтовых плотинах // Гидротехническое строительство, 2019, № 1, с. 15-22.

3. Maksimovich N.G., **Khurchik V.T.**, Demenev A.D. The role of microorganisms in elevating the turbidity of dam seepage water // Power Technology and Engineering, 2016, Vol. 50, № 1, p. 6-8.
4. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Хайрулина Е.А., Деменев А.Д. Изучение микробиологических процессов при инженерных изысканиях // Инженерные изыскания, 2015, № 10-11, с. 28-32.
5. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Хайрулина Е.А., Деменев А.Д. Изучение микробиологических процессов в комплексе инженерных изысканий // Инженерные изыскания, 2015, № 9, с. 40-44.
6. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Деменев А.Д. Роль микроорганизмов в повышении мутности дренажных вод плотины // Гидротехническое строительство, 2015, № 11, с. 55-58.
7. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.** Биотехнологии в инженерной геологии // Инженерная геология, 2014, № 3, с. 18-25.
8. **Хмурчик В.Т.** Микробиологические исследования озера Черик-кель (Кабардино-Балкарская республика) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки, 2013, № 3, с. 60-62.
9. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.** Микробиологические процессы в грунтовых плотинах // Инженерные изыскания, 2013, № 9, с. 66-71.
10. **Хмурчик В.Т.**, Максимович Н.Г. Использование аборигенной микрофлоры для борьбы с нефтяным загрязнением подземных вод // Вестник ПГУ, Сер. Биология., 2007, Вып. 5 (10), с. 123-126.
11. **Хмурчик В.Т.** Использование автохтонной микрофлоры для борьбы с нефтяным загрязнением гидросферы на карстовых территориях // Наука - производству, 2006, № 1, с. 32-33.
12. Галкин В.И., Оборин А.А., **Хмурчик В.Т.** Основы теории, методологии и геолого-экономическая эффективность биогеохимических методов поиска месторождений нефти и газа // Наука - производству, 2006, № 1, с. 28-29.
13. **Хмурчик В.Т.**, Оборин А.А., Галкин В.И. Результаты нефтепоисковых биогеохимических исследований в зоне сочленения Башкирского свода и

Бы́мско-Кунгурской впадины // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2005, № 9-10, с. 30-34.

14. Оборин А.А., Рубинштейн Л.М., **Хмурчик В.Т.** Роль подземной микробиоты в потоках углерода в верхней части литосферы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2005, № 9-10, с. 34-36.

в изданиях, индексируемых Scopus/WoS

15. Maksimovich N.G., **Khurchik V.T.**, Demenev A.D., Meshcheryakova O.Yu. Assessment of the anaerobic microbial potential for the bioremediation of gas condensate-contaminated groundwater // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, Vol. 834, iss. 17, article 012046. doi:10.1088/1755-1315/834/1/012046.

16. **Khurchik V.T.**, Maksimovich N.G., Demenev A.D., Seredin V.V. Methodological basis of ground composition and traits formation by biotechnological techniques // In: Science and Global Challenges of the 21st Century - Science and Technology (Isaeva E., Rocha A., Eds.), – Perm, 2021. – Pp. 186-193.

17. Maksimovich N.G., Kudryashova O.S., **Khurchik V.T.**, Demenev A.D., Elokhov A.M., Kistanova N.S. Innovative techniques of ground infiltration characteristics reduction with chemical and biotechnological precipitation of calcium salts // In: Science and Global Challenges of the 21st Century - Science and Technology (Isaeva E., Rocha A., Eds.), – Perm, 2021. – Pp. 270-276.

18. Demenev A.D., **Khurchik V.T.**, Maksimovich N.G., Demeneva E.P., Sedinin A.M. Improvement of sand properties using bio-technological precipitation of calcite cement (CaCO₃). Journal of Environmental & Earth Sciences, 2021, Vol. 80, Article 580. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09818-w>.

19. Maksimovich N., **Khurchik V.**, Meshcheryakova O., Demenev A., Berezina O. The use of industrial alkaline wastes to neutralise acid drain water from waste rock piles // In: Mine Water Solutions (Pope J., Wolkersdorfer C., Sartz L., Weber A., Wolkersdorfer K., Eds.) – Proc. Postponed 14th IMWA Congr., 9-13 November, 2020. – New Zealand, Christchurch, 2020. p. 117-122.

20. Maksimovich N., **Khurchik V.**, Demenev A., Sedinin A., Berezina O. The general concept of Kizel coal basin remediation // In: Mine Water: Technological and Environmental Challenges (Khayrulina E., Wolkersdorfer C., Polyakova S., Bogus A., Eds.) – Proc Int Mine Water Assoc Conf, 2019, (15-19 July 2019, Perm, Russia). – Perm, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. 750 p. –p. 736-740.

21. Demenev A., **Khurchik V.**, Maksimovich N., Sedinin A., Kataeva E. The leaching of chemical elements from soils with biological agents and chemicals // Goldschmidt Abstracts. - Barselona, 2019. p. 768.

22. Maksimovich N., Pyankov S., **Khurchik V.**, Berezina O., Demenev A., Sedinin A. Coal basins and the environment // 11th ICARD IMWA MWD Conference - Risk to Opportunity: Proceedings IMWA2018 Annual Conference, Pretoria, South Africa - Pretoria, South Africa 2018. p. 406-410.

23. Demenev A.D., Maksimovich N.G., **Khurchik V.T.**, Sedinin A.M. Microbial changes of the earth dam mechanical properties and the improvement of them // In: Shakoor A., Cato K. (Eds.) IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 4. p. 41-45.

24. Maksimovich N.G., **Khurchik V.T.**, Demenev A.D., Sedinin A.M. Microbial activity within the earth dam: Consequences and the suppression strategy // In: Shakoor A., Cato K. (Eds.) IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 4. p. 3-7.

25. Maksimovich N., Meshcheriakova O., **Khurchik V.** Bacterial processes in oil-polluted karst environments in Perm region (Russian Federation) // In: Shakoor A., Cato K. (Eds.) IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 3. p. 103-107.

26. Khayrulina E., **Khurchik V.**, Maksimovich N. The Kizel coal basin (the Western Urals, Russia): Environmental problems and solutions // In: Mining Meets Water - Conflicts and Solutions: Proceedings IMWA2016 Annual Conference, Leipzig, Germany. - Leipzig, Germany, 2016. p. 766–771.

27. Maksimovich N.G., **Khmurchik V.T.**, Meshcheryakova O.Yu. Bacterial sulfate-reducing process in oil-polluted karst rocks // Goldschmidt Abstracts. – Yokohama, 2016. p. 1948.

28. Maksimovich N.G., **Khmurchik V.T.** The Influence of microbiological processes on subsurface waters and grounds in river dam basement // In: “Engineering Geology for Society and Territory”, Vol. 6 “Applied Geology for Major Engineering Projects” (Lollino G. et al. Eds.) - Springer, 2015 - p. 563-565.

29. Maksimovich N.G., **Khmurchik V.T.** Remediation of oil-polluted groundwater aquifers at karst region // In: “Engineering Geology for Society and Territory”, Vol. 3 “River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources” (Lollino G. et al. Eds.) - Springer, 2015 - p. 417-419.

30. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Лаздовская М.А., Деменев А.Д. Комплекс методов исследования микробиологической активности в грунтовых плотинах // Вестник СПбГУ, 2014, Сер. 7, Вып. 4, с. 88-100.

31. Oborin A.A., Rubinstein L.M., **Khmurchik V.T.** On the concept for the organization of the modern biosphere in the terrestrial subsurface // In: "Biosphere Origin and Evolution" (N. Dobretsov et al. Eds.) - Springer, 2007 -P. 199-205.

в прочих изданиях

32. Maksimovich N., **Khmurchik V.**, Meshcheriakova O., Demenev A, Berezina O. The use of industrial alkaline wastes to neutralise acid drain water from waste rock piles // In: Mine Water Solutions (Pope J., Wolkersdorfer C., Sartz L., Weber A., Wolkersdorfer K., Eds.) – Proc. of the postponed 14th IMWA Congr., 9-13 November, 2020. – New Zealand, Christchurch. – p. 117-122.

33. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.** Влияние микроорганизмов на минеральный состав и свойства грунтов // Вестник Пермского университета, сер. Геология, 2012, Вып. 3 (16), с. 47-54.

34. Блинов С.М., **Хмурчик В.Т.**, Абдуллин Ш.Р., Щукова И.В. Комплексные исследования субаквальных карстовых источников заповедника "Вишерский". // Вестник Пермского университета, сер. Геология, 2008, Вып. 10 (26), с. 111-123.

монографии

1. Оборин А.А., **Хмурчик В.Т.**, Иларионов С.А., Маркарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биогеоценозы (Процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы). – Пермь, УрО РАН, ПГУ, ПГТУ, 2008. 511 с.
2. Оборин А.А., Рубинштейн Л.М., **Хмурчик В.Т.**, Чурилова Н.С. Концепция организованности подземной биосферы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 148 с.

патенты на изобретения

1. **Хмурчик В.Т.**, Максимович Н.Г., Деменев А.Д., Роговский Г.М., Роговский А.Г., Барышников А.М. Комплекс очистки грунтовых вод, загрязненных растворенными нефтепродуктами, и способ очистки грунтовых вод, загрязненных растворенными нефтепродуктами // Патент РФ 2759738, С1 МПК С02F 3/34. Патентообладатель ООО «Лаборатория Неразрушающего Контроля»; заявл. 05.10.2020; опубл. 17.11.2021, Бюл. № 32.
2. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Деменев А.Д., Сединин А.М. Способ защиты плотин от разрушения // Патент РФ 2697272, МПК E02B 7/06 (2006.01); заявитель и патентообладатель ФГОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; заявл. 29.10.2018; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23
3. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Деменев А.Д. Состав и способ укрепления грунтов // Патент РФ 2646279, МПК E02D 3/12, С09К 17/40; заявитель и патентообладатель ООО «Природоохранные технологии»; заявл. 27.07.16; опубл. 02.03.18, Бюл. № 7.
4. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.** Способ определения пораженности грунтов газообразующими микроорганизмами // Патент РФ 2592268, МПК С12Q 1/04, С12Q 1/64; заявитель и патентообладатель ГОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ООО «Природоохранные технологии»; заявл. 02.07.13; опубл. 20.07.16, Бюл. № 20.

5. **Хмурчик В.Т.**, Максимович Н.Г. Способ отбора веществ ингибиторов газообразования в почвогрунтах // Патент РФ № 2565409, МПК E02D 1/00, G01N 33/24; заявитель и патентообладатель ООО «Природоохранные технологии»; заявл. 30.07.14; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29.

6. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.** Консорциум штаммов углеводородокисляющих бактерий *Pseudomonas aeruginosa* НД К3-1 и *Pseudomonas fluorescens* НД К3-2 в качестве деструктора нефтепродуктов и способ очистки нефтезагрязненных подземных вод // Патент РФ 2312719, С1 МПК B09C 1/10, C12N 1/26. Патентообладатель ООО "ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ"; заявл. 15.02.06; опубл. 20.12.07, Бюл. № 35.

7. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.** Пробоотборник // Патент РФ на полезную модель № 54398, МПК E21B 49/08; заявитель и патентообладатель ФГНУ "Естественнонаучный институт"; заявл. 16.12.05; опубл. 27.06.06, Бюл. "Изобретения. Полезные модели", № 18 (III ч.).- с. 869-870.

8. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Сединин А.М., Деменев А.Д. Способ предотвращения образования кислых стоков с отвалов горнорудной промышленности // Заявка № 2021119326 от 30.06.2021.

9. Максимович Н.Г., **Хмурчик В.Т.**, Сединин А.М., Деменев А.Д. Способ предотвращения загрязнения поверхностных вод тяжелыми металлами, десорбирующимися из техногенных отложений // Заявка № 2021119556 от 02.07.2021.