

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»
Геологический факультет
Кафедра инженерной и экологической геологии



на правах рукописи

Иванов Павел Владиславович

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ
ГРУНТОВ ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ИХ ПРИРОДНОГО МИКРОБНОГО
КОМПЛЕКСА

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук

Научные руководители:
профессор, д. г.-м. н. ТРОФИМОВ Виктор Титович
профессор, д. б. н. МАНУЧАРОВА Наталия Александровна

Москва, 2015

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГРУНТОВ	9
1.1. Условия существования и виды микроорганизмов в грунтах	9
1.2. Состав и численность микроорганизмов в грунтах	14
1.3. Влияние микроорганизмов на состав грунтов	18
1.4. Влияние микроорганизмов на строение грунтов	25
1.5. Влияние микроорганизмов на свойства грунтов	34
1.6. Активизация микробиологических процессов при антропогенном воздействии на грунты	39
1.7. Перспективы использования микробиологических процессов в инженерно-хозяйственной деятельности	43
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ГРУНТОВ И ИХ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА	49
2.1. Микробная сукцессия, инициированная увлажнением питательным веществом (глюкозой), как метод изучения влияния микробиоты на состав, строение и свойства грунтов	49
2.2. Методика изучения характеристик микробного комплекса грунтов	53
2.3. Методика изучения состава грунтов	58
2.4. Методика изучения строения и состояния грунтов	60
2.5. Методика изучения показателей свойств грунтов	61
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	63
3.1. Характеристика изученных образцов грунтов	63
3.1.1. Характеристика природных песчаных грунтов	65
3.1.2. Характеристика природных глинистых грунтов	69
3.1.3. Характеристика природных глинистых грунтов основания земляных плотин Камской ГЭС	73
3.1.4. Характеристика техногенных грунтов	75
3.1.5. Характеристика модельных глинистых грунтов	81
3.2. Характеристика микробных комплексов изученных образцов грунтов	82
ГЛАВА 4. ТРАНСФОРМАЦИЯ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА ГРУНТОВ В ХОДЕ СУКЦЕССИИ	91
4.1. Изменение активности дыхания микроорганизмов (эмиссии углекислого газа) в ходе сукцессии	91
4.2. Изменение биомассы микробного комплекса	93

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ АКТИВИЗАЦИИ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА ГРУНТОВ НА ИХ СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА	102
5.1. Изменение химико-минерального состава грунтов.....	102
5.2. Изменение строения грунтов	117
5.2.1. Понятия «биогенные» и «биогенно обусловленные» структурные связи.....	117
5.2.2. Изменение строения грунтов по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ).....	120
5.2.3. Изменение микроагрегатного состава грунтов	124
5.3. Изменение свойств грунтов	132
5.3.1. Изменение показателей свойств грунтов при обработке накопительной культурой микроорганизмов.....	132
5.3.2. Изменение показателей свойств грунтов в ходе микробной сукцессии, вызванной увлажнением питательным веществом – глюкозой.....	134
5.4. Практические рекомендации	146
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЯ	160
Приложение 1. Каталог исследованных образцов.....	160
Приложение 2. Результаты определения химико-минерального состава грунтов.....	162
Приложение 3. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа грунтов	164
Приложение 4. Характеристики исходного гранулометрического и микроагрегатного состава грунтов	177
Приложение 5. Некоторые показатели состава и свойств аллювиальных грунтов основания земляных плотин Камской ГЭС	181
Приложение 6. Численность и биомасса основных типов микроорганизмов в изученных грунтах	182
Приложение 7. Характеристики исследуемых грунтов в ходе микробной сукцессии	183

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Несмотря на то, что микроорганизмы широко распространены в грунтах, роль микробиологических процессов в инженерной геологии изучена недостаточно. Начиная с конца XIX века микроорганизмы широко изучаются в почвоведении и геохимии, тогда как исследования их роли в формировании свойств грунтов в инженерной геологии, по сути, впервые были проведены только в 70х годах прошлого столетия. До сих пор многие инженер-геологи пренебрегают ролью микроорганизмов в формировании состава, строения и свойств грунтов и при их взаимодействии с основаниями инженерных сооружений.

Антропогенное загрязнение в условиях освоения геологической среды является важным фактором активизации микробиологических процессов в этих грунтах. На сегодняшний момент существуют исследования, показывающие протекание активной жизнедеятельности микроорганизмов в основаниях инженерных объектов – плотинах гидроэлектростанций, подземных сооружениях, свалках бытовых и промышленных отходов, площадках очистки грунтов от нефтяных и других загрязнений. Для обеспечения безопасной эксплуатации этих сооружений необходимо оценить возможные изменения состава, строения и свойств грунтов.

В настоящее время активно разрабатываются и внедряются в практику биологические методы улучшения грунтов. Существуют методы очистки грунтов от загрязнений и укрепления грунтов за счет микробиологических процессов. В большинстве таких работ определяются изменения лишь тех свойств, на которые направлена применяемая технология. Однако необходимость использования этих грунтов в дальнейшей инженерно-хозяйственной деятельности ставит задачу комплексной оценки изменения состава, строения и свойств грунтов при такой обработке.

Целью работы является оценка изменений состава, строения и свойств дисперсных грунтов при активизации их функционального микробного комплекса.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Выявить закономерности изменения активности и численности микроорганизмов в дисперсных грунтах во времени при однократной активизации их природного микробного комплекса питательным веществом – раствором глюкозы.
2. Выявить закономерности изменения химико-минерального состава грунтов при однократной активизации микробного комплекса.
3. Изучить влияние однократной активизации микроорганизмов на структурные особенности грунтов – их микроагрегатный состав и их микростроение.

4. Выявить закономерности влияния активизации микробиологических процессов на прочностные и деформационные свойства грунтов.

Объекты исследования. В качестве объектов исследования отобраны природные и техногенные песчаные и глинистые грунты различной дисперсности, возраста, генезиса и глубины залегания. Объектами исследования также являлись микробные комплексы этих грунтов. Часть экспериментов выполнена на модельных мономинеральных глинистых грунтах каолинитового и монтмориillonитового составов.

Предметом исследования являются закономерности изменения состава, строения и свойств дисперсных грунтов в результате активизации микробиологических процессов.

Фактический материал получен в ходе лабораторных исследований автора в 2011-2015 г. на образцах грунтов, отобранных в различных районах г. Москвы и г. Перми. В работе использованы фондовые материалы Естественнонаучного института ПГНИУ, ООО «СК КРЕАЛ», ЗАО «Инжэко Центр» и ООО «Карбон». Далее в тексте работы рисунки и таблицы, заимствованные автором из других источников, сопровождаются необходимыми ссылками. (Таблицы и рисунки, составленные по результатам собственных исследований автора, ссылками не сопровождаются.)

Личный вклад автора состоит в организации, планировании и проведении лабораторных экспериментов по оценке изменения состава, строения и свойств грунтов при активизации их природного микробного комплекса, а также в обработке и обобщении полученного материала и его научном анализе.

Методы исследования. В работе использован комплекс современных методов изучения состава, строения и свойств грунтов, а также их микробного комплекса. Анализ активности и численности микроорганизмов выполнен на кафедре биологии почв факультета почвоведения МГУ методом газовой хроматографии и прямого подсчета с помощью люминесцентной микроскопии. Определения параметров состава, строения и свойств грунтов выполнены на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ. Эксперименты проводились с привлечением современного оборудования, полученного в рамках реализации Программы развития МГУ имени М.В.Ломоносова. Оценка изменений минерального состава грунтов выполнена методом рентгеновской дифрактометрии на приборе Rigaku Ultima IV. Оценка изменения строения грунтов выполнена с помощью рентгеновского компьютерного микротомографа Yamato TDM-1000H-II и растрового электронного микроскопа LEO 1450VP. Анализ прочности (временного сопротивления одноосному сжатию) образцов грунтов проведен с помощью прессы МП-2с, прочности песчаных грунтов на сдвиг – на автоматизированной системе АСИС «Геотек», определение деформационных свойств выполнено компрессионным

методом в одомере ЦНИИ МПС. Обработка данных велась с помощью прикладных компьютерных программ (Microsoft Excel 2010, Statistica и др.).

Научная новизна исследований.

1. Экспериментально установлено явление активизации природного микробного комплекса природных и техногенных грунтов геологического разреза г. Москвы с максимумом на 7 сутки после однократного внесения питательного вещества – раствора глюкозы, – и формирования стабильного (остаточного) микробного комплекса после 15-21 суток эксперимента.

2. Экспериментально установлены преобразование смешанослойных глинистых минералов иллит-сметитового состава и разрушение карбонатов при однократной активизации микробного комплекса грунтов, обусловленное прямым (потребление микроорганизмами биофильных элементов) и косвенным (за счет продуктов метаболизма, в том числе, углекислого газа) воздействиями микробиоты.

3. Введено понятие «биогенно обусловленные структурные связи» в грунтах, отражающее контакты химической и физико-химической природы между твердыми структурными элементами, образующиеся за счет продуктов метаболизма микроорганизмов и их взаимодействия с компонентами системы. Уточнено понятие «биогенные структурные связи», описывающее связи, образующиеся при непосредственном участии живых клеток, изучена их морфология и оценена прочность.

4. На основе сукцессионного подхода к оценке влияния микробиологических процессов на характеристики грунтов установлены явления агрегации структурных элементов грунта в крупные агрегаты, а также снижение показателей прочностных и деформационных свойств в момент максимальной микробной активности и частичное восстановление показателей строения и свойств грунтов при снижении микробной активности.

Практическая значимость

1. Предложены рекомендации по комплексу наблюдений на объектах, подверженных загрязнению различными органическими веществами, активизирующими микробную составляющую грунтов (канализационными стоками, нефтепродуктами, полисахаридами и т.п.), для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений.

2. Получены данные по активизации природного микробного комплекса различных дисперсных грунтов и их влиянию на показатели состава, строения и свойств грунтов, которые могут быть использованы в рамках практических и теоретических учебных курсов на кафедре инженерной и экологической геологии.

Защищаемые положения

1. Установлено явление резкого возрастания активности микробного комплекса дисперсных грунтов и увеличения его биомассы с максимумом на 7 сутки при увлажнении грунта питательным соединением – глюкозой, с последующим спадом активности и численности и формированием остаточного стабильного микробного комплекса с показателями в 1,5-5 раз выше, чем у исходного грунта, что объясняется равновесием процессов разложения вещества отмерших клеток и развития новой биомассы.

2. При активизации природного микробного комплекса происходит изменение химико-минерального состава грунтов, проявляющееся в следующем:

а) иллитовые пакеты в смешанослойных минералах иллит-сметитового состава переходят в набухающие пакеты; наблюдается повышение дефектности кристаллических решеток всех глинистых минералов и их разрушение, эти изменения необратимы при спаде микробной активности;

б) карбонаты разрушаются за счет увеличения концентрации углекислого газа в поровом растворе в результате дыхания микроорганизмов; при снижении микробной активности содержание ионов кальция и гидрокарбонатов в грунтовых суспензиях закономерно уменьшается.

3. В период максимальной микробной активности в грунтах формируются биогенные и биогенно обусловленные структурные связи за счет адгезии клеток, механического спутывания частиц грунта клетками и колониями клеток и взаимодействия продуктов метаболизма с твердым компонентом грунта, что приводит к формированию крупных агрегатов, которые частично распадаются при снижении микробиологической активности.

4. Частичное замещение исходных абиогенных контактов биогенными и биогенно обусловленными на этапе максимальной активности микробного комплекса приводит к увеличению сцепления и снижению трения в несвязных грунтах, а также к уменьшению прочности на одноосное сжатие связных грунтов; дальнейшее преобразование состава и структуры грунта, связанное со спадом микробной активности, обуславливает снижение сцепления, увеличение угла внутреннего трения и прочности грунтов на одноосное сжатие.

Апробация работы. Результаты работы доложены на 7 конференциях, в том числе на 4 международных: «Международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых ЛОМОНОСОВ-2014 и 2015»; II Международной летней школе «Геоэкологические проблемы Приуралья» в г. Пермь в 2013 г.; «7 Среднеевропейской конференции по глинам и глинистым минералам» в г. Дрезден, Германия, в 2014 г.; а также на «XII Конференции Студенческого Научного Общества Геологического факультета СПбГУ» г. Санкт-Петербург, в 2014 г. и Ломоносовских Чтениях в МГУ в 2014 и 2015 гг.

Публикации. Материалы, составившие основу диссертации и доказывающие перечисленные выше защищаемые положения, опубликованы в 4 научных статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; в 1 статье в журнале «Охрана природы и природопользование»; а также в 7 сборниках тезисов конференций

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с разделами и подразделами, выводов и 7 приложений, изложенных на 187 страницах текста, содержит 78 рисунков, 23 таблицы и список литературы из 142 наименований, из которых 41 на иностранном языке, 16 электронных Интернет-ресурсов общего доступа, 5 фоновых.

Благодарности. Автор выражает благодарность за возможность выполнения работы, всестороннюю поддержку, ценные советы и замечания своим научным руководителям, д. г.-м. н., профессору Трофимову В.Т. и д.б.н., доценту Манучаровой Н.А. Автор выражает глубокую благодарность и признательность к.г.-м.н., доценту Николаевой С.К., к.г.-м.н., с.н.с. Крупской В.В., инж. Гараниной С.В., асп. Закусину С.В., к.г.-м.н., доценту Самарину Е.Н., к.г.-м.н., с.н.с. Ларионовой Н.А., д.г.-м.н., профессору Соколову В.Н., к.г.-м.н., с.н.с. Чернову М.С., асп. Булыгиной Л.Г.; учебно-вспомогательному составу лабораторий грунтоведения и технической мелиорации грунтов, а также механики грунтов; ассистенту кафедры микробиологии биологического факультета МГУ Куненковой Н.Н.; сотрудникам Лаборатории геологии техногенных процессов Естественного научного института Пермского государственного научно-исследовательского института и лично ее заведующему профессору Максимовичу Н.Г.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГРУНТОВ

1.1. Условия существования и виды микроорганизмов в грунтах

В современном грунтоведении живые организмы признаны важной составляющей грунтов. Они находятся в тесной взаимосвязи с твердым, жидким и газообразным компонентами грунта, влияя на его состав, строение, состояние и свойства [Нижарадзе и др., 1988, Грунтоведение, 2005]. Живая составляющая грунтов включает макро- и микроорганизмы, однако, влияние микроорганизмов на грунты несравнимо больше, чем макроорганизмов. Микроорганизмы – это группа, объединяющая весьма разнообразные живые организмы, размер которых 3-5 микрон [Звягинцев и др., 2005].

Диапазон условий, в которых живут и функционируют микроорганизмы, чрезвычайно широк. Существуют бактерии, которые могут развиваться при отрицательных (до -30°C) температурах, и организмы, живущие в горячих источниках (более 121°C). Микроорганизмы способны выживать в различных условиях доступности воды (показатель активности воды a_w от 0 до 0,67), при давлении до 1200 атм., в средах с любой кислотностью (рН от 0 до 13), в условиях крайне токсичной среды, при повышенных содержаниях тяжелых металлов. Некоторые бактерии (*Deinococcus radiodurans*) обнаружены даже в реакторах атомных станций при уровне излучения около 10 кРад [Microbial Life in Extreme Environments, 1978]. Поэтому микроорганизмы в том или ином количестве распространены практически в любых условиях, в любых грунтах и водах, так или иначе влияя на свойства «материнских» грунтов [Звягинцев и др., 2005].

По условиям потребления воздуха микроорганизмы делятся на аэробные (существующие за счет кислорода воздуха) и анаэробные (развивающиеся в бескислородных условиях) [Грунтоведение, 2005]. «Переходные» формы, способные развиваться в условиях низких концентраций кислорода, называются микроаэрофильными организмами [Звягинцев и др., 2005].

Грунт – система трехфазная. В ней содержится множество микрозон, частично или полностью изолированных, в которых создаются резко отличные, а часто даже противоположные условия существования микроорганизмов. Живые организмы могут находиться в грунте на поверхности твердых частиц, в поровом растворе, в порах, трещинах, кавернах и пустотах [Грунтоведение, 2005]. При этом считается, что на поверхности существуют аэробные организмы, а внутри агрегатов – анаэробные. Но и внутри агрегатов при определенных условиях могут существовать аэробные условия. Причем распределение

кислорода внутри грунта может изменяться во времени, тем самым изменяется и видовой состав микроорганизмов в грунте [Звягинцев, 1987].

Исследования показывают, что на поверхности минеральных частиц находится в среднем в 100 раз больше клеток (в пересчете на 1 г грунта), чем в поровой жидкости. Высокая концентрация клеток наблюдается на органических включениях (в частности, на растительных остатках) [Kolbel-Boelke et al., 1988], а наиболее «насыщенны» микроорганизмами зоны вокруг корней живых растений в почвах [Banfield et al., 1998].

По типу питания микроорганизмы делятся на гетеротрофные и автотрофные. Развитие автотрофных микроорганизмов происходит за счет световой энергии или энергии окисления ряда неорганических соединений. Гетеротрофные микроорганизмы используют для своей жизнедеятельности различные органические вещества, их отдельные представители очень разнообразны по своим свойствам, могут развиваться как в присутствии, так и в отсутствии кислорода [Звягинцев и др., 2005]. Многие гетеротрофные микроорганизмы, обитающие в грунтах, могут развиваться в очень бедных питательными веществами растворах, где концентрация органического вещества в растворе составляет не более 5 мг/л. Это – олиготрофные микроорганизмы, обычно располагающиеся на поверхности минеральных частиц и получающие питание из омывающих их растворов [Нижарадзе и др., 1988].

Микроорганизмы крайне чувствительны к изменениям условий жизнедеятельности, но могут быстро подстраиваться под новые характеристики среды обитания. При этом изменяется их численность, интенсивность жизнедеятельности, образуются другие продукты метаболизма, тем самым, меняется и влияние организмов на грунт. К таким резким перестроениям могут вести незначительные на первый взгляд изменения условий, например, привнесение в систему низкой концентрации органических веществ, уменьшение или увеличение температуры на несколько градусов, проникновение в анаэробную систему кислорода или его удаление из аэробной и т.п. В результате под влиянием внутренних и внешних факторов происходит изменение численности и видового состава микроорганизмов. В каждый момент времени отдельные популяции находятся в равновесии, но общая направленность развития сообщества определяется условиями среды и их изменениями [Полянская, 1996].

Микроорганизмы обладают почти универсальной способностью выполнять те или иные геохимические функции ввиду следующих своих особенностей [Заварзин, 1972]. Во-первых, для микроорганизмов характерно значительное соотношение площади поверхности к объему организма, что обеспечивает высокую физиологическую (биогеохимическую) активность. Во-вторых, при благоприятных для жизнедеятельности условиях микроорганизмы размножаются с колоссальной скоростью, их влияние на среду возрастает.

В-третьих, микроорганизмы – единственные живые существа, обладающие лабильностью метаболизма. Они могут использовать любой из 8 известных в биологии типов питания (табл. 1) и при недостатке ресурсов быстро переходить на другой тип. В-четвертых, микроорганизмы способны трансформировать многие химические элементы, которые не усваивает ни одно другое живое существо. По некоторым данным, микроорганизмы способны потреблять соединения ртути, мышьяка, сурьмы, кадмия, хрома и других элементов, в общей сложности, порядка 70 (для сравнения, человек способен трансформировать лишь порядка 25 различных химических элементов).

Таблица 1. Типы питания микроорганизмов [по Е.Н. Кондратьевой,
<http://refdb.ru/look/2846750.html>, 02.06.2015]

Источник энергии	Донор электронов	Источник углерода	
		органические вещества	углекислый газ
Свет	органические вещества	фотоорганогетеротрофия	фотоорганоавтотрофия
	неорганические вещества	фотолитогетеротрофия	фотолитоавтотрофия
Энергия химических связей	органические вещества	хемоорганогетеротрофия	хемоорганоавтотрофия
	неорганические вещества	хемолитогетеротрофия	хемолитоавтотрофия

Состав микроорганизмов, обитающих в грунтах, весьма разнообразен: это в основном бактерии, актиномицеты, грибы и простейшие [Нижарадзе и др., 1988].

Грибы. Грибы составляют отдельное царство *Fungi* [Звягинцев и др., 2005], которое объединяет эукариотные организмы относительно простой организации - от одноклеточных до нитчатых (рис. 1). Размножаются они спорами. Разрастаясь на поверхности или в глубине субстрата, грибы соприкасаются с ним клеточной оболочкой, через которую они выделяют во внешнюю среду ферменты и поглощают питательные вещества адсорбтивным путем. За сутки грибы разлагают в 2-7 раз больше органического вещества, чем потребляют.

Такой тип взаимодействия с субстратом определяет положение грибов как «разлагателей» органических веществ в экосистемах. Грибы образуют мицелий, или грибницу, состоящую из ветвящихся нитей – гиф с апикальным верхушечным ростом и

боковым ветвлением. Такое строение позволяет грибу максимально оккупировать субстрат для извлечения из него питательных веществ [Звягинцев и др., 2005].

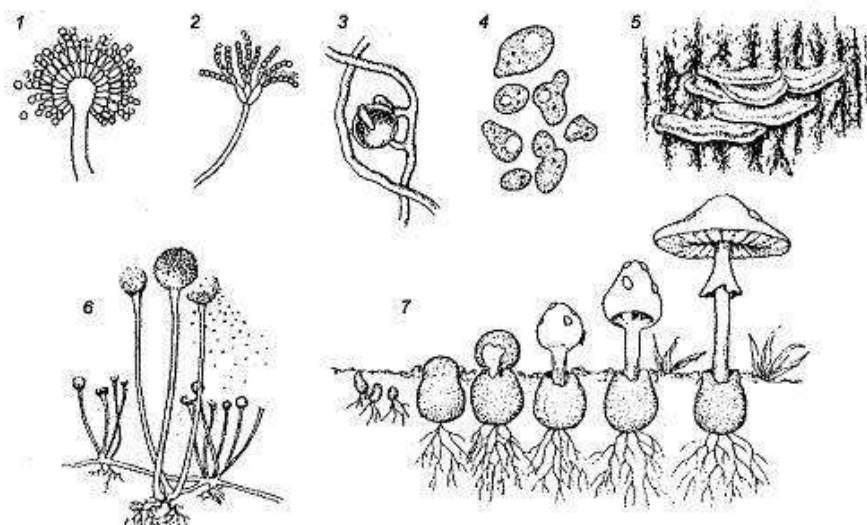


Рис. 1. Грибы: 1 – аспергилл, 2 – пеницилл, 3 – водная пень, 4 – дрожжи, 5 – трутовик настоящий, 6 – хлебная плесень, 7 – шляпочные грибы [<http://ecology-portal.ru/publ/4-1-0-178>, 12.08.2014]

Быстрое накопление биомассы и продуцирование различных биологически активных веществ сделали грибы важными продуктами питания и объектами микробиологической промышленности. Подавляющее большинство грибов – аэробы, поэтому очень чувствительны к глубине залегания грунта. Численность грибов резко сокращается с глубиной, наиболее населенными являются верхние сантиметры грунтового массива – почвы. Биомасса, накапливаемая в почве грибами, достигает 1-2 т/га. [Звягинцев и др., 2005].

Бактерии. Бактерия - это одноклеточный микроорганизм, для которого характерны наличие нуклеоида (центральной зоны клетки, в которой располагается нитевидная молекула ДНК), цитоплазматической мембраны, плотной клеточной стенки и размножение поперечным делением (рис. 2). Цитоплазматическая мембрана, окружающая каждую клетку, определяет ее величину. Но мембрана – не просто механическая перегородка. Она служит высокоизбирательным фильтром, который поддерживает разницу ионов по обе стороны мембраны и позволяет питательным веществам проникать внутрь клетки, а продуктам выделения выходить наружу [Звягинцев и др., 2005].



Рис. 2. Схема строения клетки бактерий [http://www.happydoctor.ru/info/485, 12.08.2014]

Структуры, расположенные снаружи от цитоплазматической мембраны, – клеточная стенка, капсула, жгутики и др., – являются поверхностными. Клеточная стенка – важный и обязательный структурный элемент, располагающийся под капсулой. Она выполняет разнообразные функции: механически защищает клетку от воздействия окружающей среды, обеспечивает поддержание ее внешней формы, дает возможность клетке существовать в гипотонических растворах. С ней связана проницаемость и транспорт веществ в клетку. Бактериальные клетки осуществляют движение за счет просто устроенных жгутиков, они активно плавают в жидкой среде либо скользят, выделяя слизь и перемещаясь по поверхности плотного субстрата [Звягинцев и др., 2005].

Покоящиеся клетки бактерий представлены эндоспорами. Споры обладают уникальной устойчивостью к неблагоприятным воздействиям. Особенно поразительна устойчивость бактериальных спор к нагреванию: некоторые споры переносят кипячение в течение 1 часа и более и при этом не теряют жизнеспособности. Очень стойки споры и к высушиванию [Звягинцев и др., 2005].

В природных экосистемах, в первую очередь в почве, бактерии, как и грибы, выполняют функции редуцентов: разлагая органические остатки, они возвращают все элементы в круговорот. Бактерии, обладающие фотосинтетическими пигментами, являются первичными продуцентами в экосистемах [Звягинцев и др., 2005].

Актиномицеты. Актиномицеты составляют своеобразную группу бактерий, многим из которых свойственно морфологическое разнообразие клеток, в том числе способность к формированию ветвящегося мицелия. Мицелиальная организация определяет сходство актиномицетов с грибами. Они подобны грибам и по способности продуцировать

внеклеточные ферменты-гидролазы, способные разлагать сложные полимерные соединения [Звягинцев и др., 2005].

Мицелий актиномицетов очень тонкий (диаметром 0,5-1,0 мкм). При росте на плотных средах часть мицелия проникает в питательный субстрат, а часть развивается над субстратом. Размножаются актиномицеты фрагментами мицелия и спорами. Споры могут быть одиночными, двойными, собранными в цепочки разной формы и длины или в спорангиях. Спороносцы бывают прямыми, волнистыми, спиральными, располагаются на мицелии поочередно, либо мутовками (рис. 3).

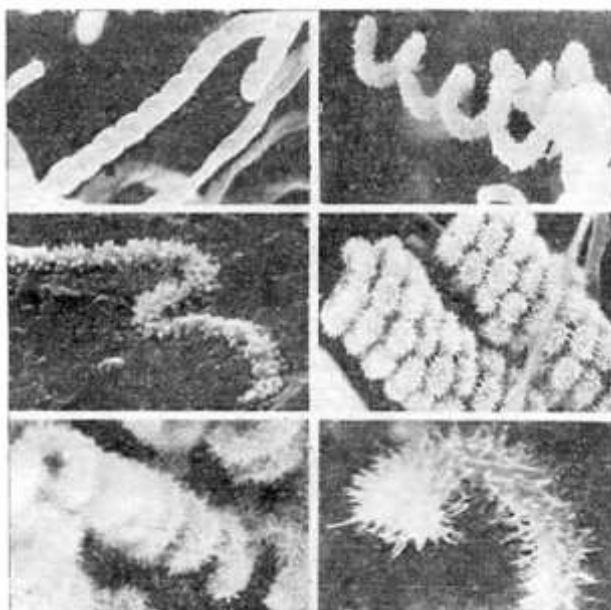


Рис. 3. Спороносцы актиномицетов на РЭМ-изображениях [<http://fordgood.ru/biologiya-pochv/1666-otdelnye-gruppy-pochvennyh-organizmov-chast-17.html>, 12.08.2014]

Природное местообитание актиномицетов – почва; их основная экологическая роль – разложение органического вещества на поверхности и в толще почвы. Актиномицеты образуют гидролитические ферменты и участвуют в почве в разложении целлюлозы, хитина, лигнина, гумусоподобных соединений [Звягинцев и др., 2005].

1.2. Состав и численность микроорганизмов в грунтах

К настоящему времени накоплен достаточно обширный материал о составе, численности и геохимических функциях микроорганизмов в почвах, тогда как данные о микробных комплексах и микробиологических процессах в более глубоких горизонтах грунтовых массивов немногочисленны и не систематизированы.

Наибольшая численность микроорганизмов зафиксирована в верхних 10-15 см грунтового массива (в почвах) (табл. 2). Так, в среднем в 1 г почвы содержится 10^5 - 10^9 клеток бактерий, около 10^3 - 10^6 клеток низших грибов и актиномицетов, 10^3 - 10^4 клеток низших водорослей и 10^2 - 10^3 клеток простейших. Суммарная внешняя поверхность этих микроорганизмов достигает огромной величины, благодаря чему ими и оказывается сильное влияние на состав и свойства грунтов [Грунтоведение, 2005].

Таблица 2. Среднее количество микроорганизмов в почвах [Грунтоведение, 2005, стр. 182]

Почвы	Общее количество микроорганизмов	
	тыс. экз. в 1 г почвы	в тоннах живой массы на 1 га верхнего горизонта почвы
Подзолы	600-800	~2
Дерново-подзолистые	600-1000	~3
Черноземы	2000-2500	~6

В грунтовых массивах общая численность микроорганизмов составляет 10^6 - 10^8 кл/мл, что на 1-2 порядка меньше, чем в почвах. В песчаных грунтах, моренных суглинках и ленточных глинах преобладают бактерии, тогда как в лессах они доминируют лишь в верхней части профиля, ниже по разрезу преобладают мицелиальные формы (грибы и актиномицеты). С глубиной численность организмов меняется незначительно, однако отмечается тенденция ее увеличения вблизи уровня грунтовых вод [Роот и др., 1982].

Существуют исследования, показывающие, что в верхних горизонтах лессовых грунтов на территории г. Ростов-на-Дону общая численность микроорганизмов достигает 3.0 млн. клеток на 1 г грунта. По мере увеличения глубины залегания грунтов численность микроорганизмов несколько сокращается и достигает не более 500 тыс. клеток на 1 г грунта [Хансиварова, Гайдакина, 2000; Хансиварова и др., 2001]. Отмечено, что в горизонтах погребенных почв значительно возрастает численность актиномицетов (рис. 4).

И.Н. Болотина и Е.М. Сергеев [1987] отмечают, что микрофлора верхних горизонтов массивов лессовых грунтов при неглубоком залегании уровня грунтовых вод достигает 10 мг/кг грунта, причем преобладают мицелиальные организмы. Тогда как в молодых лессах Киргизии отмечено наличие лишь отдельных видов бактерий. Развитие в лессах юга СССР психрофильных бактерий (развивающихся при низких температурах) исследователи считают

доказательством теории формирования лессов, связанной с циклическим промерзанием и протаиванием.

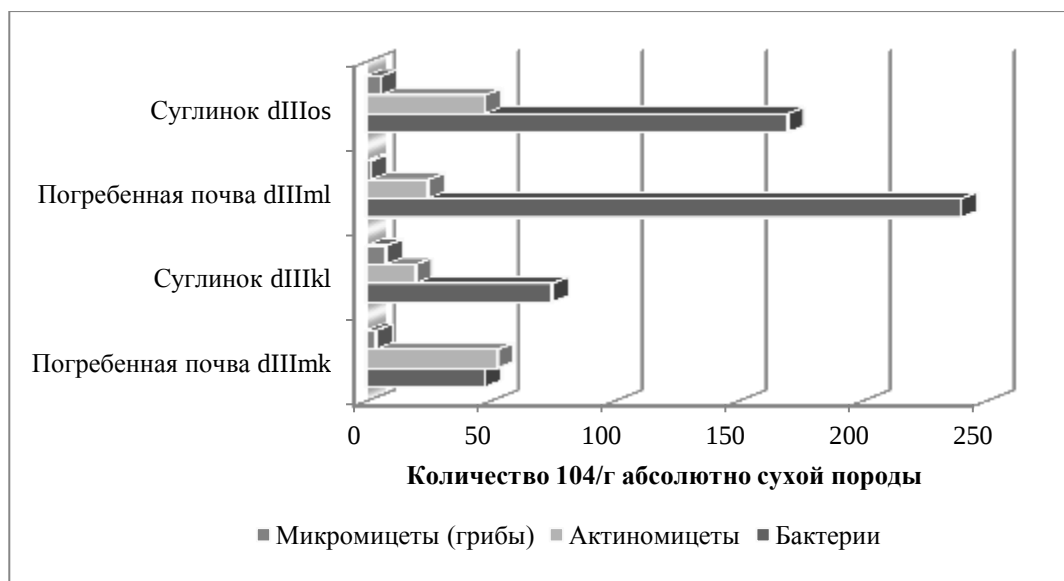


Рис. 4. Численность микроорганизмов в лессовых породах г. Ростова-на-Дону [составлено автором по Хансиварова и др., 2001]

Немецкими исследователями изучалась численность микроорганизмов в песчаных грунтах в районе г. Бохольт, Германия. Было установлено, что в песчаных грунтах содержится порядка 10^8 клеток бактерий на 1 г грунта, практически вне зависимости от глубины отбора образца. При этом количество метаболически активных клеток в 10-100 раз меньше и резко сокращается с глубиной в верхних 5 м разреза (примерно в 10 раз), затем до изученной глубины (35 м) изменяется слабо [Kolbel-Boelke et al., 1988].

Сокращение численности метаболически активных клеток с глубиной объясняется уменьшением содержания органического вещества в грунтах [Atekwana et al., 2006]. Тем не менее, в песчаных грунтах возможно проникновение органического вещества в относительно глубокие горизонты при инфильтрации атмосферных осадков через зону аэрации.

В песчаных почвах пустынь Монголии общая численность микроорганизмов оценена в 6×10^8 кл/г грунта [Манучарова и др., 2011]. В образцах намывных песчаных грунтов бухты Даяоуань (Китай) обнаружено 9×10^8 клеток бактерий, около 80 м мицелия актиномицет и 25 м грибов на 1г грунта, общая биомасса составляет 0,3 мг/г, метаболически активными признаны около 30 % микроорганизмов [Синкин, 2012].

По данным Р.Э. Дашко и др. [2010], общая бактериальная биомасса моренных грунтов на территории г. Санкт-Петербург составляет 0,1-0,2 мг/г грунта. Изучая микрофлору грунтового массива, Р.Э. Дашко с соавторами указывают, что с глубиной увеличивается численность анаэробных форм бактерий. Так, в приповерхностных торфяных грунтах

отмечено $4,0 \times 10^6$ клеток аэробных и $3,4 \times 10^5$ клеток анаэробных форм в 1 г грунта; на глубине 10 м в суглинках эти показатели равны соответственно $2,5 \times 10^6$ и $1,5 \times 10^6$ кл/г грунта; а в супесях на глубине 20 м – $4,5 \times 10^4$ и 2×10^6 кл/г грунта. Общая численность бактерий различается в грунтах различного состава и составляет около $2-4 \times 10^6$ кл/г грунта, но зависимость ее от глубины залегания грунтов не прослеживается [Дашко, Карпова, 2013].

Активный микробный комплекс развит и в придонных осадках водохранилищ. По данным Р.Э. Дашко и Н.А. Перевощиковой [2013], в донных отложениях водохранилища и р. Волга у Чебоксарской ГЭС содержится до $3,8 \times 10^8$ кл/г грунта (в пересчете на колониеобразующие клетки), причем численность микроорганизмов постоянно меняется – за 1 год (2010-2011) биомасса микроорганизмов в нижнем бьефе водохранилища увеличилась, а в верхнем – уменьшилась [Дашко, Перевощикова, 2013].

По данным И.Н. Болотиной и Е.М. Сергеева [1987], численность микроорганизмов значительно снижается на первых 2-3 м разреза, ниже практически не отмечаются грибы и актиномицеты и существуют лишь некоторые виды бактерий. Общая численность микроорганизмов ниже этой глубины практически не меняется.

Помимо показателей численности микроорганизмов, определенных методами прямого подсчета с помощью микроскопии или в пересчете на колониеобразующие клетки, численность и активность микробного комплекса в грунтах возможно характеризовать по содержанию суммарного белка (СБ, метод Брэдфорда) [Bradford, 1976]. Метод основан на реакции красителя с белковыми и подобными соединениями с дальнейшим определением концентрации колориметрическим способом.

Исследования с применением методики Брэдфорда проводятся на кафедре инженерной геологии СПбГГУ с 1988 г. под руководством проф. Р.Э. Дашко. Накоплен большой опыт по оценке содержания СБ в различных природных обстановках и при антропогенном воздействии на грунты [Дашко, 2000]. Параметры содержания СБ в различных грунтах Санкт-Петербурга приведены в табл. 3. По мнению Р.Э. Дашко [2000], в анаэробных условиях накопление биомассы в грунтах происходит более активно, чем в микроаэрофильных.

Численность микроорганизмов резко уменьшается с глубиной в первых метрах разреза, а ниже остается примерно постоянной. Значения численности в практически любых дисперсных грунтах составляют порядка 10^6-10^8 кл/г. Отдельные колебания численности микробиоты зависят от особенностей состава грунтов и условий залегания грунтовых вод. В относительно глубоких слоях мицелиальные организмы встречаются редко, тогда как в приповерхностных горизонтах они доминируют.

Таблица 3. Содержание суммарного белка (СБ) в различных грунтах Санкт-Петербурга [выдержки из Дашко, 2000, с. 77]

Грунт	Содержание СБ, мкг/г
Ленточные глины	54-112
Озерно-ледниковые суглинки	38-62
Моренные суглинки	46-83
Межморенные суглинки	40-68
Межморенные пески	33-60
Коренные вендские глины	≤ 11

1.3. Влияние микроорганизмов на состав грунтов

В процессе жизнедеятельности микроорганизмы разлагают определенные вещества с целью получения необходимых элементов. Биомасса организмов формируется из органических веществ. Для построения биомассы необходима энергия, которую микробы получают за счет химических реакций (в том числе, окислительно-восстановительных). Таким образом, в ходе жизнедеятельности микробного комплекса часть изначально существующих в грунте химических соединений и элементов иммобилизуется в биомассе, часть разрушается и остается в поровом растворе. Кроме того, в системе появляются «новые» соединения – продукты метаболизма микроорганизмов. Все эти компоненты вступают во взаимодействие с компонентами грунта и формируют иной химико-минеральный состав.

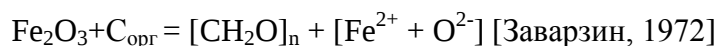
Механизмы воздействия микроорганизмов на химико-минеральный состав среды принято делить на прямые и косвенные. Прямое воздействие происходит непосредственно на клеточной стенке микроорганизмов. Выделяют воздействие с помощью микробных слизей и ферментативное разрушение [Глазовская, Добровольская, 1984].

Слизеобразование присуще многим микроорганизмам. С одной стороны, это защитный механизм от агрессивного воздействия окружающей среды, с другой – способ извлечения питательных элементов из минералов. Слизи представляют собой полисахариды с содержанием агрессивных органических кислот. Их фенольные и карбоксильные группы образуют с металлами и гуминовыми веществами грунта сложные комплексы, трудно поддающиеся разложению. Таким образом, нарушаются химические связи в минералах, элементы выпадают из решетки и переходят в окружающий раствор. Такое разрушение

минералов происходит только при непосредственном контакте биогенной слизи с твердыми частицами грунта [Глазовская, Добровольская, 1984].

В процессе жизнедеятельности микроорганизмы выделяют в окружающее пространство особые химические соединения – ферменты – агрессивные к некоторым элементам. Воздействие микробных ферментов на минералы, содержащие элементы с переменной валентностью (S, Fe, Mn), вызывает их окисление или восстановление, что может стать причиной разрушения [Глазовская, Добровольская, 1984].

Например, бактерии родов *Metallogenium*, *Hyphomicrobium* и др. вырабатывают сильнейшие хилатизаторы – ферменты под названием сидерофоры. Эти вещества представлены соединениями фенола или аминокислотами, агрессивными по отношению к железу и другим металлам в кристаллической решетке минералов. В присутствии органического вещества происходит его окисление за счет кислорода кристаллической решетки минерала, металл высшей валентности переходит в низшую, образуя растворимые соединения, выносимые в раствор. Например, гематит в ходе такого процесса преобразуется в монооксид железа и переходит в раствор:



Похожие процессы происходят с минералами, содержащими марганец, молибден, хром и другие. В микробиологии такой процесс бескислородного окисления органического вещества микроорганизмами назван термином «анаэробное дыхание» [Заварзин, 1972; Звягинцев и др., 2005; Нижарадзе и др., 1988].

Некоторые микроорганизмы живут за счет противоположного процесса – окисления переменновалентных металлов до высшей степени окисления. Так, бактерии рода *Thiobacillus* способны окислять сульфиды меди (ковеллит и халькопирит), разрушать кристаллические решетки этих минералов и переводить медь в качестве сульфатов в раствор.

Установлено, что ферменты обладают повышенной стойкостью и воздействуют на минеральные образования длительное время, даже после гибели микроорганизмов [Мессинёва, 1961].

Несмотря на то, что прямое воздействие микроорганизмов на минералы существенно, считается, что более интенсивно разрушение минералов происходит при косвенном воздействии микрофлоры. Косвенное воздействие – разрушение пород под влиянием соединений, продуцируемых почвенными микроорганизмами в процессе обмена веществ и представляющих собой сильные химические реагенты: 1) минеральные и органические кислоты; 2) биогенные щелочи; 3) хелатообразователи; 4) вещества, обладающие сильными редуцирующими свойствами [Глазовская, Добровольская, 1984].

Наиболее сильные изменения состава пород происходят под действием микроорганизмов кислото- и щелочеобразователей. Ряд бактерий (нитрифицирующих, тионовокислых) способен в процессе обмена продуцировать сильные минеральные кислоты, разрушающие минералы и переводящие в подвижное состояние питательные элементы. При изучении действия выделенных из почв бактерий и образуемых ими минеральных кислот на различные минералы было установлено, что за 30 дней в присутствии бактерий ортоклаз потерял 0,61-1,22 % исходного веса, тогда как в стерильной среде только 0,33-0,42 %. Более интенсивно растворяются карбонаты (кальцит, арагонит, доломит и др.). Бактерии *Thiobacillus thiooxidans* в процессе жизнедеятельности вырабатывают серную кислоту, интенсивно растворяющую алюмосиликаты [Глазовская, Добровольская, 1984].

Такое воздействие, по мнению многих ученых (Глазовская, Кузнецов, Заварзин и др.), является главным агентом процессов выветривания. Например, микробиологическое окисление рассеянных сульфидов железа в известняках в условиях дренированного рельефа и переменного-влажного климата может привести к образованию красноцветных глинистых продуктов выветривания известняков – terra rossa, широко распространенных в Средиземноморье и на Черноморском побережье Крыма и Кавказа [Глазовская, Добровольская, 1984].

В деструкции известковых пород особенно активны нитрификаторы, тогда как при разрушении кислых пород их роль или очень незначительна, или их вообще нет. Последнее объясняется быстрой нейтрализацией известняками кислот, образуемых бактериями, в результате создаются условия для поддержания pH на определенном уровне, необходимом для развития нитрифицирующих микроорганизмов. При этом в зависимости от окислительно-восстановительных условий среды денитрификация проводится различными агентами. Экспериментальные исследования показали, что в водонасыщенных грунтах в аэробных и слабо восстановительных условиях денитрификация происходит за счет микрогрибов, тогда как в сильно окислительных (аэробных) условиях – за счет бактерий. Наиболее распространены в грунтах бактерии р. *Pseudomonas* [Dong Cheol Seo et al., 2010].

В настоящее время в почвоведении считается, что выветривание связано скорее не с минеральными кислотами, а с действием на породы органического вещества микробиологического происхождения [Глазовская, Добровольская, 1984]. Большинство бактерий являются активными продуцентами органических кислот – щавелевой, янтарной, глюкоуроновой, винной и других. Присутствие в грунте таких соединений способствует мобилизации и выведению в раствор нерастворимых соединений кремния, магния, кальция, а также фосфатов, силикатов, сульфидов и сульфатов.

Роль бактерий-щелочеобразователей в деструкции минералов на настоящий момент изучена слабо. Такие микроорганизмы связаны в основном с геохимическим преобразованием соединений азота [Глазовская, Добровольская, 1984].

Помимо химического воздействия микроорганизмы могут одновременно выступать в качестве агентов механического выветривания. Мицелиальные формы, особенно грибы, развиваются в трещинах и порах и расширяют их [Mapelli et al., 2012].

В процессе жизнедеятельности микроорганизмы могут выделять вещества, которые сами по себе неагрессивны к минеральному компоненту грунта. Однако вступая в химическое взаимодействие с другими веществами среды, они могут влиять на ее состав. Например, выделяющийся в процессе дыхания микроорганизмов углекислый газ растворяется в поровом пространстве и переходит в угольную кислоту. Тем самым увеличивается рН среды и возможно разрушение некоторых минералов [Atekwana et al., 2006].

И.Н. Болотина отмечает, что при воздействии гетеротрофных микроорганизмов на алюмосиликаты в грунте в первую очередь выносятся изоморфно замещенные и обменные катионы [Теоретические основы..., 1985]. Таким образом, микробиологическое выветривание наравне с механическим или химическим происходит по ослабленным зонам минерала, по дефектам его решетки.

Глинистые минералы в различных условиях и под воздействием отдельных типов и штаммов микроорганизмов преобразуются по-разному. Каолинит многими исследователями признан наиболее устойчивым к микробиологическому воздействию. Например, каолиновая глина с примесью гетита (около 3,5 %) содержит в микробном комплексе железобактерии, при активизации которых в анаэробных условиях активно восстанавливается железо, переходя из нерастворимого соединения трехвалентной формы в растворимые двухвалентной. При этом кристаллическая структура каолинитов не изменяется. Авторы предлагают использовать это явление для очистки каолинита в промышленности [Lee et al., 2002].

Цианобактерии в процессе жизнедеятельности выделяют полисахариды, которые, вступая с силикатными минералами, могут их разрушать [Mapelli et al., 2012]. Тем не менее, каолинит оказался устойчивым к воздействию цианобактериального сообщества, более того, на кристаллитах появлялись рубашки из кальцитового цемента [Алексеева и др., 2009].

Более существенным изменениям подвержены минералы группы смектита. Так, широко распространенные в грунтовых микробных комплексах гетеротрофные бактерии *Shewanella putrefaciens* способны развиваться на нонтроните и монтмориллоните без дополнительных источников энергии и проявлять активную жизнедеятельность до 20 дней. Нонтронит при этом подвергается значительным химическим преобразованиям, связанным с

выносом ионов железа из дефектов октаэдрических слоев, а также кальция из межслоевого пространства. Это приводит к выносу ионов кремния и алюминия из кристаллической решетки (рис. 5). $\text{Fe}^{2+/3+}$, Ca^{2+} и в меньшей степени Si^{3+} являются биофильными элементами, необходимыми для жизнедеятельности организмов, и они иммобилизуются в клетках. Al^{3+} считается токсичным для бактерий, он не входит в клетку и остается на клеточной стенке [Perdrial et al., 2009].

Кальциевый бентонит в тех же условиях оказывается устойчивым – наблюдается незначительный вынос ионов Ca^{2+} из межслоевого пространства и Fe^{3+} из нонтронитовых пакетов (рис. 5), что не ведет к существенному изменению кристаллической структуры монтмориллонита [Perdrial et al., 2009].

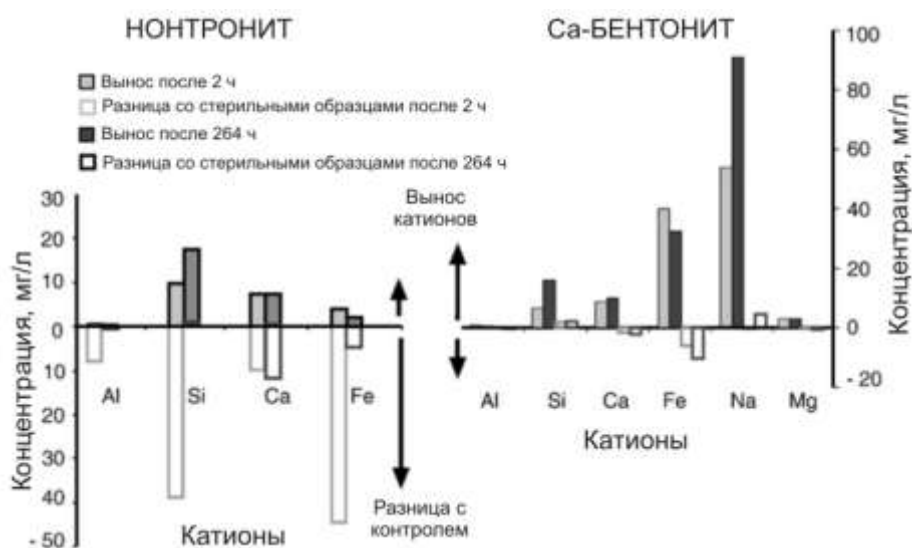


Рис. 5. Вынос элементов из смектитов при взаимодействии с *Shewanella putrefaciens* [Perdrial et al., 2009, с. 85, перевод Иванов П.В.]

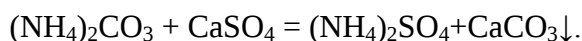
Явление активного выноса железа из минералов группы смектита описано для других культур и сообществ микроорганизмов [Gates et al., 1993; Kostka et al., 2009]. При этом существенно изменяются свойства смектитов, в частности, снижается их набухаемость, что может быть использовано в технической мелиорации грунтов.

Бентониты проявляют высокую устойчивость к воздействию цианобактериального сообщества, как и в случае с каолинитом, на частицах бентонита формируется кальцитовый цемент (см. рис. 9). Глины смектит-цеолитового состава подвергаются интенсивным преобразованиям – в межслоевом пространстве уже после 28 суток инкубации проявляются дефекты, которые авторы объясняют реакциями обмена ионов K^+ на Al^{3+} и другие элементы [Алексеева и др., 2009].

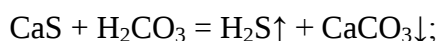
Наиболее подвержен микробиологическому разрушению иллит. После обработки цианобактериями отмечается увеличение числа набухающих пакетов и активный вынос ионов K^+ из межслоевого пространства и кристаллической решетки минерала [Алексеева и др., 2009].

При разрушении минералов и химических преобразований меняется состав порового раствора. Он может стать пересыщенным по отдельным элементам, которые начнут выпадать в осадок. К тому же, после выноса отдельных элементов неустойчивые минералы становятся устойчивыми к сформировавшимся условиям среды. Поэтому микробиологическая активность в грунтах почти всегда связана не только с разрушением минералов, но и с их новообразованием. Наиболее типичные новообразования в результате микробиологических процессов – кальцит, аморфные соединения кремния, оксиды и гидроксиды железа, пирит, сфалерит и др. [Atekwana et al., 2006].

Гнилостные бактерии, актиномицеты и плесневые грибы в условиях малой концентрации в воде CO_3 осаждают из растворов $CaCO_3$. Этот процесс особенно интенсивно происходит в теплых мелководных бассейнах. Другой путь образования карбонатов – окисление белков гнилостными бактериями [Глазовская, Добровольская, 1984]:



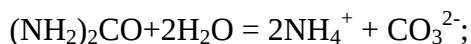
За счет сульфатредукции в присутствии органических веществ при восстановлении серы гипса с образованием CaS ; сульфид кальция вступает в реакцию с растворенной в воде углекислотой, образуется карбонат:



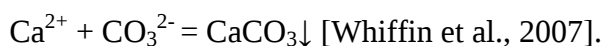
Причем при удалении сероводорода реакция идет в сторону накопления $CaCO_3$;

При выделении углекислоты в процессе дыхания и брожения и взаимодействия ее с сульфатами и хлоридами Ca и Mg , находящимися в растворе, может идти осаждение кальцита и доломита [Глазовская, Добровольская, 1984].

Образование кальцита возможно и при разложении некоторых органических веществ. Известно явление осаждения кальцита за счет уреазной активности – гидролиза мочевины под действием микробных ферментов с образованием CO_3^{2-} :



далее при наличии в растворе ионов Ca^{2+} происходит осаждение кальцита:



При взаимодействии вынесенных из кристаллической решетки алюминия с кремнием и другими элементами вокруг клеток накапливается аморфный кремнезем, а при пересыщении порового раствора по кремнию – аморфный кремний в виде глобул размером 20-60 нм. Этот процесс в опытах с *Shewanella sp.* происходит уже в течение первых 24 часов

взаимодействия бактерий с грунтом, а единственным источником кремния в системе является нонтронитовая глина [Furukawa, O'Reilly, 2007].

Экспериментальные исследования показывают, что под воздействием микробного сообщества торфяных почв из алюмосиликатных растворов возможно быстрое (2-3 дня эксперимента) выпадение каолинита. Крупные кристаллы каолинита формируются в две стадии: 1) выпадение кремнеалюмосиликатного геля, который содержит клетки бактерий, продукты их метаболизма и ионы железа, изначально присутствующие в клетках; 2) жизнедеятельность бактерий в этом геле изменяет условия среды, которые становятся благоприятными для кристаллизации этого геля в каолинитоподобные минералы [Fiore et al., 2011].

В результате окислительно-восстановительных процессов под влиянием жизнедеятельности железooksисляющих тиобацилл происходит трансформация пирита в минералы типа натроязита и других сульфатов железа. В анаэробных условиях при участии сульфатредуцирующих бактерий наблюдается обратный процесс – пиритизация ярозита, нитроярозита, алунита и др. В глинистых грунтах в восстановительных условиях наблюдается образование кальцита одновременно с выпадением гипса и формированием сульфидных минералов. [Теоретические основы..., 1985]. И.Н Болотина связывает также образование железо-марганцевых конкреций в почвах с биологическим осаждением веществ [Теоретические основы..., 1985].

При участии микроорганизмов происходит процесс оглеения грунтов. В анаэробных условиях присутствующие в грунте окисные соединения металлов (прежде всего, железа) в результате окислительно-восстановительных реакций переходят в закисные. Изменение pH и состава среды приводит к перекристаллизации алюмосиликатов, при этом изменяется и строение, и свойства грунтов [Зайдельман, 1998; Дашко и др., 2004].

Трехвалентное железо находится в грунтах в виде пленок, которые эффективно удерживают радионуклиды и ионы тяжелых металлов. Биологическое восстановление железа высвобождает эти элементы, и они могут мигрировать вместе с инфильтрационными водами и загрязнять более глубокие водоносные горизонты [Легин и др., 2007].

При изменении условий среды в неблагоприятную сторону, микроорганизмы отмирают, а иммобилизованные в клетках элементы высвобождаются в поровый раствор. За счет его пересыщения этими элементами может происходить быстрое осаждение соединений железа, калия, кальция и др. [Perdrial et al., 2009].

Микроорганизмы способны преобразовывать редкие и химически малоактивные минералы и соединения. Например, в результате анаэробного дыхания бактерий родов *Thiobacillus* и *Sulfolobus* молибденит MoS_2 переходит в повелит MoO_4 . Эти же

микроорганизмы участвуют в геохимическом цикле сурьмы, переводя антимонит Sb_2S_3 в валентинит Sb_2O_3 . Дальнейшее окисление сурьмы в высшую степень окисления +5 проводится узкоспециализированными бактериями *Stibiobacter senarmontii* с образованием минерала сенармонит Sb_2O_5 [Заварзин, 1972].

В процессе метаболизма микроорганизмы генерируют различные биогазы, в зависимости от условий среды и функциональной группы микроорганизмов это метан, углекислый газ, сероводород, водород и др. [Звягинцев и др., 2005]. Образование плохо растворимых в воде газов способствует переходу грунтов из 2-х фазного состояния в 3-х фазное [Дашко и др., 2004]. При наличии условий для биохимической генерации метана происходит накопление этого малорастворимого газа в грунтах, что приводит к их разуплотнению, а также предопределяет возможность для газодинамических явлений – выброса и возгорания метана [Дашко, 2003].

Путем различных механизмов микроорганизмы оказывают существенное влияние на состав и структуру минералов и химический состав порового раствора. Микробиологическая активность также влияет на подвижность элементов, в том числе, токсичных. Значительно преобразуется в результате жизнедеятельности микробиоты состав газового компонента грунтов.

Однако стоит отметить, что большинство представленных выводов сделано на модельных глинистых мономинеральных грунтах с использованием искусственно культивированных штаммов или функциональных групп организмов. Данные по взаимодействию природных микробных комплексов с природными полиминеральными грунтами очень ограничены.

1.4. Влияние микроорганизмов на строение грунтов

Вопросы влияния микроорганизмов на микроагрегатный состав хорошо изучены для верхних горизонтов грунтовых массивов (почв), где органическое вещество различных видов и происхождения (клетки организмов, продукты их метаболизма, растительные остатки и т.п.) считаются главным фактором агрегации [Tisdall, Oades, 1982; Tisdall, 1994; Elmholt et al., 2000; Nichols and Halvorson, 2013]. Разложение и изменение органических веществ может вести к диспергации грунтов. Тем не менее, некоторые позиции этой теории можно применить и к глубоким горизонтам грунтового массива, бедных органическими веществами, при активном развитии микробного комплекса.

Большинство современных зарубежных исследователей в вопросах строения почвенных агрегатов опираются на иерархическую классификацию J.M. Tisdall и J.M. Oades [1982], которая изначально была разработана для красно-бурых почв, но, по мнению авторов,

может применяться и для других почв при корректировке размеров агрегатов. Ее смысл сводится к тому, что в почвах имеется несколько стадий водостойких агрегатов, агрегаты следующей ступени состоят из более мелких частиц, и на каждой стадии доминируют те или иные агенты агрегации [Tisdall and Oades, 1982]. Dexter [1988] вывел более общий вид этой теории. Первичные частицы песчаного, пылеватого и глинистого размеров, а также тонкодисперсные частицы органического вещества формируют «флоккулы» (< 63 мкм), которые объединяются в «микроагрегаты» (63-250 мкм), которые, в свою очередь, формируют «макроагрегаты» (> 250 мкм) (рис. 6). На каждой следующей стадии содержится порядка 102-104 частиц предыдущей ступени [Dexter, 1988].

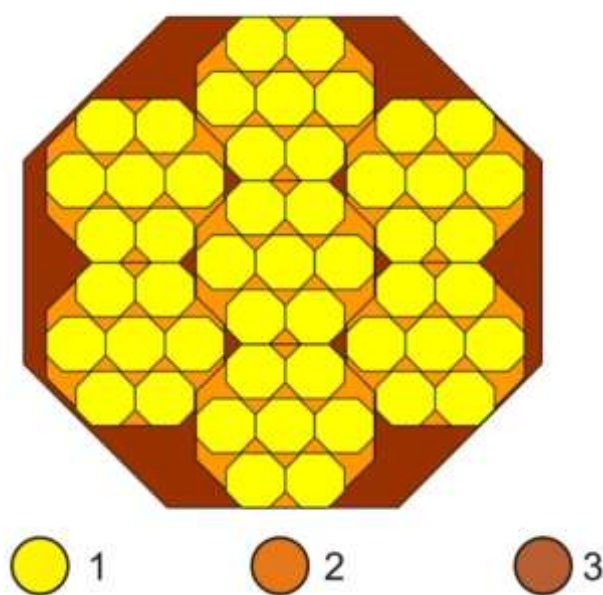


Рис. 6. Принципиальная схема строения макроагрегатов [по Dexter, 1988; представлена в Elmholt et al., 2000, с. 54]:

1 – флоккулы; 2 – микроагрегаты; 3 – макроагрегат

Факторы, влияющие на строение грунтов, можно разделить на **органические** и **неорганические**. J.M. Tisdall и J.M. Oades [1982] среди **органических агентов** выделяют: 1) «условно устойчивые» – это соединения гуминовых кислот с ионами металлов, через которые частицы соединяются вместе; 2) «переходные» – органические вещества, изначально присутствующие в почвах, а также продукты метаболизма микроорганизмов, прежде всего, внеклеточные полисахариды (ВПС). Эти соединения могут быстро разлагаться организмами; и 3) «временные» – это клетки бактерий, мицелий грибов, а также корни растений.

Клетки бактерий участвуют в основном в формировании небольших агрегатов (флоккул и микроагрегатов в классификации Dexter, 1988). Клетки обладают определенным положительным или отрицательным зарядом, поэтому образуют биоэлектростатические структурные связи. В этом случае они проявляются как силы притяжения между частицами, тем самым способствуя агрегации грунта [Грунтоведение, 2005].

Многие микроорганизмы способны адсорбироваться на поверхности твердых минеральных частиц. Д.Г. Звягинцев [1987] показал, что адгезия микроорганизмов зависит: 1) от свойств микроорганизмов; 2) от свойств и особенностей адсорбента; 3) от состава

среды, в которой она происходит; 4) от условий, определяющих возможность контакта клеток с поверхностью адсорбента. При этом микроорганизмы достаточно избирательны в адгезии. Сама возможность адгезии (адсорбции) клетки зависит от подвижности микроорганизмов, стадии развития культуры, среды ее выращивания и других аспектов. Для возможности адсорбции значительного количества микроорганизмов поверхность должна обладать высокой активностью и большой удельной поверхностью. Важным фактором является дисперсность грунта. Если размер частиц меньше размеров микроорганизмов, частицы могут адсорбироваться на поверхности клеток. Исследованиями Д.Г. Звягинцева [1987] показана возможность существования сложных агрегатов из живых клеток и микрочастиц с прочными связями. Отмечается, что наибольший адсорбционный эффект имеют системы с микрочастицами монтмориллонитовых глин.

Экспериментальные исследования показали, что в результате адсорбции микроорганизмов на глинистых минералах образуются агрегаты размером до 50-100 мкм и более. Размер агрегатов увеличивается пропорционально количеству микроорганизмов. Например, при концентрации микробных клеток в 1 млн/мл агрегаты монтмориллонитовой глины получались размером 10-20 мкм, а при концентрации 1000 млн/мл агрегаты достигали величины 100-200 мкм [<http://stylishtex.ru/archives/32>, 21.08.2014].

Наличие в поровом растворе значительной концентрации катионов подавляет адгезию. Причем присутствие ионов натрия препятствует адгезии меньше, чем такая же концентрация ионов аммония, далее в ряду стоят ионы калия, магния, кальция, а наиболее неблагоприятно для микробиологической адсорбции присутствие в растворе значительной концентрации ионов алюминия и железа [Звягинцев, 1987]. Таким образом, наличие в растворе катионов подавляет адсорбцию тем сильнее, чем выше валентность этих катионов.

Мицелий грибов считается главным агентом агрегации крупных агрегатов [Tisdall, 1994; Bearden and Petersen, 2000; Nichols and Halvorson, 2013]. Он может механически опутывать частицы, а плотное прикрепление мицелия к частицам для извлечения отдельных элементов обуславливает высокую прочность и водостойкость этих агрегатов [Tisdall, 1994; Bearden and Petersen, 2000].

Корни растений являются важным агентом связывания частиц в крупные агрегаты в почвах [Nichols and Halvorson, 2013], механически опутывая крупные частицы. Тем не менее, очевидно, что в глубоких горизонтах грунтового массива они не будут оказывать влияния на строение грунтов.

Корни растений, грибы и бактерии в процессе метаболизма выделяют большое количество *органических соединений*, которые обладают «склеивающими» свойствами. При этом считается, что полимерные органические соединения, выделяющиеся бактериями,

являются основным агентом формирования небольших агрегатов («флоккул» и «микроагрегатов» в классификации Dexter, 1988), тогда как продукты метаболизма грибов и корневые выделения наряду с механическим спутыванием частиц способствуют формированию крупных агрегатов [Nichols, Halvorson, 2013]. В результате этого механизма вокруг колоний или клеток микроорганизмов образуется своеобразный покров из глинистого материала, который защищает организмы, обеспечивая благоприятные условия жизнедеятельности [Bronick and Lal, 2005].

Среди *«первичных» органических веществ* выделяется рассеянное органическое вещество, вокруг которого могут образовываться макроагрегаты. Это вещество разлагается микроорганизмами, в процессе выделяются продукты метаболизма, что делает эти агрегаты более стойкими. По мере разложения первичного органического вещества микробная активность и выделение «склеивающих» веществ замедляется, макроагрегат теряет стабильность и распадается на более устойчивые микроагрегаты [Bronick and Lal, 2005].

Микроагрегаты (< 250 мкм) могут формироваться за счет *крупных органических молекул*, которые через поливалентные ионы соединяются с глинистыми частицами. Полученные агрегаты могут соединяться друг с другом и формировать крупные (> 250 мкм) частицы [Bronick and Lal, 2005]. Соединения гумусовых кислот с ионами металлов наиболее устойчивы к микробному разложению и достигают 52-98 % от всего органического вещества в почвах. Макроагрегаты, сформированные при их участии, наиболее устойчивы [Tisdall, Oades, 1982]. Экспериментальные исследования показали, что многолетнее (80-100 лет) внесение в почву удобрений (минеральных и органических) активизирует микробиологические процессы и ведет к агрегации почв на основе суглинков, а также к повышению прочности и устойчивости крупных агрегатов. Агрегация происходит за счет крупных органических молекул внесенного удобрения и при взаимодействии продуктов его разложения с компонентами почв [Munkholm et al., 2002].

Среди **неорганических агентов** агрегации и дезагрегации грунтов следует выделить минеральные и аморфные соединения, выпадающие в осадок под воздействием микроорганизмов, а также катионы, которые в результате тех или иных механизмов выносятся из кристаллической решетки или межслоевых пространств минералов, а также действующие электростатические физические силы.

Выпадающие в осадок соединения могут являться цементирующими агентами для частиц грунта. Кристаллические новообразования, прежде всего, кальцит и доломит, выпадая на контактах частиц, скрепляют их (рис. 7) [Shirakawa et al., 2011], при этом, очевидно, уменьшается пористость грунта. Вынесенные в результате микробиологических процессов в поровый раствор катионы могут входить в ДЭС глинистых частиц, в

зависимости от своей валентности приводя к диспергации или агрегации грунта [Грунтоведение, 2005].

Роль сил электростатической природы в изменении строения грунтов известна и непосредственно не зависит от микробиологических процессов. Тем не менее, адгезия клеток на поверхности частиц, изменение состава обменных катионов и их соединение с органическими и неорганическими веществами в системе существенно влияет на эти силы и, следовательно, их роль в формировании и распаде агрегатов

Экспериментально показана зависимость степени преобразования структуры грунта под воздействием микробиологических процессов от минерального состава грунтов. Четкая зависимость степени агрегированности почвы от биомассы микроорганизмов прослеживается в системах с преобладанием глинистых минералов со структурой 2:1 (сметит-иллитового состава) (рис. 8), тогда как в системах с преобладанием 1:1 минералов

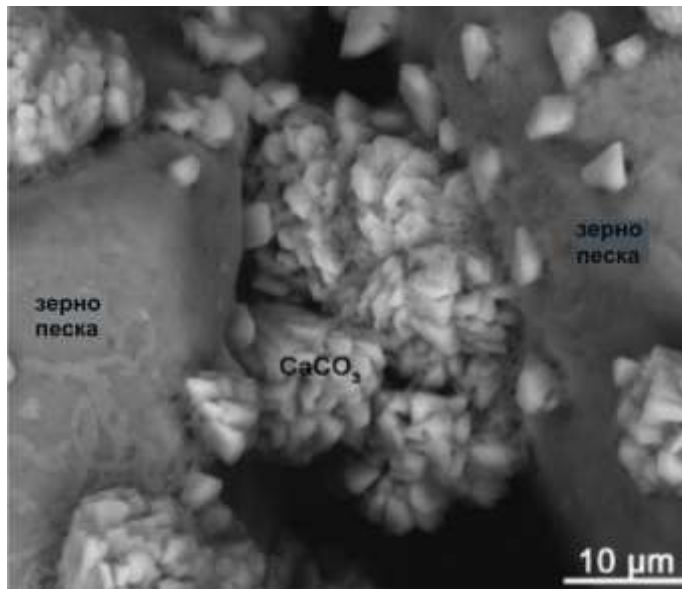


Рис. 7. Кристаллические новообразования кальцита на контактах песчаных зерен в результате микробиологических процессов [Shirakawa et al., 2011, с. 1733, перевод Иванова П.В.]

(каолинит, хлорит) этой корреляции не отмечается [Six et al., 2004]. Экспериментальные исследования по влиянию микроорганизмов на строение почв [K. Denef и J. Six, 2005] показали, что в системах с преобладанием каолинитов основными являются неорганические агенты; вероятно, это электростатические силы. При этом достаточно быстро (уже к 46 суткам) формируются макроагрегаты, в которых содержание органического вещества не больше, чем в контрольных образцах. В сметит-иллитовых почвах агрегация осуществляется за счет

непосредственно биологических факторов – образование макроагрегатов происходит медленнее, при этом в период с 46 по 76 сутки эксперимента их содержание становится больше, чем в каолинитовых системах, а в частицах накапливается органическое вещество. Макроагрегаты формируются за счет связывания агрегатов меньших размеров.

Выпадающие в осадок соединения формируют специфическую текстуру грунта. Т.В. Алексеева и др. [2009], изучая взаимодействие глинистых минералов с цианобактериями, отметили изменения строения бентонитовых и каолиновых глин (рис. 9). В первые 14 суток.

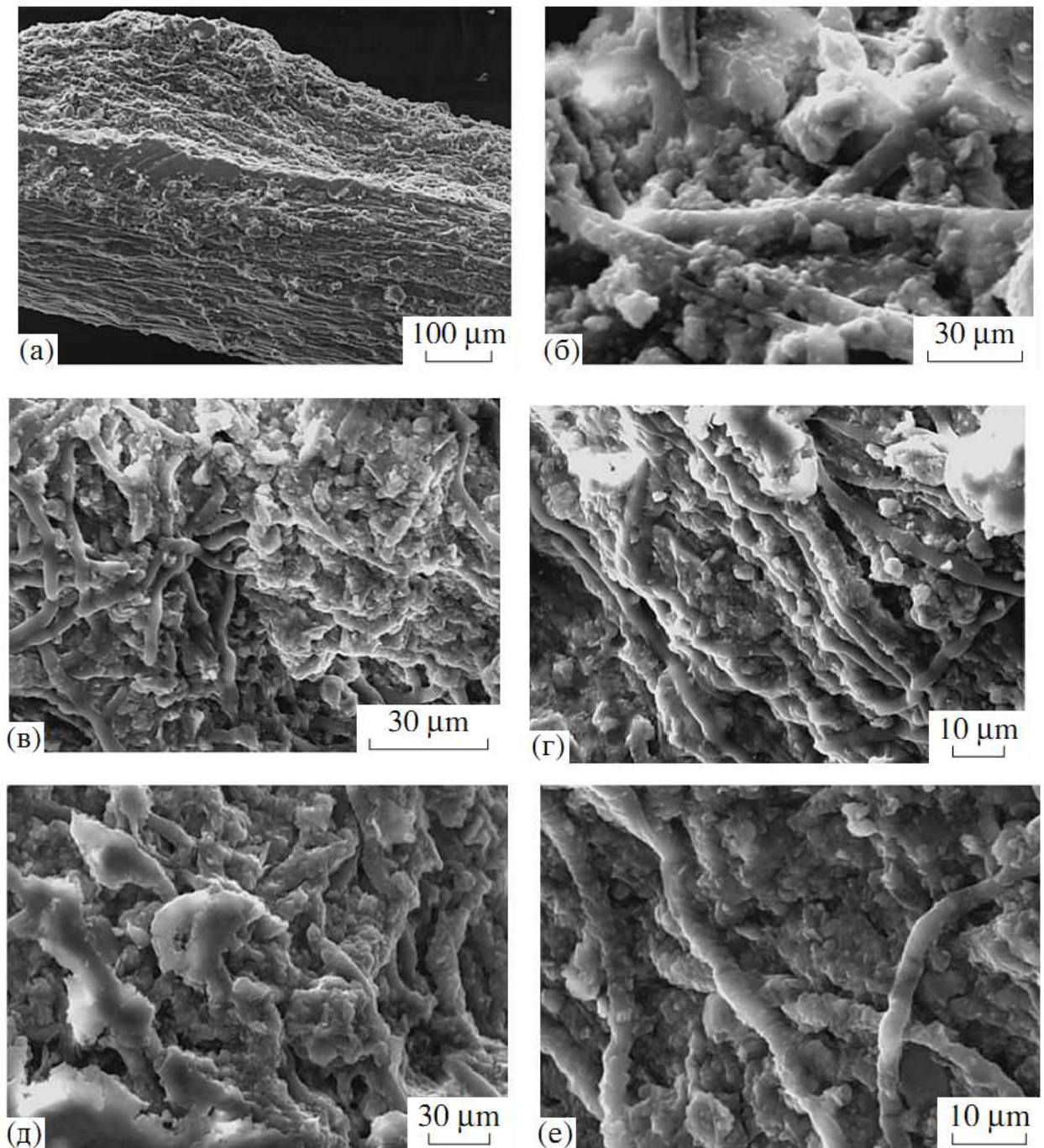


Рис. 9. Результаты воздействия цианобактерий на бентонитовую глину [Алексеева и др., 2009, с. 818]. а) – образование слоистого мата (28 сут); б) – структурирование глины, образование ясно выраженной слоистости, минерализованные и живые цианобактерии; в) – цианобактерии, оплетающие частички глины; г) – цианобактерии верхнего слоя мата с глинистыми минералами на поверхности; д) – минерализованный глинистыми минералами тяж цианобактерий; е) – фоссилизированные карбонатом кальция цианобактерии

нити бактерий активно развиваются на поверхности глин, сохраняя нормальную морфологию. Через две недели образуется плотный слоистый мат (рис. 9,а) из цианобактерий и слоев глинистых частиц с ферментированными бактериальными нитями (рис. 9,б). Взаимодействие бактерий с глинистыми минералами сопровождается обильным слизиобразованием. На 28 сутки на поверхности мата нити покрываются частичками глинистых минералов (рис. 9г). Затем происходит фоссилизация нитей карбонатом кальция (рис. 9е), формируется специфический биологический цемент [Алексеева и др., 2009В более глубоких горизонтах грунтовых массивов, соединения гуминовых кислот отсутствуют, органическое вещество, как правило, представлено в незначительных количествах, поэтому основными агентами агрегации/диспергации признаны химические и физико-химические факторы. Тем не менее, для грунтов, богатых органическим веществом и характеризующихся активным развитием микроорганизмов описанные выше теории применимы.

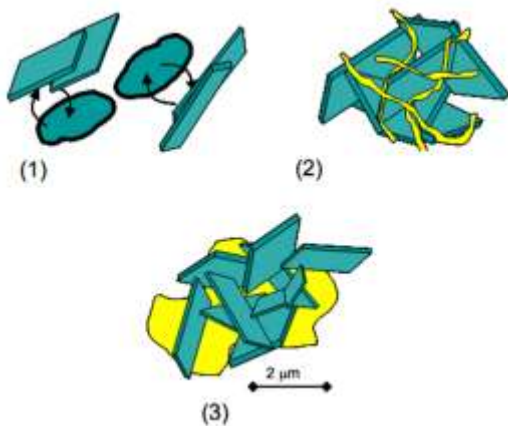


Рис. 10. Схемы связывания частиц грунта клетками и продуктами жизнедеятельности бактерий [Kuo et al, 2008, с. 76]:

1 – адгезия; 2 – «спутывание» частиц волокнами; 3 – склеивание слизью

М. Kuo et al. [2008], изучая богатые микроорганизмами морские илы, выделили следующие факторы структурообразования – связь частиц через адгезированные микробные клетки, «спутывание» частиц мицелиальными клетками, а также «склеивание» посредством продуктов метаболизма (рис. 10).

Незначительное присутствие в грунтах органического вещества, вероятно, не способствует формированию устойчивых крупных агрегатов, а процесс разложения органики микроорганизмами ведет к преобразованию структуры грунта.

Изучая влияние кислотности среды на модельных и природных грунтах, И.Н.

Болотина и Е.М. Сергеев [1987] пришли к выводу, что введение в систему микроорганизмов вместе с питательным веществом (глюкоза, целлюлоза, почвенно-растительная вытяжка) в восстановительных условиях ведет к диспергации грунта (табл. 4), тогда как в окислительных условиях микроагрегатный состав грунта практически не изменяется. Эта тенденция находит подтверждение в работах Т.Н. Нижарадзе и др. [1988], которые проводили исследования влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-механические свойства оглеенных пород. По их данным, интенсивная микробиологическая деятельность в анаэробных условиях ведет к разрушению микроагрегатов грунтов, т.е. их

диспергации. Об этом свидетельствует рост содержания фракции менее 0,002 мм с увеличением содержания в породах БМ (белковой массы), т.е. с повышением степени оглеенности (табл. 5).

Таблица 4. Изменения микроагрегатного состава грунтов при развитии микроорганизмов [Болотина, Сергеев, 1987, с. 12]

Условия Аэрации	Грунт	Наличие развития микробов	Органический источник питания	Содержание частиц фракций, %					
				$\wedge$ 0,25 мм	0,25-0,05 мм	0,05 - 0,01 мм	0,01 - 0,005 мм	0,005-0,001 мм	$\vee$ 0,001 мм
Восстано- витель- ные	модельный глинистый	+	глюкоза	8	56	19	3	12	2
		+	целлюлоза	8	60	17	7	5	3
		+	почвенно- растительная вытяжка	8	65	21	5	3	1
		контроль	-	8	65	18	4	4	1
	моренный суглинок		глюкоза	28	21	19	23	6	3
		контроль	-	27	27	29	10	5	3
Окисли- тельные	модельный глинистый	+	глюкоза	3	30	44	15	53	3
		+	целлюлоза	2	28	42	17	7	4
		+	почвенно- растительная вытяжка	2	31	45	16	4	2
		контроль	-	2	28	47	15	5	2
	лессовидный суглинок	+	глюкоза	0	7	83	4	2	5
		+	почвенно- растительная вытяжка	0	8	81	4	2	5
		контроль	-	0	7	83	4	2	5

В работах И.Н. Болотиной и К.С. Болатбековой [1985] был поставлен эксперимент по изучению процессов оглеения на элювиальных карбонатных грунтах пермского возраста, а также четвертичных аллювиальных, ленточных и лессовидных глинах. Исследования показали, что в восстановительных условиях развитие микроорганизмов приводит к

появлению в грунтах пятен глея, при этом распадаются агрегаты размером 0,25-0,05 м. В окислительных условиях, напротив, в изначально оглеенных грунтах наблюдалось агрегирование частиц размером 0,05-0,01 мм до 0,25-0,05 мм. При этом четвертичные аллювиальные и пермские карбонатные глины, имеющие перед опытом наибольший коэффициент агрегированности, претерпели существенные изменения микроагрегатного состава [Болотина, Болатбекова, 1985].

Таблица 5. Соотношение содержания фракции менее 0,002 мм оглеенных грунтов и содержания в них белковой массы (БМ) [по Нижарадзе и др., 1988]

Литологический тип отложений	Содержание в породе БМ, мкг/г	Вест, %	Содержание фракции < 0,002 мм, %
Глины	48	32	35
	112	46	41
	190	63	50
Суглинки	55	22	11
	83	40	15
	95	64	19
Супеси	5	20	4
	18	30	5
	28	35	6

В анаэробных условиях вследствие окислительно-восстановительных реакций разрушаются цементирующие вещества (нерастворимые соединения трехвалентного железа и других переменновалентных металлов), мицеллиальные организмы не развиты, а поровый раствор насыщается восстановленными ионами металлов с низкой валентностью, что, вероятно, и приводит к диспергации частиц.

Выше отмечалось, что внутри агрегатов существуют микрозоны с аэробными и анаэробными условиями, населенные соответствующими организмами [Звягинцев, 1987]. Агрегация и диспергация структурных элементов грунта приводит к перераспределению этих микрозон. Агрегация и потребление кислорода в аэробных зонах, вероятно, приводит к формированию крупных анаэробных зон, микробиологическая активность в которых способствует диспергации грунтов. Таким образом, можно предположить наличие в грунтах своеобразного баланса между процессами агрегации и дезагрегации структурных элементов.

Таким образом, в грунтах, подверженных влиянию микроорганизмов, существенно изменяется структура. Новообразование минеральных и аморфных фаз изменяет геометрию порового пространства и цементирует частицы. Посредством крупных органических молекул, продуктов метаболизма микроорганизмов, механического

спутывания мицелиальными клетками и адгезии клеток бактерий происходит агрегация грунтов. Разрушение и преобразование органических веществ может вести к распаду этих агрегатов, так же как и разложение цементирующих веществ. Тем не менее, не ясна направленность и интенсивность процессов структурообразования при активизации природного микробного комплекса различных дисперсных грунтов.

1.5. Влияние микроорганизмов на свойства грунтов

Если влияние микроорганизмов на минеральный состав грунтов и вопросы взаимодействия клеток бактерий с минеральными поверхностями изучены достаточно широко усилиями специалистов-почвоведов и микробиологов, то лишь несколько работ посвящено исследованию влияния жизнедеятельности микроорганизмов на свойства грунтов, в том числе, прочностные и деформационные.

Особое внимание некоторые исследователи уделяли влиянию процессов газообразования в грунтах. В.В. Радина [1973] в лабораторных экспериментах показала, что в закрытой системе генерация бактериями биогаза ведет к возрастанию порового давления. Тем самым, увеличивается пористость и уменьшается плотность грунта.

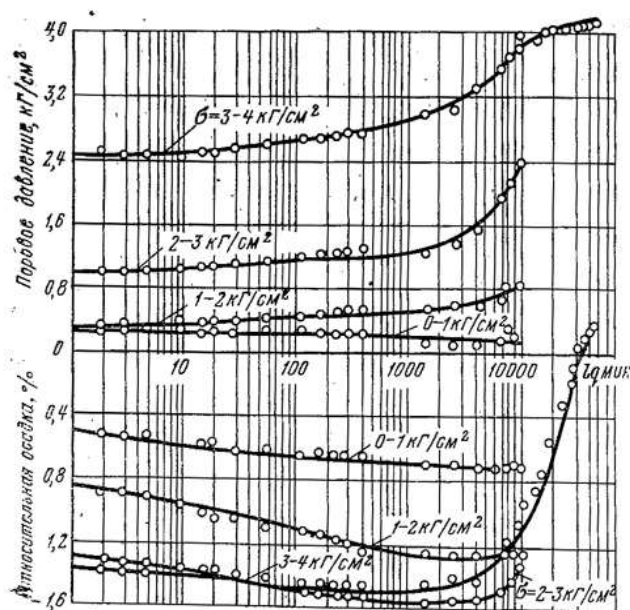


Рис. 11. Кривые порового давления и относительной осадки во времени по результатам консолидационных испытаний образцов бакинских глин [Радина, 1973, с. 23]

Явление образования избыточного давления в поровой воде грунта было обнаружено В.В. Радиной с помощью консолидационных испытаний глинистых грунтов. Было установлено, что при значительных нагрузках (3-4 кг/см²) образцы глин не сжимаются, а «набухают» (рис. 11). Процесс увеличения объема образца грунта под нагрузкой шел более месяца. Это явление объясняется выделением в поровое пространство грунта биогазов, образовавшихся в результате жизнедеятельности микроорганизмов.

Поскольку избыточное поровое давление снижает эффективное давление, то, следовательно, снижается и сопротивление сдвигу грунта. Понижение прочности грунта происходит, согласно выводам В.В. Радиной [1973], также за счет снижения внутреннего трения вследствие смазки частиц грунта биопленками.

Некоторые продукты жизнедеятельности микроорганизмов (полисахариды) могут заполнять поровое пространство грунта, тем самым уменьшая его пористость и увеличивая плотность [Грунтоведение, 2005]. К такому эффекту может приводить накопление в поровом пространстве биомассы микроорганизмов [Shaw et al., 1985; Cunningham et al., 1991], а также выпадение в осадок нерастворимых минеральных соединений [Atekwana et al., 2006].

«Биоцементация» частиц грунта, описанная выше [Алексеева и др., 2009; Atekwana et al., 2006; Whiffin et al., 2007 и др.], также влияет на пористость, плотность, фильтрационные, прочностные и деформационные свойства грунтов. Возможно предположить, что при изменении условий среды обратные процессы (отмирание и разложение биомассы, растворение цементов и т.п.) приведут к уменьшению плотности и пористости, увеличению фильтрационной способности грунтов, снижению показателей прочностных и деформационных свойств. Тем не менее, в литературе подобные эксперименты практически не описаны.

Накопление микробиоты и продуктов ее метаболизма наиболее активно сказывается на показателях физико-механических свойств песчаных отложений. В зонах интенсивного и длительного загрязнения канализационными стоками в анаэробных условиях за счет коагуляции порового пространства бактериальной массой формируется низкая проницаемость песков. Постепенное повышение содержания СБ способствует значительному снижению коэффициента фильтрации (табл. 6). В то же время, удаление биомассы при низкотемпературном прокаливании приводит к увеличению коэффициента фильтрации до 25 м/сут, что полностью соответствует их гранулометрическому составу [Дашко, 2003; Дашко и др., 2014].

Таблица 6. Зависимость коэффициента фильтрации песков от содержания в них суммарного белка (СБ) [Дашко и др., 2014, с. 124]

СБ, мкг/г	6	28	62	105	130	140
К _ф , м/сут	4	10 ⁻¹	2×10 ⁻²	8×10 ⁻³	10 ⁻³	5×10 ⁻⁴

Накопление на поверхности частиц биопленок, очевидно, оказывает влияние не только на проницаемость, но и на показатели прочностных и деформационных свойств грунтов. Эти показатели для самих биопленок практически не изучены. Тем не менее, существуют предположения, что они по свойствам отвечают гидрогелям, имеют модуль сдвига в диапазоне 10⁻¹ – 10⁵ Па [Atekwana et al., 2006]. Для сравнения, модуль сдвига кварца составляет около 200 ГПа [Грунтоведение, 2005].

С.Е.Гориным и П.Э.Роотом [1978] была проведена работа по изучению возможности понижения прочностных свойств песчаных грунтов при обильном развитии в них микроорганизмов. В работе использовались различные чистые культуры дрожжей (9 штаммов) и бактериальные культуры (32 штамма), выделенные из нескольких горизонтов почв. Модельный песок (кварцевый, фракция 0,1-0,25 мм) вносился в колбы с выросшими культурами в количестве 300 г на 100 мл культурной суспензии. Прочностные свойства образцов изучались на приборе одноплоскостного среза. В качестве контроля использовался песок, насыщенный дистиллированной водой, и песок, насыщенный раствором ПАВ – додецилсульфата натрия (SDS). Во втором случае получали образец с заведомо заниженными свойствами.

По результатам исследований в описанных условиях опыта большинство культур практически не повлияло на сопротивление песка сдвигу. Понижение прочностных свойств песка отмечено в случае восьми культур бактерий. При этом наиболее активные культуры по эффекту приближались к раствору SDS. Так, введение в грунт 1 % раствора полисахаридов биотического происхождения вызвало снижение сопротивления песка сдвигу на 10-30 %. При добавлении в грунт культур дрожжей в концентрации 1,5-2,0 г/100 мл прочность песков снизилась на 65 % (рис. 12) [Горин, Роот, 1978].

Все культуры, давшие эффект, образовывали внеклеточные полисахариды. Авторы эксперимента считают, что, вероятно, понижение прочностных свойств песка в опытах можно объяснить воздействием микробных полисахаридов в качестве ПАВ. А наличие ПАВ типа высокомолекулярных жирных кислот в песках способствует образованию псевдунов [Горин, Роот, 1978].

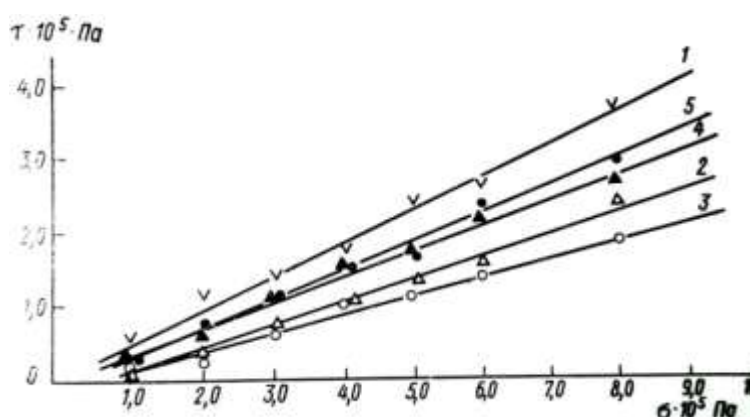


Рис. 12. Влияние продуктов жизнедеятельности микроорганизмов на сопротивление сдвигу песчаных грунтов: 1 – пески, насыщенные дистиллированной водой; 2 – пески с раствором SDS; 3 – пески с раствором культуры *Artrobactersporus*; 4 – пески с раствором культуры *Lipomycestetrasporus*; 5 – пески с раствором культуры *Nocardiasporus*

[Горин, Роот, 1978, с. 61]

В микробиологически пораженных песках различного гранулометрического состава наблюдается снижение угла внутреннего трения до 12° и менее. Помимо образования биопленок исследователи связывают это явление с активным газообразованием и повышением порового давления [Дашко и др., 2014].

Существуют эксперименты, показывающие иное влияние объемных биопленок на прочностные свойства песчаных грунтов. Так, было изучено влияние биопленок аквабактерий (*Aquabacterium*) на фильтрационные, прочностные и деформационные свойства мелкозернистых песков г. Оттава, Канада [Perkins et al. 2000]. Пески заселялись деактивированными ультрамикробактериями (УМБ), которые в дальнейшем возвращались в состояние активного метаболизма с помощью пропитки песков органическим питательным веществом – цитратом натрия. Этот процесс проходил в течение двух недель, затем образцы испытывались на компрессионное и трехосное сжатие. Исследования показали, что за две недели в результате жизнедеятельности микроорганизмов поровое пространство колюматруется биопленками, что ведет к снижению коэффициента фильтрации грунтов на порядок. При этом показатели сопротивляемости сдвигу и модуль общей деформации обработанных бактериями песков практически не отличаются от соответствующих параметров неизмененного грунта. Однако в грунте развиваются дополнительные деформации ползучести, которые также не значительны, но их стоит учитывать при решении конкретных инженерно-геологических задач [Perkins et al. 2000].

Прочность по результатам зондирования, кПа

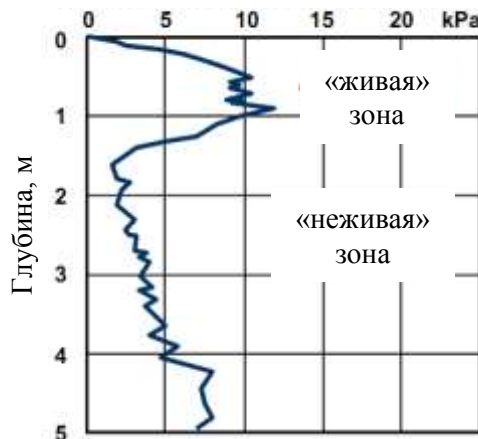


Рис. 13. Изменение прочности на сдвиг донных отложений африканского шельфа с глубиной отбора образцов [Kuo et al, 2008, с. 77, перевод Иванова П.В.]

Некоторые исследователи связывают повышенную прочность грунтов с микробиологической активностью. Например, верхние десятки сантиметров глубоководных осадков нефтегазовых провинций африканского шельфа имеют повышенные показатели прочности на сдвиг в недренированных условиях (рис. 13). Авторы связывают эти аномалии с жизнедеятельностью галофильных морских бактерий, в частности, рода *Marinobacter*. Тонкодисперсные частицы илов «спутываются» и «склеиваются» клетками микроорганизмов, а также продуктами их метаболизма [Kuo et al., 2008].

И.Н. Болотиной и С.К. Николаевой [опубликовано Болотина, Сергеев, 1987] были проведены исследования влияния микроорганизмов на реологические свойства глинистых

грунтов. С помощью методов поворотной крыльчатки и ротационной вискозиметрии изучались реологические свойства грунтов различного генезиса, возраста и состава – моренного суглинка, карбоновой и кембрийской глин, а также были проведены испытания на модельных глинистых образцах. Для активизации микробиологических процессов использовался раствор глюкозы. Опыты показали, что в восстановительных условиях уже после 4 месяцев обработки питательным раствором остаточная прочность грунтов на срез уменьшилась в 2 раза практически для всех грунтов. Причем полученные прочностные показатели за последующие 11 месяцев не изменяются. В окислительных условиях модельные глинистые образцы, подвергшиеся такой же обработке, напротив, приобрели несколько повышенную прочность (табл. 7).

Таблица 7. Изменения реологических свойств грунтов при развитии микроорганизмов
[Болотина, Сергеев, 1987, с. 13]

Условия аэрации	Грунт	Наличие развития микробов	Органический источник питания	Продолжительность опыта, мес	Влажность, %	τ , МПа	Метод определения
Восстановительные	Моренный суглинок	-	-	15	16	0,34	поворотной крыльчаткой
		+	Глюкоза	15	16	0,17	
		+	Глюкоза	4	16	0,17	
		-	-	4	18	0,20	
		-	Глюкоза	4	18	0,19	
		+	Глюкоза	4	18	0,14	
		+	Растит. отвар	4	18	0,16	
	Карбоновая глина	-	-	8	76	$1,9 \times 10^{-4}$	ротационной вискозиметрии
		+	Глюкоза	8	76	$0,8 \times 10^{-4}$	
	Кембрийская глина	-	-	8	49	$4,0 \times 10^{-4}$	
		+	Глюкоза	8	49	$2,4 \times 10^{-4}$	
Окислительные	Модельный глинистый	-	-	4	7	0,08	то же
		+	Глюкоза	4	7	0,12	

1.6. Активизация микробиологических процессов при антропогенном воздействии на грунты

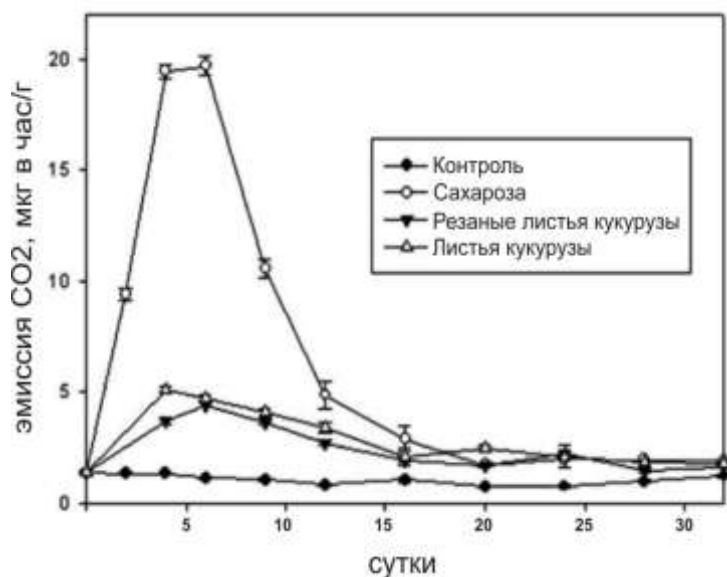


Рис. 14. Динамика эмиссии углекислого газа при внесении в бурые лесные почвы сахарозы и растительных остатков [Nottingham et al., 2009, с. 186, перевод Иванова П.В.]

Поскольку в большинстве грунтов органическое вещество представлено в небольшом количестве (доли процентов и первые проценты), микроорганизмы в них, как правило, находятся в неактивном состоянии. Искусственное внесение в системы питательных веществ приводит к активизации микробного комплекса и интенсификации микробиологических процессов, в результате которых изменяются состав, строение и свойства грунтов.

Поступающие в грунты вещества можно условно разделить на активизирующие природный микробный комплекс (или отдельные функциональные группы) грунта и содержащие микроорганизмы сами по себе.

Среди активизирующих веществ наибольший эффект оказывают органические низкомолекулярные сахараиды – глюкоза, сахароза, мальтоза и др. Они легко окисляются и гидролизуются до спиртов, органических кислот и других соединений с выделением энергии [Глинка, 2011].

Привнесение в грунт сахаров ведет к быстрой и резкой активизации микробного комплекса. Это явление иллюстрируется ростом активности дыхания микроорганизмов, определенных по эмиссии углекислого газа (рис. 14) [Nottingham et al., 2009].

Увеличивает активность микробного комплекса и внесение более сложных сахаров, например, хитина и целлюлозы. Комплексное строение и необходимость предварительного разложения этих веществ до моносахаридов обуславливает меньшую максимальную активность микробов и ее более медленный рост. Чем сложнее строение молекулы органического вещества, тем меньший эффект оно оказывает на микробный комплекс (рис. 15) [Yaroslavtsev et al., 2009; Манучарова и др., 2007].

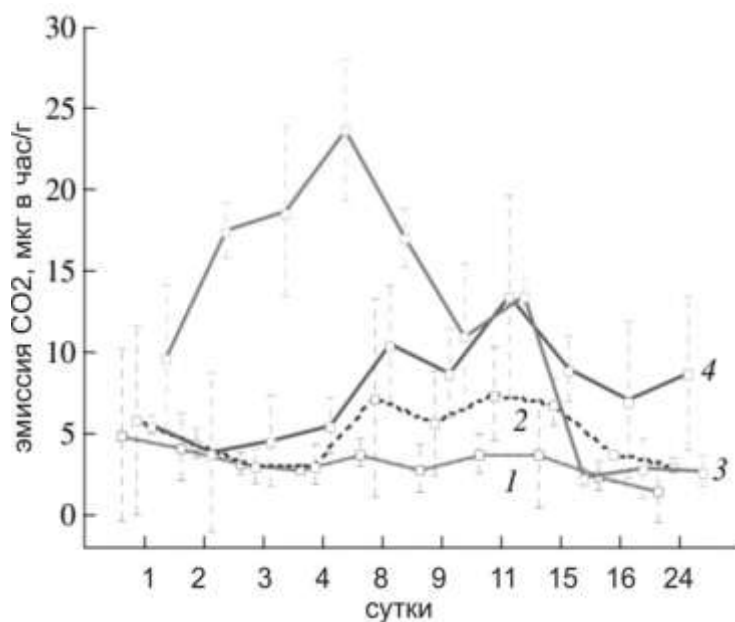


Рис. 15. Динамика эмиссии углекислого газа из серой лесной почвы при внесении целлюлозы (2), хитина (3) и глюкозы (4); (1) – контроль (образцы с водой) [Yaroslavtsev et al., 2009, с. 800, перевод Иванова П.В.]

2009].

Нефтепродукты следует отнести к категории загрязнителей, активизирующих отдельные функциональные группы микроорганизмов. При загрязнении грунтов нефтепродуктами микроорганизмы, с одной стороны, способствуют очистке геологической среды от загрязнителей, а с другой – негативно влияют на свойства этих грунтов. Так, по данным Р.Э. Дашко, специфическими микроорганизмами производится окисление нефтепродуктов, происходит разрыв связей в бензольных кольцах ароматических углеводородов. В условиях нормальных температур и давлений микроорганизмы – единственный агент очищения грунтов от углеводородного загрязнения. В зависимости от условий (содержания в загрязненных грунтах соединений азота и фосфора и других биофильных соединений) полная деградация углеводородов может наблюдаться уже на расстоянии 30-60 м от источника загрязнения. При этом в грунте выделяется углекислый газ, накапливается большое количество биомассы. К тому же, потребление углеводородоокисляющими микроорганизмами кислорода ведет к активизации анаэробных бактерий, которые могут восстанавливать трехвалентное железо, являющееся главным элементом цемента грунтов, до подвижной двухвалентной формы. Эти факторы приводят к снижению прочности грунтов на 50-70 % [Дашко, 2003,б; Дашко и др., 2014].

Значительное влияние на активизацию микробиологических процессов оказывает привнос в грунты канализационных стоков (КС). Эти растворы, с одной стороны, содержат

Несколько увеличивает активность микробного комплекса и внесение растительных остатков [Nottingham et al., 2009]. Существенное влияние на микробиологические процессы оказывают минеральные и органические удобрения [Mukholm et al., 2002].

Попадание в грунты токсичных органических соединений (пестицидов), с одной стороны, оказывает ингибирующее влияние на микробный комплекс, а с другой – активизирует отдельные функциональные группы, способные разлагать эти вещества [Cernohlavkova,

большое количество живых клеток бактерий, а с другой – значительные концентрации легкодоступных для микроорганизмов органических питательных веществ. Исследования, проведенные в СПбГГУ, показали, что насыщение глинистых грунтов канализационными стоками ведет к значительному ухудшению их свойств. Например, моренные суглинки, насыщенные КС, набухают в значительной степени сильнее, чем при насыщении водой. В воде грунты характеризуются как ненабухающие, тогда как при насыщении стоками относительная деформация набухания составляет около 14 % и грунты характеризуются как средненабухаемые. Слабонабухающие в воде среднекембрийские глины при насыщении стоками имеют деформацию набухания до 35 % и оказываются сильнонабухающими (табл. 8). При этом резко снижаются их прочностные и деформационные свойства [Дашко, 2000].

Таблица 8. Параметры набухания грунтов в воде и в канализационных стоках (КС) [Дашко, 2000, с. 76]

Тип пород	Среда взаимодействия	Величина свободного набухания, %	Давление набухания, МПа	Время набухания, сутки
Моренный суглинок	КС	14	0,15	42
	вода	<1	0	0,01
Нижнекембрийская глина	КС	35	0,47	66
	вода	8	0,18	0,04

Численность микроорганизмов в грунтах, а значит, и интенсивность влияния процессов их метаболизма, возрастает в несколько раз на участках активной эксгаляции радона. Такой же эффект проявляется и при повышении температуры грунтов [Дашко, 2000].

Процесс оглеения грунтов, негативные последствия которого неоднократно обсуждались выше, может обуславливаться и техногенными факторами. Исследователи из СПбГГУ оценили роль техногенного оглеения в трансформации песчано-глинистых грунтов основания хвостохранилищ фосфоритового месторождения Ленинградской области. В уникальных условиях загрязненности грунтов дизельным топливом, а также соединениями азота и фосфора, в них развивается большое количество железовосстанавливающих организмов, что ведет к интенсивному оглеиванию грунтов. При этом изменяются микроагрегатный состав грунтов, увеличивается их влажность, резко сокращаются водоотдача и фильтрационная способность. За 20 лет эксплуатации хвостохранилищ одного

из месторождений Ленинградской области зафиксировано падение прочности грунтов до 50 % [Дашко, 2004].

На многих гидроэлектростанциях на 2-3-й год после наполнения водохранилища были обнаружены выделения биогенных газов (метана, азота, водорода и сероводорода) в основании бетонных плотин. Подобные наблюдения были проведены и на Камской ГЭС. После обобщения материалов изучения выделения газов в основании различных плотин А.М. Кузнецов [1965] пришел к выводу, что состав газа, его концентрация и интенсивность выделения не зависят от литологии и возраста пород основания. Сам процесс был объяснен протеканием в основании сооружений и на контакте с бетоном плотины микробиологических процессов. Причину этих процессов автор видит в привнесении в грунты основания органических веществ различными путями. Часть из них поступает в основание из водохранилища, часть была привнесена при строительстве (органические гидроизоляционные покрытия, клетчатка древесных фильтров, пьезометров и т.п.). При этом автор подчеркивает, что в илах водохранилища обнаружено большое количество микроорганизмов, которые могли быть занесены в трещины мергелей основания плотины Камской ГЭС [Кузнецов, 1965].

Проведенное в 1974 году доуплотнение цементационной завесы Камской ГЭС щавелевоалюмосиликатным гелем, имеющим в своем составе производные органической кислоты, создало дополнительный источник питания для микроорганизмов. Развитие промышленных предприятий по берегам водохранилищ, в том числе, целлюлозно-бумажного комбината в 7 км от Камской ГЭС, также способствует увеличению содержания органических веществ в воде водохранилища, которая при фильтрации через тело земляных плотин и под бетонной плотиной создает благоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов. Проведенные исследования показали, что в водах, фильтрующихся через плотины Камской ГЭС, содержится значительное количество (10^3 клеток/мл) сульфатредукторов, бактерий, окисляющих железо и марганец и многих других видов [Болотина и др., 1986].

Исследования, проведенные в 2011-2013 г. сотрудниками Естественного научного института ПГНИУ под руководством профессора Н.Г. Максимовича при непосредственном участии автора, выявили признаки активизации микробиологических процессов на грунтовых плотинах Камской ГЭС:

- образование в подпочвенном воздухе очагов с повышенным содержанием метана и летучих органических соединений (продуктов бактериального разложения органического вещества), и углекислого газа (продукта бактериального окисления метана и летучих органических соединений);

- двух-шестикратное увеличение выноса взвеси с большим количеством гидроксидов железа из дренажной системы в летний период года по сравнению с зимним периодом;
- повышенное ($108-122 \text{ мг/дм}^3$) по сравнению с характерным для Пермского края ($30-40 \text{ мг/дм}^3$) содержание в дренируемых водах органического вещества, по всей вероятности, техногенного происхождения;
- запах сероводорода в дренажных колодцах и появление в их осадках новообразованных сингенетичных минералов кальцита и пирита;
- рост содержания гидрокарбонат-ионов в водах, фильтрующихся через тело плотины, как результат бактериального разложения водорастворимого органического вещества, очаговость распределения в теле плотины основных ионов бактериального цикла азота, появление в аллювиальном водоносном горизонте очага с повышенным содержанием ионов железа (II) [Максимович, Хмурчик, 2013; Максимович и др., 2012, а; Максимович и др., 2012,б].

В ходе работ на Камской ГЭС были отобраны монолиты аллювиальных грунтов основания плотин, которые были исследованы автором в рамках настоящей диссертации.

На Чебоксарской ГЭС в результате микробиологических процессов происходит активное разрушение бетонных конструкций. На активизацию микробного комплекса оказывает существенное влияние поступление в придонные горизонты высокоминерализованных подземных вод, а также использование в качестве строительных материалов при реконструкции сооружений ГЭС органических соединений на основе нефтепродуктов [Дашко, Перевощикова, 2013].

Микробиологические процессы распространены в природе, при этом искусственная активизация процессов при попадании в грунт питательных соединений (в основном, органических веществ) в условиях техногенной нагрузки происходит на различных объектах инженерно-хозяйственной деятельности – сельских угодиях, промышленных площадках, гидротехнических сооружениях и т.п. Активизация микробиологических процессов может привести к преобразованию состава, строения и свойств грунтов, что может негативно сказаться на безопасности эксплуатации инженерных сооружений и других объектов.

1.7. Перспективы использования микробиологических процессов в инженерно-хозяйственной деятельности

Значение микроорганизмов в сельском хозяйстве давно известно и активно используется. Микробиологическое выветривание является важным агентом образования почвы и ее плодородия [Mapelli et al., 2012]. Высокая агрегированность почвы способствует

лучшему проникновению кислорода к корневым системам растений. Отмеченная выше зависимость среднего размера почвенных структурных элементов от биомассы в некоторых типах почв определяет одно из направлений увеличения плодородия почв – путем активизации микробиологических процессов [Mukholm et al., 2002; Mapelli et al., 2012]. Способность микроорганизмов разлагать сложные органические вещества на более простые и доступные для растений обуславливает необходимость поддержания высокой численности и активности отдельных функциональных групп микроорганизмов с целью увеличения урожайности [Mapelli et al., 2012].

Характеристики состава микробного комплекса, метаболической и ферментативной активности микроорганизмов могут служить индикаторами состояния грунтов по ряду загрязнителей (парафины, пестициды и др.) [Cernohlavkova, 2009].

В настоящий момент разрабатывается идея применения микроорганизмов для очистки каменных и металлических памятников от налета оксидных пленок за счет способности микроорганизмов восстанавливать переменновалентные элементы [Mapelli et al., 2012]. На этом же явлении основан метод детоксикации ионов хрома в промышленности (в частности, в автомобилестроении). Известно, что ионы Cr^{6+} крайне токсичны, тогда как трехвалентный хром не представляет угрозы. Доказана возможность восстановления хрома под воздействием распространенных в почве бактерий *Enterobacter nimipressuralis* [Чайковская и др., 2006].

В качестве альтернативного источника энергии перспективно использование биотоплива – газообразных продуктов метаболизма микроорганизмов. Разложение органического вещества проводится микробным комплексом, состоящим из трех физиологических групп – гидролитиков, кислотообразующих и метанообразующих бактерий. Каждая группа питается продуктами метаболизма предыдущей. В результате выделяется горючий газ – метан [http://эковатт.рф/biogas_fuel/, 02.09.2014]. Генетическая модификация организмов, выведение более эффективных штаммов – современная задача микробиологов. Успехи в этой области уже есть – выведены бактерии, вырабатывающие биотопливо, по своим характеристикам не уступающее бензину [<http://www.newscientist.com/article/dn23431-bacteria-churn-out-first-ever-petrollike-biofuel.html>, 02.09.2014].

На способности микроорганизмов окислять ионы переменновалентных металлов основана дешевая и эффективная технология добычи меди – кучное выщелачивание. Медную руду складировать в виде отвала и в присутствии кислорода поливают водопроводной водой. Ковеллит постепенно разрушается микроорганизмами, медь в виде купороса переходит в раствор, который собирается в специальные бассейны. Дальнейший

электролиз позволяет получить достаточно чистую медь, без примесей мышьяка и других металлов. Существуют технологии бактериального выщелачивания других металлов, в том числе, химически инертных, например, золота [Каравайко и др., 1972].

Известны микробиологические методы увеличения нефтеотдачи. В нефти содержится значительное количество микроорганизмов, но большинство находится в неактивном состоянии. Закачка в нефтеносные пласты питательных веществ (полисахаридов, биоПАВ и т.п.) способствует активизации этих организмов, при этом увеличивается пористость вмещаемых пород за счет растворения отдельных соединений и минералов; накопление в нефти биогазов, растворителей и поверхностно активных веществ делает ее более подвижной и облегчает добычу [Шарауова и др., 2014]. Возможна закачка раствора, состоящего из питательных веществ и взвеси определенных штаммов бактерий. Применение этой технологии на месторождениях в Татарстане, Башкортостане и других регионов позволило дополнительно извлечь до 30 % нефти. Технологии совершенствуются и активно применяются на многих месторождениях в России и за рубежом [Гусева и др., 2012].

Достаточно широко применяются технологии очистки грунтов от нефтезагрязнений. Несмотря на то что некоторые компоненты нефти крайне токсичны для большинства микроорганизмов, существуют отдельные группы, способные разлагать их. Поэтому при попадании нефтепродуктов в грунты комплекс микроорганизмов сначала ингибируется, а затем активизируется, увеличивая численность. Многие микроорганизмы способны усваивать углеводороды нефти. Это различные виды микромицетов, дрожжей и бактерий. Большинство деструкторов нефти отмечены среди бактерий. Выделяется функциональная группа углеводородокисляющих бактерий [Беляев и др., 1994].

Углеводородокисляющие микроорганизмы выделяются в некоторых количествах и в микробных комплексах незагрязненных почв. Их численность даже в незагрязненных почвах может достигать 10 млн.кл/г и более [Микроорганизмы и охрана почв, 1989].

При очистке грунтов от нефтезагрязнений важен комплексный подход, включающий в себя:

- рыхление грунтов для увеличения аэрации и лучшего протекания окислительно-восстановительных реакций;
- внесение органических и минеральных удобрений;
- посев трав с целью интенсификации природных процессов биохимического очищения.

Созданы специальные биопрепараты (клетки определенных функциональных групп микроорганизмов на минеральном субстрате, чаще всего, глинистых минералах).

Экспериментальные исследования на мазутозагрязненных площадках показали, что в результате внесения в грунт биопрепарата и засева многолетними травами в течение 2-3 месяцев разлагается 76-98 % мазута. При этом стоит отметить, что мазут – один из самых токсичных нефтепродуктов, который практически не подлежит очистке другими, «абиотическими» методами [Месяц, Шемякина, 2009].

Помимо регенерации нефтезагрязнений, в результате таких воздействий изменяется состав, строение и свойства вмещающих грунтов. Снижение прочности и фильтрационной способности грунтов [Дашко, 2003б], увеличение подвижности тяжелых металлов [Легин и др., 2007] и накопление других токсичных элементов обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований перед использованием очищенных грунтов в сельском хозяйстве или в качестве оснований для сооружения.

Все микробиологические методы улучшения грунтов можно разделить на 2 группы – методы «биостимуляции», когда посредством воздействия активизируется природный микробный комплекс грунтов, и «биоприроста», когда в грунт искусственно вводятся отдельные штаммы или физиологические группы микроорганизмов. Биоприрост менее приемлем, чем биостимуляция, по целому ряду причин: 1) внос отдельных видов микроорганизмов требует дополнительных разрешений; 2) повышенная стоимость; 3) сложности выработки универсальных подходов к решению различных задач; 4) возможность вымирания или перехода внесенных микроорганизмов в анабиоз, если среда окажется неблагоприятной для размножения. Биостимуляция исключает эти проблемы, так как уже существующая биота изначально приспособлена к условиям конкретной среды. Для применения таких методов требуется меньше согласований. Тем не менее, недостатки этих методов связаны со сложностью достижения однородной обработки всего участка и затратами времени на рост и развитие биомассы. Компромиссом могут быть смешанные методы – биоприрост в небольших количествах и стимуляция этих клеток уже в пласте [DeJong et al., 2013].

Биологические методы позволяют изменять:

- 1) химический состав (буферность, реакционную способность порового раствора, емкость катионного обмена);
- 2) состав и физические свойства грунтов (плотность, пористость, влажность, проводимость – гидравлическую, электрическую, термическую);
- 3) физико-химические свойства (набухаемость, усадочность, водопрочность);
- 4) физико-механические свойства (прочность, сжимаемость, сцепление, угол внутреннего трения и т.п.).

Микробное осаждение кальцита (МОК) до сих пор остается основным объектом изучения в рамках нового направления прикладной науки – биогеотехники. Суть технологии состоит в осаждении из порового раствора кальцита в результате метаболизма микроорганизмов. Осаждение можно индуцировать несколькими путями, например, гидролизом мочевины, денитрификацией, сульфатредукцией (которая ведет, в том числе, к осаждению доломита) и железоредукцией, ведущей дополнительно к осаждению анкерита и других минералов. Ферментативный гидролиз мочевины микроорганизмами – наиболее энергоэффективный процесс, уреазная активность присуща многим микроорганизмам и растениям. Штамм *Bacillus pasteurii* (недавно был переклассифицирован как *Sporosarcina pasteurii*) – алкалофильная бактерия с чрезвычайно высокой уреазной активностью – искусственно вносится в грунты в лабораториях для индуцирования осаждения кальцита [DeJong et al., 2013]. Микроорганизмы, проявляющие уреазную активность, обнаружены в микробных комплексах многих грунтов, в том числе, плавунных песках, которые чаще всего и являются объектом закрепления. Таким образом, привнос в грунт мочевины и источника кальция (чаще всего, это CaCl_2) ведет к цементации песка, ликвидации плавунных свойств, остановки механической суффозии и т.п. [Burbank et al., 2011].

Лабораторные испытания показали существенное (более, чем в 1000 раз) увеличение прочности таких систем, снижение водопроницаемости на 2 порядка, увеличение прочности при малых нагрузках на 3 порядка. Даже после разрушения цемента в результате сдвига уменьшение пористости (или увеличение плотности) существенно влияет на параметры материала [DeJong et al., 2013].

Первые применения этой технологии известны в дорожном строительстве, а также описан случай закрепления галечниковых грунтов для прокладки трубопровода в Нидерландах [DeJong et al., 2013].

В качестве цементирующего вещества можно использовать и другие соединения, выпадающие в осадок в результате микробиологических процессов. Это фосфат кальция, соединения магния, оксиды и гидроксиды железа [Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering, 2015].

Активно применяются технологии кольматирования песчаных грунтов биопленками. Они позволяют понизить фильтрационную способность грунтов, увеличить адсорбцию мигрирующих элементов и могут быть использованы в основании отвалов, свалок, хранилищ отходов, а также в гидротехническом строительстве [Shaw et al., 1985, Cunningham et al., 1991; Biotechnologies and Biomimetics..., 2015].

Перспективными являются и «обратные» технологии при необходимости увеличения пористости и водопроницаемости грунтов. Возможно также искусственное разжижение

песчаных грунтов, используя микробиологическое газообразование [Biotechnologies and Biomimetics..., 2015].

В заключение стоит отметить, что, несмотря на значительные перспективы применения микробиологических процессов в биотехнике, необходимы детальные изучения и разработка методик и подходов к каждой задаче на конкретном объекте. Большинство имеющихся на сегодняшний день исследований на этот счет уделяет внимание лишь «целевому» свойству или параметру грунта, не обращая внимания на возможные изменения всех характеристик состава, строения и свойств грунтов.

Таким образом, анализ существующих на сегодняшний день литературных данных позволяет делать следующие выводы:

1. В грунтах создаются условия для одновременного сосуществования аэробных и анаэробных форм микроорганизмов, изменение условий ведет к перераспределению микробной активности.

2. Численность организмов наибольшая в верхних горизонтах грунтовых массивов, в интервале первых метров она существенно сокращается, ниже до изученных значительных глубин меняется слабо, а колебания биомассы зависят от состава и условий залегания грунтов. В верхних горизонтах грунтовых массивов развиты мицелиальные формы, ниже по разрезу доминируют бактерии.

3. Путем различных механизмов микроорганизмы влияют на состав грунтов. В результате микробиологических процессов разрушаются одни минералы и кристаллизуются другие, образуются аморфные соединения, грунт насыщается газами, изменяются характеристики порового раствора.

4. В среде с преобладанием аэробных условий происходит агрегация грунтов, анаэробных – диспергация. Основным агентом агрегации в почвах является органическое вещество, в грунтах с активным микробным комплексом, вероятно, ведущее влияние на микроагрегатный состав оказывают клетки микроорганизмов (путем адгезии на поверхностях частиц и их спутывания мицелиальными клетками) и продукты их жизнедеятельности.

5. Микробиологическая активность существенно изменяет показатели свойств грунтов. В большинстве работ отмечено негативное влияние (уменьшение прочностных и деформационных свойств, увеличение набухаемости и т.д.), однако, некоторые процессы могут приводить к улучшению показателей свойств грунтов.

6. Антропогенное влияние, в особенности привнесение питательных веществ, активизирует микробиологические процессы и ведет к изменению характеристик грунтов.

7. Направленные микробиологические процессы можно использовать в инженерно-хозяйственной деятельности; особенно перспективными выглядят технологии укрепления грунтов за счет биоцементации, очистки грунтов от загрязнений, добычи полезных ископаемых. Тем не менее, необходимо комплексное изучение влияния этих процессов на состав, строение и свойства грунтов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ГРУНТОВ И ИХ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Микробная сукцессия, инициированная увлажнением питательным веществом (глюкозой), как метод изучения влияния микробиоты на состав, строение и свойства грунтов

В условиях антропогенной нагрузки грунты подвержены техногенному загрязнению различными веществами, в том числе, биофильными. Часто загрязнение носит однократный характер (например, при прорыве коммуникаций, разливах на поверхности грунта и т.п.). Поэтому интерес представляет изучение изменения параметров микробного комплекса во времени после однократного увлажнения образца питательным соединением («загрязнителем»). В результате такого увлажнения резко изменяются условия существования микроорганизмов, интенсивно развиваются виды, способные использовать внесенное химическое вещество в процессе жизнедеятельности. По мере расходования соединения преобразуется и микробный комплекс. Такие последовательные закономерные изменения в структуре микробного комплекса в результате однократного внешнего воздействия называются *инициированной микробной сукцессией*. При этом сукцессия может вести к установлению совершенно нового микробного сообщества или к восстановлению комплекса, существовавшего до внешнего воздействия. Фактором внешнего воздействия может быть не только привнесение питательного (или токсичного) вещества, но и изменение влажности, температуры, содержания газов и т.п. [Гузев и др., 1980; <http://racechrono.ru/...>, 05.03.2015]

В настоящей работе изучались изменение активности и численности микроорганизмов и преобразование состава, строения и свойств грунтов во времени в ходе микробной сукцессии, инициированной увлажнением раствором глюкозы, поскольку глюкоза – наиболее простой и подходящий субстрат для большинства микроорганизмов. Во многих случаях в несколько стадий происходит полное разложение внесенного вещества с формированием молекул воды, углекислого газа, энергии, которая запасается в виде специфических органических молекул (аденозинтрифосфат – АТФ), а также ферментов и

вспомогательных молекул (никотинамидадениндинуклеотидфосфат – НАДФ, никотинамидадениндинуклеотид – НАДН и др.), которые могут использоваться в дальнейших реакциях [Гусев, Минеева, 1985].

Наиболее распространенный путь разложения глюкозы – гликолиз. При этом из одной молекулы глюкозы образуется по 2 молекулы пирувата (соли пировиноградной кислоты), АТФ и НАДН [Гусев, Минеева, 1985]. Такой путь разложения глюкозы характерен для анаэробных гидролитических организмов при брожении углеводов [Заварзин, Колотилова, 2001]. Некоторые бактерии проводят окисление глюкозы по пути Энтнера-Дурова через промежуточный продукт – органические кислоты. В итоге образуется 2 молекулы пирувата и по 1 молекуле АТФ, НАДН И НАДФ. Третий путь – пентозофосфатный цикл – приводит к синтезу 1 молекулы пентозофосфата (который в дальнейшем преобразуется в пируват), 1 молекулы CO_2 и 2 молекул НАДФ [Гусев, Минеева, 1985]. Образовавшийся пируват поступает в дыхательный цикл (как по пути аэробного, так и анаэробного дыхания) и по многостадийной реакции разлагается до воды и углекислого газа с образованием энергии и синтезом биомассы. Промежуточные продукты этой реакции – кислоты и спирты, которые являются строительным материалом для биомассы, а также зачастую агрессивны к компонентам среды [Заварзин, Колотилова, 2001].

Таким образом, *микробиологический гидролиз глюкозы – сложный многостадийный процесс, который может протекать несколькими путями. Конечный продукт реакции – синтез биомассы, запасание энергии и выделение в окружающую среду воды и углекислого газа.* На каждой стадии образуются продукты метаболизма (спирты, кислоты, соли кислот и др.), которые являются субстратом для следующей реакции. Многие из них агрессивны к компонентам грунта. При этом глюкоза *разлагается полностью и не влияет* как химическое вещество *на состав, строение и свойства грунтов.*

В реальных условиях попадание в грунт раствора глюкозы маловероятно. Многие более сложные органические вещества преобразуются в ходе многостадийных реакций, одним из конечных этапов которых является синтез глюкозы. Так, под воздействием ферментов на клеточной стенке целлюлоза гидролизуеться до глюкозы через целлобиозу. Крахмал преобразуется в декстрины, затем в мальтозу и глюкозу. Глюкоза является продуктом реакций разложения хитина, древесины, клетчатки (животных и растительных остатков) [Гусев, Минеева, 1985; Шарков, Куйбина, 1972; Синицын и др., 1988; [http://studopedia.ru/...](http://studopedia.ru/), 19.03.2015; <http://biofile.ru/bio/1088.html>, 19.03.2015].

Доступность глюкозы для микробного комплекса грунта, а также ее распространенность во многих реакциях микробиологического разложения природных и искусственных веществ и полное потребление микроорганизмами позволяют

рассматривать раствор глюкозы как «модельный» загрязнитель. На основе полученных данных о преобразовании состава, строения и свойств можно строить прогнозы об изменении параметров грунтов при внесении других органических веществ, например, канализационных стоков или органических жидких промышленных отходов.

В настоящей работе в большинстве опытов использовали одинаковую дозировку глюкозы – 1 мл 0.1н раствора на 10 г грунта. Несвязные грунты (природные и техногенные грунты, не обладающие пластичностью, и техногенные суглинки, характеризующиеся неоднородным гранулометрическим составом) помещались в контейнеры, заливались раствором глюкозы в необходимом количестве и хранились в воздушно-влажных условиях (в эксикаторе над водой). Из связных (глинистых) грунтов (природные грунты – морская глина юрского возраста, аллювиальный суглинок, а также техногенные суглинки) приготавливались искусственно уплотненные образцы на основе грунтов нарушенной структуры. Растертый воздушно-сухой грунт помещался в фарфоровые чашки. К части образцов (контроль) добавлялась вода в количестве, необходимом для достижения оптимальной влажности уплотнения. К остальным образцам (опыт) добавлялся раствор глюкозы и дистиллированная вода до оптимальной влажности уплотнения. Полученная однородная масса помещалась в цилиндрические формы с внутренним диаметром 1,62 см, затем уплотнялась нагрузкой 3 МПа в течение 5 минут по традиционной методике, используемой на кафедре инженерной и экологической геологии. Образцы хранились в воздушно-влажных условиях в эксикаторе над водой (рис. 16).

Доступ кислорода в большинстве опытов был ограничен плотно закрытой крышкой эксикатора. Таким образом, можно говорить о создании *микроаэрофильных* условий для жизнедеятельности микробиоты – повышенной влажности и дефицита (но не полного отсутствия) кислорода. На определенные сроки отбирались пробы на соответствующие анализы изменения состава, строения и свойств грунтов.

Оптимальная влажность уплотнения определялась отдельно для каждого грунта; все образцы данного грунта формовались при этой влажности. Для определения 10 г воздушно-сухого грунта помещались в фарфоровые чашки, к навеске прибавляли раствор глюкозы в количестве 1 мл и при необходимости – вода для получения смесей с различной влажностью с шагом 2 %. Полученная паста перемешивалась и помещалась в формы. После уплотнения нагрузкой 3 МПа в течение 5 минут образцы извлекались, взвешивались, измерялись их диаметр и высота, а также определялась истинная влажность весовым методом, рассчитывалась плотность скелета грунта, и строился график соотношения плотности скелета грунта и влажности. Та влажность, при которой достигалась максимальная плотность скелета грунта при уплотнении, была принята за оптимальную для данного грунта.

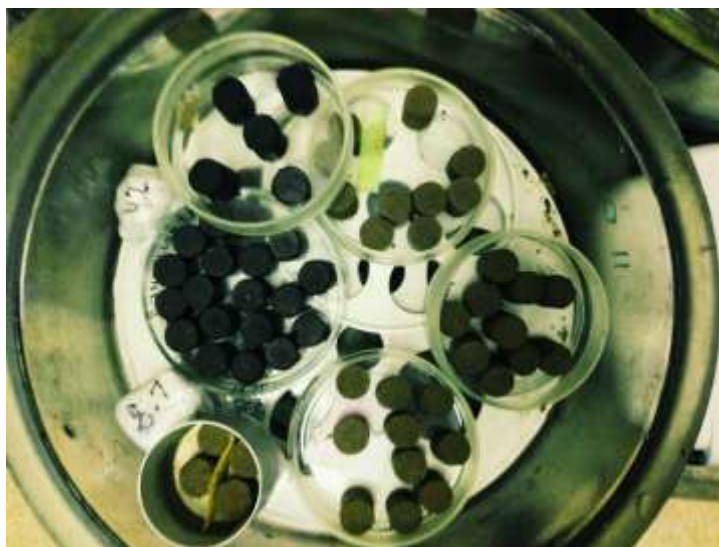


Рис. 16. Искусственные образцы из грунтов нарушенного сложения
(фото Т.В. Левиной)

Дозировка 0,1 н раствора глюкозы в количестве 0,1 мл на 1 г грунта является общепринятой в почвоведении для изучения параметров микробного комплекса и в данной работе выбрана с целью сравнения результатов исследований по грунтам с опытом определения параметров микробного комплекса верхних горизонтов грунтового массива – почв. Тем не менее, на мономинеральных модельных грунтах проведена сравнительная характеристика изменения активности дыхания микробного комплекса в зависимости от дозировки раствора глюкозы.

В ходе сукцессии по срокам оценивали динамику изменения характеристик микробного комплекса и состава, строения и свойств грунтов. Проводили определение численности и активности дыхания микроорганизмов, минерального и химического состава, микроагрегатного состава и микростроения, показателей прочностных свойств грунтов. В качестве контрольных образцов использовались грунты, увлажненные только водой.

Для исследования влияния микроорганизмов на свойства грунтов основания Камской ГЭС кольца для сдвиговых и компрессионных испытаний с грунтом, вырезанные из монолита, подвергали обработке обогащенной накопительной культурой гетеротрофных микроорганизмов, выделенной из этих же грунтов. Накопительная культура микроорганизмов получена в лаборатории геологии техногенных процессов ЕНИ ПГУ (г. Пермь) В.Т. Хмурчиком и Н.Г. Максимовичем при участии автора. Для получения накопительной культуры из середины монолита грунта асептически отбирали 5 см³ пробы, которую помещали в коническую колбу объемом 250 мл со 100 мл стерильной среды для

гетеротрофных микроорганизмов, содержащей глюкозу (1 г/л) и сухой питательный бульон (1,5 г/л). Колбу закрывали ватно-марлевой пробкой и инкубировали в течение 3 суток в термостате при 28°C. Полученную культуру микроорганизмов использовали в качестве инокулята для засева 5 литров свежей стерильной среды того же состава. Кольца для сдвиговых и компрессионных испытаний помещались в металлические цилиндры по 3 шт. Между кольцами прокладывались перфорированные пластиковые шайбы. Сверху система закрывалась металлической перфорированной шайбой, которая закреплялась винтом для предотвращения набухания грунта. После чего образцы заливались полученной жидкостью, цилиндры заматывались целлофаном для поддержания микроаэрофильных условий. Обработка колец с грунтом культурой микроорганизмов продолжалась 20 суток. После обработки жидкость сливалась, кольца подвергались испытаниям на сдвиг и компрессионное сжатие с контролем влажности, плотности, определением минерального и микроагрегатного состава и других показателей. Испытания на компрессионное сжатие и сдвиг исходных грунтов выполнялись на водонасыщенных образцах. Образцы насыщались дистиллированной водой в течение суток.

2.2. Методика изучения характеристик микробного комплекса грунтов

Исследования характеристик микробного комплекса проводились на кафедре биологии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Часть экспериментов выполнена при участии студентов геологического факультета А.Д. Сафиуллиной, О.И. Горшколепова, Т.В. Левиной и факультета почвоведения Ю.В. Кутейниковой.

В качестве общей характеристики метаболической активности микроорганизмов в исследовании выступала активность дыхания, определенная как *величина эмиссии углекислого газа в образцах грунтов*. Изучение эмиссии диоксида углерода проводили на газовом хроматографе с детектором электронного захвата (рис. 17). Длина колонки 3 м, наполнитель-Полисorb-1, скорость потока газа-носителя (He) – 25мл/мин [Методы почвенной микробиологии и биохимии, 1991].

Образцы грунта по 5 г помещали в пенициллиновые флаконы. Каждый образец увлажнялся 0.1н раствором глюкозы в количестве 0,1 мл на 1 г грунта. Контролем служил исходный образец грунта, увлажненный водой. Каждый грунт изучался в 5-10-кратной повторности. Статистическая погрешность результатов не превышает 10%.

Накопление диоксида углерода в газовой фазе в образце наблюдали в течение 28 дней по срокам (1, 4, 7, 10, 14, 21, 28 суток). За сутки перед измерением флаконы проветривали,

таким образом, получали объем диоксида углерода, накопившийся в образце на определенный срок за предыдущие сутки.

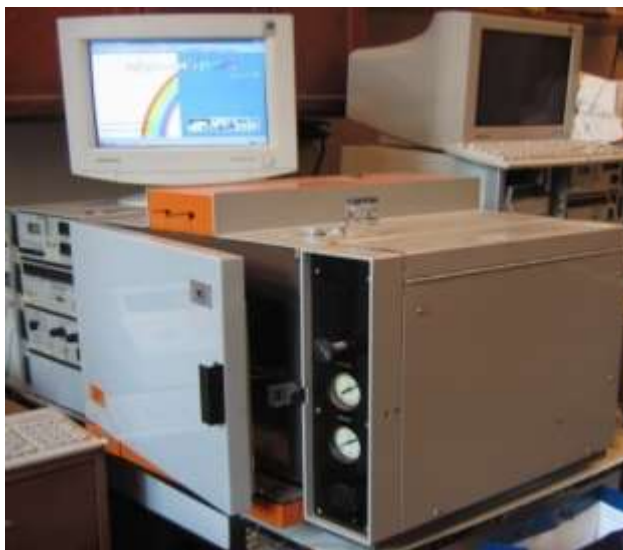


Рис. 17. Газовый хроматограф

Определение численности бактерий, мицелия актиномицетов и грибов в образце грунта осуществлялось люминесцентно-микроскопическим методом [Методы..., 1991]. Люминесцентная микроскопия основана на свойстве яркого свечения микрообъектов, окрашенных специальными красителями (флюорохромами), в ультрафиолетовом свечении или сине-фиолетовом спектре видимого света. Разнообразные красители способны вызывать свечение отдельных клеток, молекул или веществ в препарате, что обуславливает широкую применимость метода [http://www.medical-enc.ru/11/lumen_microscopy.shtml, 05.03.2015].

Грунтовую суспензию разбавлением 1:100 обрабатывали на ультразвуковой установке УЗДН-1 в течение 2 минут (сила тока 0,40 А, частота 22 кГц). Суспензию наносили микропипеткой со стерильным наконечником на тщательно обезжиренное предметное стекло (0,01 мл для определения бактерий, 0,02 мл для грибов) и равномерно распределяли простерилизованной петлей на площади 4 см² (квадрат 2х2 см). Препараты высушивали на воздухе при комнатной температуре. Затем после фиксации легким нагреванием на пламени газовой горелки окрашивали препараты водным раствором акридина оранжевого (разведение 1:10000; 2–4 мин) для подсчета бактерий и раствором калькофлюора (разведение 1:10000; 15 мин) – для грибов [Методы..., 1991].

Акридин оранжевый избирательно реагирует с молекулами ДНК и РНК и вызывает хромосомные мутации и свечение в сине-фиолетовом свете. Калкофлюор проникает в

клеточные стенки грибов грибов в молекулы полисахаридов (хитин и целлюлоза), вызывая зеленое свечение (рис. 18) [Herth, Schnepf, 1980].

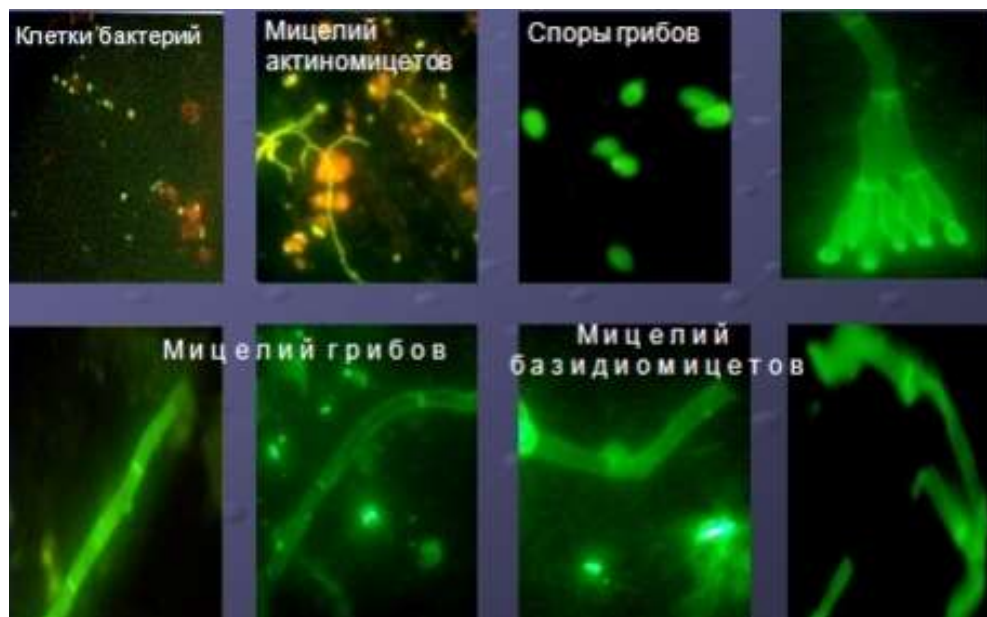


Рис. 18. Клетки и мицелий микроорганизмов под люминесцентным микроскопом
[<http://soil.msu.ru/biologia-issledovania/1720-microbial-biomass>, 05.03.2015]

Окрашенные препараты высушивали при комнатной температуре. Для микроскопии на препарат наносили каплю воды и покрывали обезжиренным покровным стеклом. Лишнюю воду удаляли фильтровальной бумагой. Препараты просматривали на люминесцентном микроскопе (рис. 19) ZEISS Mikroskop Axioskop 2 plus (Германия) (светофильтр Filterset 09).

Количество микробных клеток, содержащихся в 1 г образца грунта, вычисляли по формуле:

$$M = 4an \cdot 10^{10} / p,$$

где М – количество клеток в 1 г грунта; а – среднее число клеток в поле зрения; р – площадь поля зрения (мкм^2); n – показатель разведения [Методы..., 1991].

Биомассу бактерий (Бб), мицелия актиномицетов (Бма) и грибов (Бг) вычисляли следующим образом (мг/г грунта):

$$\text{Бб} = 2M \cdot 10^{-2},$$

$$\text{Бма} = 3,9M \cdot 10^{-5},$$

$$\text{Бг} = 0,628M \cdot 4,75 \cdot 10^{-3},$$

где М – для бактерий численность $\cdot 10^{-8}$; для грибного и актиномицетного мицелия – длина в метрах [Кожевин, 1989].



Рис. 19. Люминесцентный микроскоп

Статистическая обработка данных по активности дыхания и численности микроорганизмов проводилась с помощью программ Excel 2010 и Statistica 6. Оценивались средние значения и статистическая ошибка определений на каждом сроке [Самарин и др., 2004].

Для проведения корректного анализа изменения микробного комплекса в ходе сукцессии рассчитывался ряд коэффициентов, показывающих отличие характеристик активности и численности микроорганизмов в опытных и контрольных образцах. Коэффициент трансформации глюкозы (КТГ) показывает увеличение активности дыхания микроорганизмов при внесении в систему глюкозы и равен отношению величин эмиссии диоксида углерода в опытных образцах к контрольным. Для анализа прироста биомассы использовали коэффициент микробного отклика на глюкозу (КМОГ), который представляет собой отношение общей биомассы микроорганизмов в опытных и контрольных образцах. Для оценки метаболической активности микробного комплекса применялась величина удельной активности дыхания микроорганизмов (УАД), равная отношению разности эмиссий дыхания в опытных и контрольных образцах к разности биомассы в опытных и контрольных вариантах на одном и том же сроке [Манучарова и др., 2011].

Оценка численности отдельных филогенетических групп микроорганизмов в грунтах выполнена Ю.В. Кутейниковой и Н.А. Манучаровой на факультете почвоведения МГУ с помощью метода *in situ*-гибридизации с рРНК-специфичными флуоресцентно-мечеными олигонуклеотидными зондами (FISH – fluorescent in situ hybridization). Этот метод совмещает

возможности идентификации и определение численности отдельных филогенетических групп микроорганизмов в образцах различной природы, широко используется в практике современных исследований в почвоведении. В настоящей работе был применен спектр зондов, специфичных для представителей доменов *Archaea* и *Bacteria*, а также отдельных филогенетических групп *Bacteria*, что позволило осуществить анализ бактериального сообщества рассматриваемых грунтов [Манучарова, 2014].

Микробиологические исследования родového состава микроорганизмов и количественная оценка их содержания в смеси накопительных культур были проведены на биологическом факультете МГУ Куненковой Н.Н. в декабре 2011 – марте 2012 г. Для определения наличия тех или иных типов микроорганизмов приготавливались питательные среды, благоприятные для развития одного типа микроорганизмов [Красноперова и др., 2011].

Среда для выделения денитрификаторов содержала (г/л): лимоннокислого натрия – 5,0; KNO_3 – 2,0; KH_2PO_4 – 2,0; MgSO_4 – 2,0; CaCO_3 – 0,2; аспарагина – 1,0; FeCl_3 – следы, воды – 1 л. pH среды 7,0. Рост денитрификаторов определяли по наличию NO_2^- (реакция с реактивом Грисса) и появлению газообразного азота в поплавке.

Для выделения нитрификаторов использовали среду Виноградского следующего состава (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 2,0; K_2HPO_4 – 1,0; MgSO_4 – 0,5; FeSO_4 – 0,4; NaCl – 2,0; CaCO_3 – 5,0; вода – 1 л. Качественные реакции на нитраты и нитриты проводили с использованием соответственно дифениламина и реактива Грисса.

В среду для выделения бродильщиков входили (г/л): глюкоза – 20,0; дрожжевой экстракт – 4,0; гидролизат казеина – 10,0; вода – 1 л. Среду разливали в пенициллиновые пузырьки, герметично закрывали резиновыми пробками, газовую фазу замещали на аргон и стерилизовали при 1 атм. Рост бродильщиков определяли по помутнению среды и изменению pH.

Для выделения сульфатвосстанавливающих бактерий была использована среда Постгейта В следующего состава (г/л): KH_2PO_4 – 0,5; NH_4Cl – 1,0; $\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2,0; лактат натрия – 3,5; дрожжевой экстракт – 1,0; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5; $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ – 0,25. pH 7,0. Газовую фазу заменяли на аргон. Растворы железа и сульфида стерилизовали отдельно и добавляли перед посевом. Микроорганизмы культивировали при 30°C. Рост сульфатвосстанавливающих бактерий определяли по почернению среды (в результате связывания железа выделившимся сульфидом выпадает черный осадок).

Для выделения железooksисляющих бактерий была использована среда Лиске (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 1,5; KCl – 0,05; MgSO_4 – 0,05; K_2HPO_4 – 0,05; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 0,01. pH 7,0. Стерильное железо добавляли перед посевом.

Количество нитрификаторов, сульфатредукторов, денитрификаторов и бродильщиков определяли методом предельных разведений, высевая десятичные разведения на соответствующие среды в двух повторностях, и дальнейшей статистической обработкой результатов с помощью таблиц Мак-Креди.

Для микроскопии препараты фиксировали над пламенем горелки и окрашивали фуксином. Микроскопию проводили при увеличении в 1500 раз. Для фотографирования использовали фотокамеру Kodak EasyShare C533.

2.3. Методика изучения состава грунтов

Минеральный состав грунтов определялся с помощью рентгеновской дифракции. Рентгенодифракционный анализ препаратов проводился автором в сотрудничестве с С.В. Закусиным, С.Г. Гараниной и В.В. Крупской на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ. Определения проводили на рентгеновском дифрактометре ULTIMA-IV фирмы Rigaku (Япония), полученном в рамках Программы развития МГУ. Рабочий режим – 40 кВ-40 мА, медное излучение, никелевый фильтр, диапазон измерений – $3-65^\circ 2\theta$, шаг по углу сканирования $0.02^\circ 2\theta$, фиксированная система фокусирующих щелей. Для ускорения съемки и повышения качества экспериментальных данных использовался полупроводниковый детектор нового поколения – DTex/Ultra: скорость сканирования – $5^\circ 2\theta/\text{мин}$.

Проводили валовые анализы неориентированных порошковых препаратов, а также ориентированных препаратов глинистой фракции грунта. Часть валовых образцов растиралась с внутренним эталоном (10 % ZnO) и набивалась в кюветы без использования прессования при постоянном контроле качества поверхности для приготовления максимально разориентированных препаратов. Для оценки изменения глинистых и тонкодисперсных минералов проводили анализ ориентированных препаратов глинистой фракции грунтов. Образцы глинистой фракции были получены методом седиментации (с предварительным растиранием с пирофосфатом натрия) и отбора проб через интервал времени, рассчитанный по закону Стокса. Исследовался препарат, размер частиц в котором не превышал 5 мкм [Шлыков, 1991].

Диагностика минерального состава проводилась методом сопоставления экспериментального и эталонных спектров из базы данных PDF-2 в программном пакете Jade 6.5, компании MDI. Количественный анализ проводился методом полнопрофильной обработки рентгеновских картин от неориентированных препаратов с внутренним эталоном [Пушаровский, 2000] в программном продукте RockJock [Eberl, 2003]. Оценка изменения состава глинистой фракции проводилась на качественном уровне с использованием

эталонных спектров и графоаналитического метода оценки состава смешанослойных минералов Б.А. Сахарова и В.А. Дрица [2015]. Для аллювиальных грунтов основания плотин Камской ГЭС проводился безэталонный рентгеноструктурный анализ. Содержание минералов оценивалось по методике полуколичественного анализа Бискае. Методика состоит в вычислении площади наиболее характерных пиков на дифрактограмме насыщенных этиленгликолем образцов. При этом не учитываются разновидности конкретных минералов в группе; под смектитам рассчитывается общее суммарное содержание смектитов и смешанослойных минералов, а сумма глинистых минералов нормируется на 100 %, поэтому можно скорее говорить о соотношении глинистых минералов, чем об их количественном содержании [Шлыков, 1991].

Химический состав водорастворимых солей определяли с помощью анализа водной вытяжки, приготовленной по стандартным методикам [Аринушкина, 1970]. Засоленность грунтов оценивалась на основе сопоставления массы сухого остатка, полученного при выпаривании фильтрата [Аринушкина, 1970] со значениями классификационных показателей (D_{sal}) по ГОСТ 25100-2011 [Лабораторные работы..., 2008]. Значения кислотности (pH) и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) среды определялись с помощью pH-Eh метра Milwaukee pH55 Martini. Определение карбонат- и гидрокарбонат-ионов в вытяжке проводили ацидиметрическим титрованием в присутствии индикаторов фенолфталеина и метилового оранжевого, соответственно. Определение хлорид-ионов в вытяжке проводили методом аргентометрического титрования в присутствии индикатора хромата калия. Определение общей жесткости вытяжки (суммарного содержания ионов кальция и магния) проводили комплексонометрическим титрованием с индикатором эриохромом черным Т. Определение содержания ионов кальция в вытяжке проводили методом комплексонометрического титрования с индикатором мурексидом. Содержание ионов магния в вытяжке вычисляли по разности между показателем жесткости воды и концентрацией ионов кальция. Содержание ионов натрия и калия определяли расчетным методом по разности сумм эквивалентов катионов и анионов. Определение содержания сульфат-ионов проводили весовым методом [Аринушкина, 1970].

Для оценки временного изменения pH, содержания ионов Ca^{2+} и HCO_3^- в суспензии 25 г воздушно-влажного грунта заливались 75 мл дистиллированной воды с растворенной глюкозой в пересчете на 1 мл 0,1 н раствора на 1 г грунта. Контролировалось отсутствие катионов кальция и гидрокарбонат-ионов в растворе глюкозы и воде. Далее два раза в день отбирали 1 мл пробы микропипеткой, разбавляли дистиллированной водой и проводили ацидиметрическое (0,002н H_2SO_4) и комплексонометрическое (0,001н ТрилонБ) титрования с

соответствующими индикаторами [Аринушкина, 1970]. Содержание общего органического вещества проводилось методом мокрого сжигания по Тюрину [Аринушкина, 1970].

Влажность грунтов определялась весовым методом. Навеска грунта помещалась в термостат при температуре 105⁰С, по потере массы рассчитывалась влажность [Практикум по грунтоведению, 1993].

2.4. Методика изучения строения и состояния грунтов

Гранулометрический состав глинистых грунтов определялся пипеточным методом. Подготовка глинистых грунтов к гранулометрическому анализу проводилась по методике П.Ф.Мельникова (растирание с 5 % раствором пиррофосфата натрия). Определение микроагрегатного анализа проводилось также пипеточным методом, с подготовкой грунтов по методике Н.А.Качинского [ГОСТ 12536–79]. Гранулометрический состав песчаных грунтов определялся ситовым методом в соответствии с ГОСТ 12536–79. Наиболее мелкую фракцию после ситового анализа дополнительно анализировали пипеточным методом [Практикум по грунтоведению, 1993].

Для изучения микростроения образцов также использовался метод рентгеновской компьютерной микротомографии (μКТ). Анализ строения выполнен Л.Г. Булыгиной под руководством В.Н. Соколова. Исследования проводились с помощью рентгеновского компьютерного микротомографа TDM 1000H II, полученного в рамках Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова. Метод μКТ основан на различном поглощении рентгеновского излучения структурными элементами образца, которое во многом зависит от их химического состава и плотности. В результате компьютерной реконструкции данных томографической съемки получают набор виртуальных сечений – полутоновых изображений (μКТ-изображений), на которых оттенки серого цвета отображают распределение «рентгеновской плотности» в образце. Объемное представление данных реконструкции с помощью специального программного обеспечения позволяет визуализировать и количественно оценить структуру порового пространства на макроуровне [Булыгина и др., 2014]. Проводили съемку одного и того же образца сразу после приготовления и через 15 суток выдерживания в эксикаторе над водой.

Изучение микростроения глинистых грунтов выполнено В.Н. Соколовым и М.С. Черновым с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1450VP. В основу работы РЭМ положен телевизионный принцип развертки тонкосфокусированного электронного пучка в растр по поверхности образца. В результате взаимодействия электронного пучка с поверхностью образца в нем возникает зона возбуждения, из которой поступают различные сигналы, несущие информацию [Практикум по грунтоведению, 1993].

Эта информация обрабатывается с помощью персонального компьютера и выдается пользователю в виде фотографии.

Для изучения морфологических особенностей песчаных зерен и изменений в структуре песка использовался оптический бинокулярный микроскоп МБС-12.

2.5. Методика изучения показателей свойств грунтов

Определение влажности нижнего предела пластичности производилось методом раскатывания в шнур, верхнего предела пластичности - методом балансирующего конуса в соответствии с ГОСТ 5180-84. Плотность твердого компонента грунта определялась пикнометрическим методом с керосином [Лабораторные работы..., 2008].

С целью определения влияния жизнедеятельности микроорганизмов на прочностные характеристики песчаного грунта проводились сдвиговые испытания. Изучение проводилось с помощью сдвигового прибора СПКА (рис. 20). Данный прибор входит в состав измерительно-вычислительного комплекса АСИС-1 «Геотек». Для данного комплекса погрешность измерения нагрузки (вертикальной и касательной) не более 1 % от диапазона измерений, погрешность измерения деформации не более 0,2 % от диапазона измерений (данные Лисицына А.В., руководителя технического отдела ООО «НПП«Геотек»). В настоящих испытаниях погрешность определения касательной нагрузки (при заданной вертикальной) составляет $\pm 0,001$ МПа.



Рис. 20. Сдвиговой прибор кинематический автоматический (СПКА)

Испытания осуществлялись на седьмые и тридцатые сутки с момента привнесения в грунт раствора глюкозы, а также на исходных образцах (без глюкозы). Передаваемые вертикальные нагрузки: 50, 75, 100, 150 кПа. Применялась схема быстрого

недренированного сдвига, испытание происходило при постоянной скорости деформации (2 мм/мин). Сдвиговые испытания проводились на грунтах средней плотности. На воздушно-сухих песках были определены плотности в максимально рыхлом и плотном сложениях [Практикум по грунтоведению, 1993]. Их среднее значение принималось как плотность скелета грунта (при практически нулевой гигроскопической влажности) и пересчитывалось на плотность грунта с учетом задаваемой в опыте влажности. Принятые значения плотности и влажности для каждого грунта контролировались на протяжении всего исследования. Истинные значения влажности определялись после сдвиговых испытаний весовым методом, рассчитывались плотности сложения и скелета грунта, пористость, степень водонасыщения и другие показатели. В результате испытаний были вычислены значения угла внутреннего трения ϕ и сцепления C и проанализированы изменения показателей сопротивления сдвигу грунтов на разных сроках.

Компрессионные испытания проводились согласно ГОСТ 12248-2010 на приборах ЦНИИ МПС. Нагружение испытываемого образца проводили равномерно, без ударов, ступенями нагрузки. Ступени давления равны 0,05; 0,1; 0,15; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45 и 0,50 МПа. На каждой ступени нагружения образца грунта снимали отсчеты по приборам для измерения вертикальных деформаций в следующей последовательности: первый отсчет - сразу после приложения нагрузки, затем через 0,25; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30 мин и далее с интервалом 1 ч в течение рабочего дня, а затем в начале и конце рабочего дня до условной стабилизации деформации образца. За критерий условной стабилизации деформации принимают скорость деформации образца, не превышающую 0,01 мм за последние 16 часов [Практикум по грунтоведению, 1993].

Для искусственно уплотненных образцов по срокам (0, 4, 7, 10, 14, 21, 24, 30 суток) определяли массу, геометрические размеры и влажность (весовым методом), рассчитывали плотность сложения и скелета, а также пористость и коэффициент водонасыщения образцов. На приборе МП-2С определяли временное сопротивление образцов одноосному сжатию. На каждый срок определяли прочность 3-х образцов, и рассчитывалось среднее значение. По результатам испытания строились кривые изменения временного сопротивления одноосному сжатию в ходе сукцессии.

Для выявления степени связи между некоторыми показателями состава, строения свойств грунтов и параметрами микробного комплекса проводился корреляционный анализ. Подбиралось линейное или степенное уравнение, описывающее взаимосвязь между показателями, степень связи оценивали с помощью коэффициента корреляции [Самарин и др., 2004].

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Характеристика изученных образцов грунтов

Исследования проводились на образцах дисперсных грунтов, типичных и важных с точки зрения инженерно-хозяйственной деятельности, различного генезиса, возраста, условий залегания, состава и дисперсности, отобранных на территории г. Москвы, ближайшего Подмосковья, а также в г. Пермь. Аллювиальные грунты из основания грунтовых плотин Камской ГЭС отобраны автором в ходе буровых работ в составе партии Естественного института Пермского государственного университета в 2011 г. Образцы техногенных и песчаных грунтов отобраны студентами кафедры инженерной и экологической геологии А.Д. Сафиуллиной, О.И. Горшколеповым и А.В. Михайловым в ходе производственных практик в ООО «ИНЖЭКО Центр», ООО «СК КРЕАЛ» и ООО «Карбон» соответственно в 2012-2013 гг. Монолит аллювиального суглинка отобран студентами кафедры на Звенигородской биостанции МГУ в ходе учебно-научной практики в 2013 г. Образец глины юрского возраста предоставлен Бершовым А.В. в 2013 г. Мономинеральная бентонитовая глина передана автору Б.В. Покидько из МИТХТ имени М.В. Ломоносова в 2013 г. Мономинеральная каолиновая глина предоставлена С.К. Николаевой из коллекции кафедры инженерной и экологической геологии в 2013 г. Всего изучено 13 грунтов. Каталог образцов грунтов представлен в приложении 1.

На рис. 21 приведен схематический геологический разрез, характерный для Московского региона, и показана приуроченность к разрезу изученных в рамках настоящей работы образцов нарушенного и ненарушенного сложения.

Морские глины юрского возраста являются важной с инженерно-хозяйственной точки зрения толщей на территории города. Они перекрывают каменноугольные породы, подверженные процессам карстообразования, являясь своеобразным защитным экраном. Юрские глины выступают в качестве оснований сооружений высокой степени ответственности, возводимых на свайных фундаментах. В Московском регионе морские отложения юрского возраста являются региональным водоупором, разделяющим водоносные горизонты в четвертичных отложениях и каменноугольные пластово-трещинные воды, используемые для водоснабжения города.

Во флювиогляциальных песках различного возраста на территории г. Москвы формируются водоносные горизонты, с одной стороны, используемые для водоснабжения населения в регионе, с другой – подверженные техногенному загрязнению. Широкая распространенность песчаных грунтов на территории г. Москвы и относительно высокие

показатели прочностных и деформационных свойств позволяют считать песчаные грунты достаточно надежным основанием для сооружений.

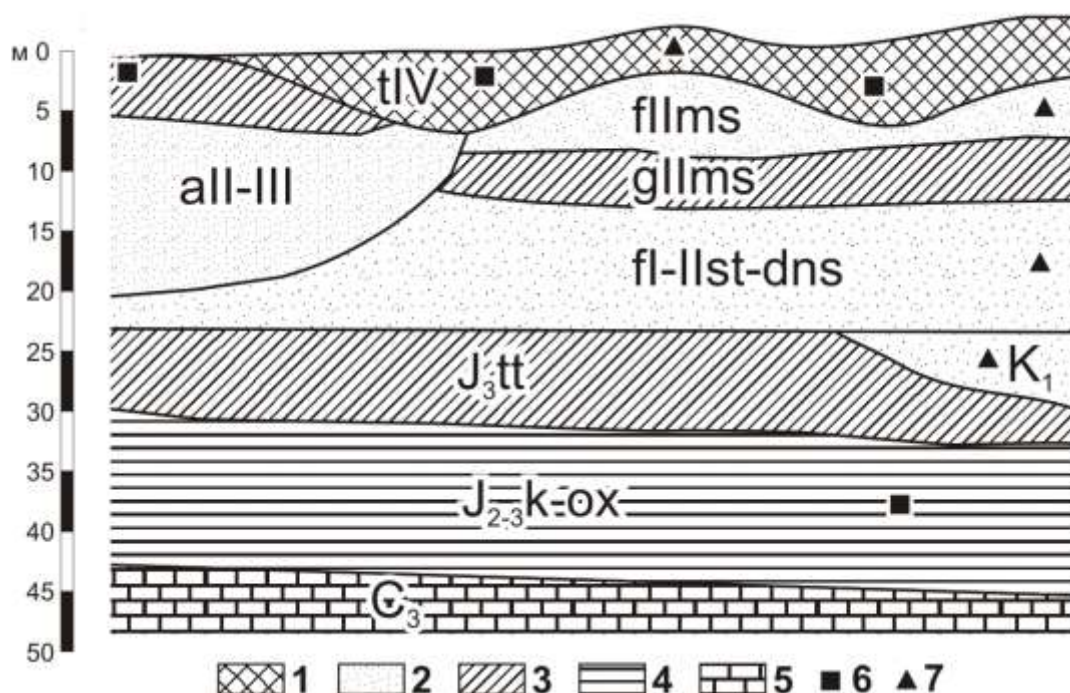


Рис. 21. Схематический геологический разрез, характерный для московского региона [составлено автором по: Москва: геология и город, 1997; архивным данным ИГЭ РАН; отчетам по инженерным изысканиям на различных объектах в Московском регионе ООО «Карбон», ООО «СК КРЕАЛ», ЗАО «Инжэко Центр» и др.]

1 – насыпные грунты и грунты культурного слоя; 2 – пески различной крупности; 3 – суглинки; 4 – глины; 5 – известняки; места отбора грунтов для лабораторных исследований в рамках настоящей диссертации: 6 – ненарушенного сложения; 7 – нарушенного сложения

Техногенные отложения на территории г. Москвы представлены практически повсеместно. В историческом центре города развиты грунты культурного слоя, формировавшиеся в течение нескольких столетий и содержащие артефакты различных эпох – строительные материалы, обломки древесины, посуды и т.п. В черте города современный рельеф нарушен при планировке и освоении участков. После проходки многочисленных тоннелей (автомобильных и метрополитена) на территории города остаются мощные насыпи. Особо стоит отметить техногенные грунты на участках засыпки природных водотоков. Мощность техногенных отложений в Москве достигает 25 м [Москва: геология и город, 1997]. Необходимость дальнейшего освоения территории ставит задачу возведения сооружений на мощных толщах неоднородных техногенных грунтов. На значительной

территории техногенные грунты служат вмещающими породами для коммуникаций, а также основанием дорожных полотен. Их приповерхностное залегание обуславливает подверженность загрязнению, в том числе, органическими веществами. Все это обуславливает высокую значимость изучения состава, строения и свойств техногенных грунтов, а также их микробного комплекса, для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации сооружений.

Для проведения детального описания состава, строения и свойств грунтов целесообразно объединить исследованные разновидности в группы и приводить характеристику по выделенным группам:

- 1) природные песчаные грунты (флювиогляциальные четвертичные и морские меловые, отобранные на территории г. Долгопрудный);
- 2) природные глинистые грунты, не измененные техногенным воздействием, с повышенным содержанием органического вещества – аллювиальный суглинок четвертичного возраста, отобранный на 1 надпойменной террасе р. Москвы на Звенигородской биостанции, и глина юрского возраста, отобранная в г. Москве на участке строительства ст. м. «Окская»;
- 3) природные аллювиальные глинистые грунты четвертичного возраста, находящиеся в условиях техногенной нагрузки, отобранные в основании земляных плотин Камской ГЭС;
- 4) техногенные грунты, отобранные в районе Новодевичьего монастыря, станций метро «Коломенское» и «Каширская» в г. Москве;
- 5) мономинеральные «модельные» глинистые грунты.

3.1.1. Характеристика природных песчаных грунтов

Образцы для исследования были отобраны в ходе изысканий, проведенных ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», на площадке строительства жилого комплекса на северной окраине г. Долгопрудный на берегу Клязьминского водохранилища на ул. Набережная [Отчет ЗАО «ИНЖЭКО Центр», 2012]. Было отобрано 3 грунта нарушенного сложения (табл. 9).

Химический состав. Результаты рентгенофлуорисцентного анализа химического состава песков, выполненного Е.Н. Самариным, представлены в табл. 10. В целом химический состав исследуемых грунтов схож между собой. Во всех образцах преобладает компонент SiO_2 и наблюдается высокое содержание Al_2O_3 . Кроме того, примерно в равных количествах содержатся Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O (4-6 %), в незначительном количестве присутствуют TiO_2 , P_2O_5 и S (<1 %).

Таблица 9. Журнал образцов песчаных грунтов

№ образца	Место отбора	Геологический индекс	Глубина отбора, м	$W_{\text{ест}}$, %	$\rho_{\text{ест}}$, г/см ³	Макроописание
1	Участок строительства жилого квартала в г. Долгопрудный, Набережная улица, скв. №12 (ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2012)	fQ_{IIms}	6,0-6,2	14	1,74	Песок пылеватый, серо-желтый
2		$f,lgQ_{\text{Idns}}-Q_{\text{IIms}}$	19,5-20,0	25	1,88	Песок мелкий, коричнево-серый
3		K_1	25,0-25,5	21	2,07	Песок средней крупности, зеленовато-серый

Примечание: 1) $W_{\text{ест}}$ – естественная влажность образцов; 2) $\rho_{\text{ест}}$ - плотность в природном сложении.

Таблица 10. Химический состав исследуемых образцов

Компонент	Содержание, %		
	K_1	$f,lgQ_{\text{Idns}}-Q_{\text{IIms}}$	fQ_{IIms}
SiO_2	72,9	70,5	64,7
TiO_2	0,4	0,4	0,4
Al_2O_3	8,3	9,1	12,1
Fe_2O_3	4,7	4,1	3,8
CaO	1,2	1,5	3,6
MgO	4,7	4,4	4,2
K_2O	3,3	3,5	3,9
Na_2O	4,1	4,3	6,6
P_2O_5	0,4	0,2	0,3
S	0,0	0,1	0,3

Для исследуемых грунтов был выполнен анализ водной вытяжки. Результаты определения *сухого остатка* (приложение 2) показали, что все грунты по классификации ГОСТ 25100-2011 (табл.Б.25, Б.26) относятся к незасоленным. По водородному показателю pH все природные песчаные грунты имеют кислую среду ($\text{pH} < 7$). Органическое вещество не обнаружено в образцах флювиогляциальных песков. Его следы (0,1 % по массе) обнаружены в меловом песке (приложение 2).

Минеральный состав. Каждый образец грунта был исследован под бинокулярным микроскопом в виде валовой пробы и отдельно по фракциям $> 0,5\text{ мм}$, $0,5-0,25\text{ мм}$, $0,25-0,1\text{ мм}$, выделенным в ходе гранулометрического анализа (рис. 22). Фракции диаметром $0,5-$

0,25 мм и 0,25-0,1 мм имеют аналогичный вышеописанному состав, однако зерна менее окатаны.

Флювиогляциальный пылеватый песок (fQ_{IIms}), при изучении валовой пробы состоит в основном из кварцевых зерен в глинистых рубашках, желтого цвета, имеющих неровную поверхность и включений темноцветных образований (рис. 22, а). Фракция диаметром $>0,5$ мм сильно дифференцирована по размерам зерен, преимущественно состоит из кварца – окатанного и неокатанного, прозрачного, желтого и розового, присутствуют белые минералы – карбонаты, а также непрозрачные бело-розовые минералы – возможно, полевые шпаты. Присутствуют единичные серо-коричневые блестящие пластинки слюды.

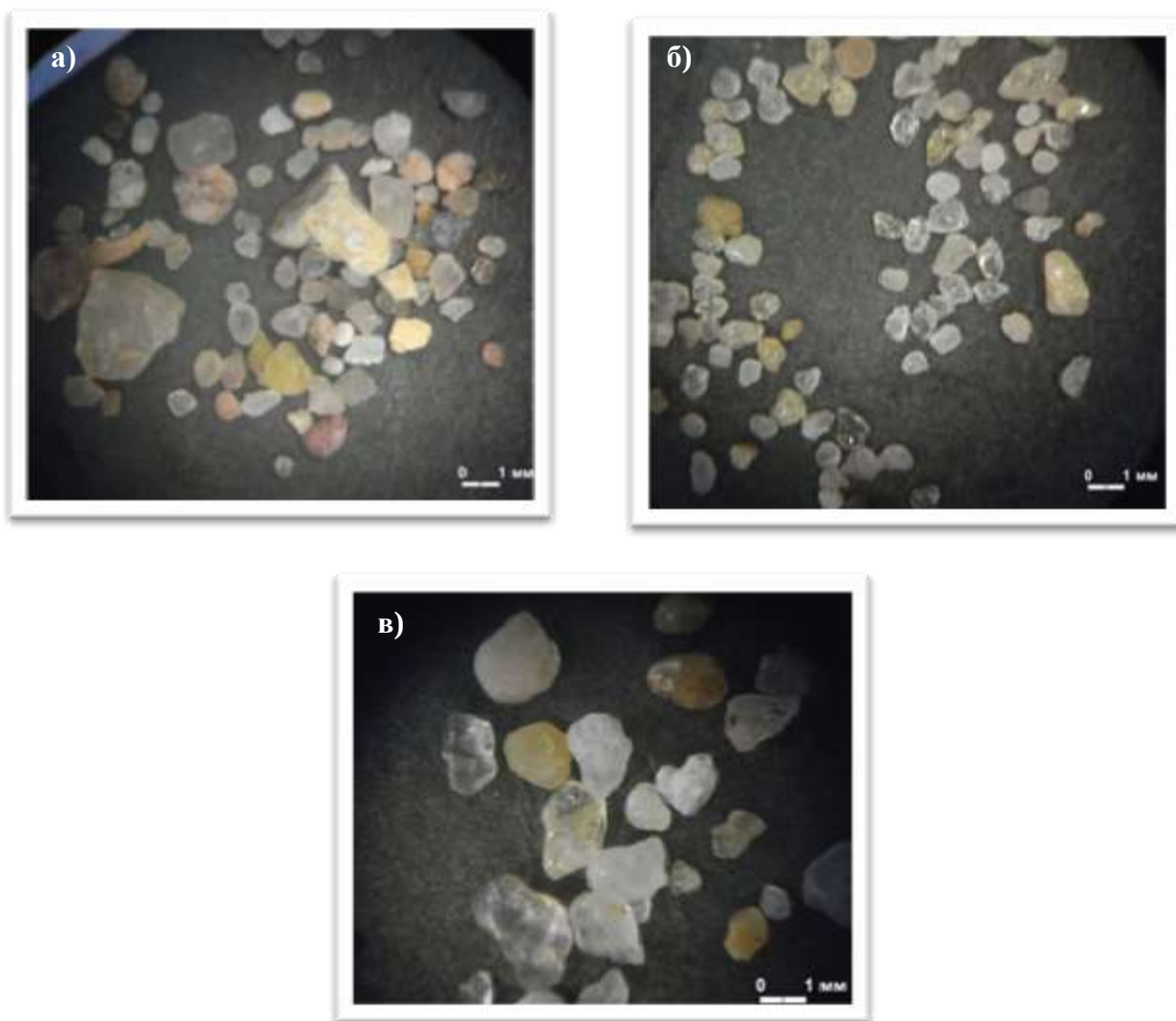


Рис. 22. Фотографии исследуемых песков под биноклем (фракция $d > 0,5$ мм)
 а) флювиогляциальный песок (fQ_{IIms}); б) флювиогляциальный песок ($f,lgQ_I dns-Q_{IIms}$);
 в) морской песок (K_1)

Флювиогляциальный мелкий песок ($f,lgQ_I dns-Q_{IIms}$) аналогично состоит в основном из кварцевых зерен с различным характером поверхности, разного размера и цвета (рис. 22, б). Однако прослежена некоторая закономерность: прозрачные зерна преимущественно

угловатые, а мутные желто-розовые – окатанные. Темноцветные минералы имеют неровную поверхность, они угловатые и блестящие. В данном образце отсутствуют карбонаты.

Морской песок средней крупности (K_1), имеет преимущественно кварцевую основную массу с редкими включениями темноцветных минералов (рис. 22, в). Кварцевые зерна угловатой формы, покрыты глинистой рубашкой бурого цвета, однако, встречаются и прозрачные разности. Темные зерна уплощенные, с ровной поверхностью и ярким блеском. Кварцевые зерна фракции диаметром $>0,5$ мм имеют изометричную форму, неровную поверхность, прозрачные разности обладают ярким блеском. Темноцветные минералы угловатые, плохой сохранности, выветрелые, вероятно, являются обломками пород. Карбонаты в данном образце не обнаружены.

Рентгеноструктурный анализ ориентированных препаратов фракции <1 мкм позволил установить, что в глинистой фракции всех образцов содержатся смешанослойный неупорядоченный иллит-сметит с преобладанием (>80 %) сметитовых пакетов, а также каолинит и «чистые» иллит и сметиты. В незначительном количестве отмечаются хлориты. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа приведены в приложении 3.

Гранулометрический состав. Результаты гранулометрического состава представлены в приложении 4. Больше всего крупных ($>0,5$ мм) и средних (0,5-0,25 мм) песчаных частиц содержится в образце мелового песка – 23 % и 35 % соответственно. Наименьшее количество частиц среднепесчаной фракции обнаружено в образце мелкого флювиогляциального песка. Кроме того, этот образец содержит максимальное количество частиц размером 0,25-0,1 мм, относящихся к мелким песчаным – 72 % (приложение 4).

Плотность твердых частиц грунтов определялась на воздушно-сухих образцах (гигроскопическая влажность W_g принимается равной нулю). Результаты анализа представлены в табл. 11. Значения плотности твердых частиц всех образцов примерно одинаковы и равны в среднем $2,64 \text{ г/см}^3$, что отражает существенный кварцевый состав песков.

Результаты определения *плотности в рыхлом и плотном сложениях* представлены в табл. 11. Наибольшую плотность в рыхлом сложении имеет мелкий песок ($f, l g Q_{\text{I dns}} - Q_{\text{II ms}}$) – $1,42 \text{ г/см}^3$, а в плотном сложении – пылеватый песок ($f Q_{\text{II ms}}$) – $1,74 \text{ г/см}^3$. Средняя плотность воздушно-сухого грунта выбиралась в качестве «рабочей» плотности скелета при проведении сдвиговых испытаний.

Таблица 11. Результаты определения плотности твердых частиц и плотности в рыхлом и плотном сложениях

Грунт	Геологический индекс	Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³	Плотность, г/см ³		
			в рыхлом сложении	в плотном сложении	средняя (плотность скелета)
Песок пылеватый	fQ _{IIms}	2,64	1,29	1,74	1,52
Песок мелкий	f,lgQ _{I dns} -Q _{IIms}	2,63	1,42	1,72	1,57
Песок средней крупности	K ₁	2,64	1,27	1,69	1,48

Таким образом, в работе исследовали 3 образца песчаных грунтов со следующими характеристиками:

образец № 1 (fQ_{IIms}): пылеватый песок со средним диаметром частиц равным 0,16 мм и коэффициентом неоднородности $C_u=44$, с плотностью скелета, равной 1,52 г/см³, содержит карбонаты;

образец № 2 (f,lgQ_{I dns}-Q_{IIms}): песок мелкий, однородный ($C_u=1,9$), имеет максимальное значение плотности скелета среди других образцов – 1,57 г/см³;

образец № 3 (K₁): песок средней крупности, средний диаметр частиц составляет 0,3 мм; данный песок является самым неоднородным среди изученных образцов ($C_u=65$).

Все образцы имеют сходный химический (SiO₂>50 %, Al₂O₃= 8-18 %) и минеральный составы (два образца отличаются наличием карбонатов), обладают равной плотностью твердых частиц (2,64 г/см³). Глинистую фракцию образцов составляют неупорядоченные смешанослойные минералы иллит-сметитового состава с преобладанием сметитовых слоев, а также каолинит и «чистые» иллит и сметиты. Все пески относятся к незасоленным и имеют кислую среду (pH<7).

3.1.2. Характеристика природных глинистых грунтов

В качестве природных глинистых грунтов в настоящей работе были изучены верхнеплейстоценовый суглинок и морская глина юрского возраста (табл. 12). Суглинок (aQ_{III}) отобран на первой надпойменной террасе р. Москвы на территории Звенигородской биостанции МГУ с глубины 0,4-0,6 м. (далее в тексте – «аллювиальный суглинок»). Грунт связный, серо-коричневого цвета, излом шероховато-ступенчатый. Текстура массивная, неслоистая, с растительными остатками, представленными корнями травянистых растений. Грунт имеет твердую консистенцию.

Глина морского генезиса оксфордского яруса верхнего отдела юрской системы J_{3ox} (далее в тексте – «юрская глина») отобрана с глубины 36,8 - 37,0 м на территории г. Москвы, на площадке строительства станции метро «Окская». Грунт связный, темно-серого цвета, излом жирный. Текстура массивная, неслоистая, без видимых органических остатков. Грунт имеет твердую консистенцию.

По данным количественного рентгеновского анализа в *минеральном составе* обоих грунтов преобладает кварц – 37 % в «юрской глине» и 61 % в «аллювиальном суглинке» (табл. 13, приложения 2 и 3). В обоих образцах присутствуют полевые шпаты – 8 и 18 % соответственно, причем содержание микроклина (4 и 10 %) выше, чем альбита (4 и 8 %). Такое соотношение минералов объясняется тем, что микроклин (калиевый полевой шпат) более устойчив при выветривании, чем альбит (Na-плагиоклаз).

Таблица 12. Журнал образцов природных глинистых грунтов

№	Место отбора	Индекс	Глубина отбора, м	Название по ГОСТ 25100-2011
1	Первая надпойменная терраса р. Москвы на территории Звенигородской биостанции МГУ, шурф в 10 м от бровки террасы	aQ _{III}	0,4-0,6	Суглинок легкий пылеватый твердый с растительными остатками и примесью органических веществ
2	г. Москва, площадка строительства станции метро «Окская», скв. 5120 (материалы ООО «Петромоделинг», 2013)	J _{3ox}	36,8-37,5	Глина легкая пылеватая твердая

Глинистые минералы представлены иллитом, каолинитом, смектитами и хлоритом. В обоих грунтах отмечено существенное содержание неупорядоченных смешанослойных глинистых минералов иллит-смектитового состава, с преобладанием иллитовых пакетов. Обращает на себя внимание высокое содержание кристаллического кальцита в «юрской глине» – 13 %. В «юрской глине» также отмечаются характерные для этого грунта гипс и пирит (табл. 13).

По результатам анализа *водной вытяжки* (приложение 2) «юрская глина» является слабозасоленным грунтом, а «аллювиальный суглинок» – незасоленным грунтом в

соответствии с ГОСТ 25100-2011. Сухой остаток в «глине» составляет 1,4 %, а в «суглинке» - 0,1 %.

Содержание карбонатов, определенное с помощью кальциметра, в «глине» составляет 7 %, в «суглинке» менее 2 %, что несколько ниже, чем содержание кальцита по данным рентгеновского анализа.

Содержание *органического вещества* составляет 2,3 % в «юрской глине» и 0,5 % в «аллювиальном суглинке». При этом органическое вещество в «юрской глине» преобразовано в ходе диагенеза и, вероятно, менее доступно для разложения микроорганизмами, чем неизмененное органическое вещество природного происхождения в «аллювиальном суглинке».

Таблица 13. Минеральный состав изученных образцов (%)

Минералы	Образцы	
	глина J ₃ ox	суглинок aQ _{III}
кварц	37	61
микроклин	4	10
альбит	4	8
кальцит	13	2
доломит	1	3
гипс	3	0
пирит	4	0
каолинит	1	1
хлорит	1	1
иллит	7	3
И-С (И>С)*	20	8
смектиты	6	4

Примечание: И-С – смешанослойные иллит-смектит.

Гранулометрический и микроагрегатный составы для исходных образцов грунтов представлены в таблицах в приложении 4. Гистограммы распределения частиц по стандартным фракциям приведены на рис. 23. По данным гранулометрического пипеточного анализа в составе «юрской глины» содержится 22 % глинистых частиц, в «аллювиальном суглинке» – 6 %, пылеватых частиц 33 % для глины и 16 % для суглинка, песчаных частиц 45 % для глины и 78 % для суглинка.

Коэффициент агрегированности частиц <0,005 мм для суглинка равен 2,75, а для глины – 8,7, что свидетельствует о наличии смешанных коагуляционно-цементационных структурных связей в микроагрегатах [Горькова, 1975]. В «юрской глине» все частицы

меньше 1 мкм агрегированы, пылеватые фракции содержатся в количестве 43 %, а песчаные фракции в количестве 57 %. Наибольшее количество агрегатов содержится во фракциях крупной пыли (0,01-0,05 мм) и мелкого песка (0,1-0,25 мм). В «аллювиальном суглинке» содержится 2 % частиц глинистого размера, 39 % частиц пылеватого размера и 59 % агрегатов и зерен песчаного размера, преобладают агрегаты мелко- и тонкопесчаных фракций.

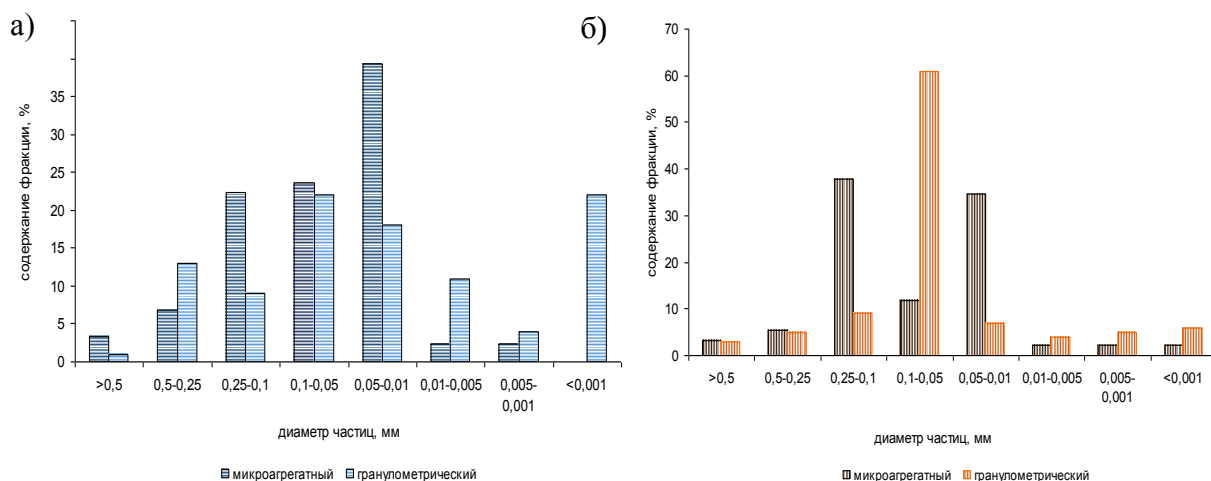


Рис. 23. Гистограммы распределения частиц по размерам по данным гранулометрического и микроагрегатного анализов для юрской глины J_{3ox} (а) и аллювиального суглинка аQIII (б)

Плотность частиц «юрской глины» - 2,60 г/см³, «аллювиального суглинка» - 2,62 г/см³. Невысокие значения плотности твердой фазы объясняются присутствием в грунтах органического вещества, водорастворимых солей, минералов с низкой плотностью (кварц, гипс, каолинит).

Влажность нижнего предела *пластичности* «глины» составляет 31 %, «суглинка» – 12 %, а влажность верхнего предела пластичности «глины» составляет 50 %, «суглинка» – 20 %. Максимальная молекулярная влагоемкость глины – 22 %, суглинка – 10 %. По числу пластичности и содержанию песчаных частиц грунты классифицируются как глина легкая пылеватая и суглинок легкий пылеватый в соответствии с ГОСТ 25100-2011. Оба грунта имеют твердую консистенцию [ГОСТ 25100-2011].

3.1.3. Характеристика природных глинистых грунтов основания земляных плотин Камской ГЭС

Образцы природных глинистых грунтов были отобраны из основания земляных плотин Камской ГЭС в г. Перми в 2011 г. (табл. 14). Они залегают непосредственно под толщей намывных грунтов тела русловой и пойменной плотин электростанции, то есть, находятся под существенной техногенной нагрузкой.

Минеральный состав. По данным рентгеноструктурного анализа, в минеральном составе грунтов преобладает кварц, полевые шпаты; глинистые минералы представлены смектитами, иллитом, в меньшей степени – хлоритом и каолинитом. Сведения о соотношении основных глинистых минералов, определенных по методу полуколичественного анализа в глинистой фракции представлены в табл. 15. В составе суглинка легкого песчанистого (образец 2) присутствует значительное количество неупорядоченных смешанослойных минералов иллит-смектитового состава. Дифрактограммы минерального состава исследованных образцов приведены в приложении 3.

Таблица 14. Журнал образцов аллювиальных грунтов основания земляных плотин Камской ГЭС

№	Место отбора	Индекс	Глубина отбора, м	Название по ГОСТ 25100-2011
1	г. Пермь, пойменная плотина Камской ГЭС, скв. 2 (материалы ЕНИ ПГУ)	aQ _{III-IV}	9,3-9,6	Суглинок тяжелый пылеватый мягкопластичный
2	г. Пермь, русловая плотина Камской ГЭС, скв. 1 (материалы ЕНИ ПГУ)	aQ _{III-IV}	8,0-8,3	Суглинок легкий песчанистый тугопластичный
3	г. Пермь, пойменная плотина Камской ГЭС, скв. 3 (материалы ЕНИ ПГУ)	aQ _{III-IV}	6,5-6,8	Суглинок легкий песчанистый мягкопластичный

По данным термического анализа валовых проб образцов грунтов в их составе присутствует гипс (около 3 %). В составе суглинка тяжелого пылеватого значительное содержание кальцита (8 %) и гидрослюд. В остальных грунтах содержание карбонатов не существенно (приложение 2).

Таблица 15. Соотношение содержания глинистых минералов в исследованных образцах грунтов основания Камской ГЭС

Образец (глубина отбора, м)	Содержание глинистых минералов, %		
	сметит	иллит	каолинит + хлорит
Суглинок тяжелый пылеватый (9,3-9,6)	50	27	22
Суглинок легкий песчанистый (8,0-8,3)	36	48	16
Суглинок легкий песчанистый (6,5-6,8)	61	24	14

В *гранулометрическом составе* тяжелого суглинка (обр. 1) преобладают частицы крупнопылевой фракции. В легком суглинке (обр. 2) содержится примерно одинаковое количество частиц средне-, тонкопесчаной и крупнопылевой фракций. В легком суглинке (обр. 3) преобладает фракция среднего песка. Все изученные грунты являются неоднородными.

По результатам *микроагрегатного состава* во всех суглинках существенно содержание частиц среднепылевой фракции. Коэффициенты агрегированности фракций <0,005 мм в тяжелом суглинке (обр. 1) близки к 1, значит, структурные связи в этом грунте слабые. В легких суглинках (обр. 2-3) эти коэффициенты составляют около 2-3, следовательно, можно говорить о наличии смешанных коагуляционно-цементационных структурных связей в микроагрегатах [Горькова, 1975].

Грунт 1 представлен суглинком тяжелым пылевым мягкопластичным с примесью органических веществ. Образец отобран из скважины 2 (пойменная плотина) в интервале глубин 9,3-9,6 м. Естественная влажность 23 %. После насыщения водой имел влажность 30 %, нижний предел пластичности 18 %, верхний – 27 %. Плотность грунта 1,96 г/см³, плотность скелета 1,51 г/см³. Коэффициент пористости 0,8. Содержание органических веществ составляет 0,06 %. По результатам сдвиговых испытаний в водонасыщенном состоянии грунты обладают углом внутреннего трения 11°, сцеплением 15 кПа. По данным компрессионных испытаний модуль общей деформации грунта в интервале нагрузок 0,1-0,2 МПа составляет 5,1 МПа (приложение 5).

Грунт 2 представлен суглинком легким песчанистым тугопластичным. Образец отобран из скважины 1 (русловая плотина) в интервале глубин 8,0-8,3 м. Естественная влажность 18 %. После насыщения водой имел влажность 26 %, нижний предел пластичности 15 %, верхний – 24 %. Плотность грунта 2,07 г/см³, плотность скелета 1,60 г/см³. Коэффициент пористости 0,65. По результатам сдвиговых испытаний в водонасыщенном состоянии грунты обладают углом внутреннего трения 17°, сцеплением 44

кПа. По данным компрессионных испытаний модуль общей деформации грунта в интервале нагрузок 0,1-0,2 МПа составляет 2,8 МПа (приложение 5).

Грунт 3 представлен суглинком легким песчанистым мягкопластичным. Образец отобран из скважины 3 (пойменная плотина) в интервале глубин 6,5-6,8 м. Естественная влажность 21 %. После насыщения водой имел влажность 26 %, нижний предел пластичности 14 %, верхний – 24 %. Плотность грунта 2,03 г/см³, плотность скелета 1,60 г/см³. Коэффициент пористости 0,69. По результатам сдвиговых испытаний в водонасыщенном состоянии грунты обладают углом внутреннего трения 18⁰, сцеплением 12 кПа. По данным компрессионных испытаний модуль общей деформации грунта в интервале нагрузок 0,1-0,2 МПа составляет 2,2 МПа (приложение 5).

3.1.4. Характеристика техногенных грунтов

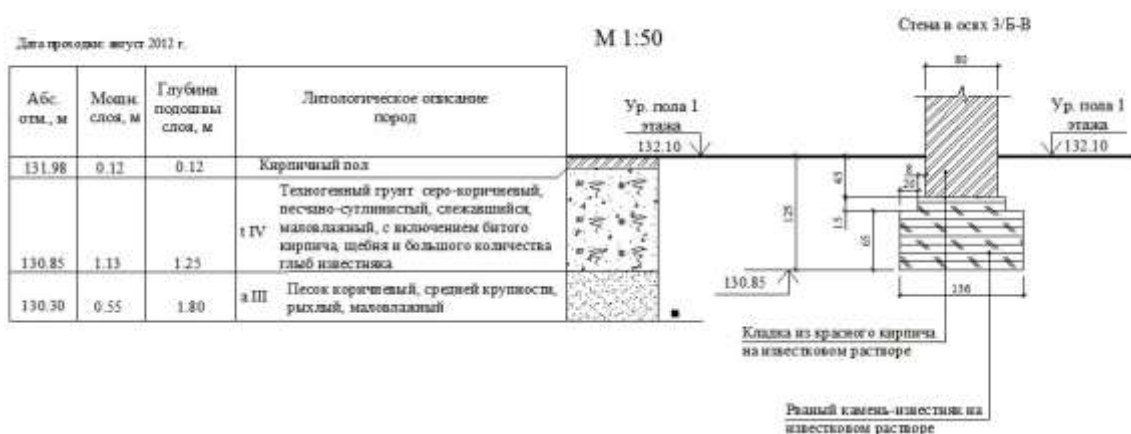
В настоящей работе изучено 3 образца техногенных грунтов, отобранных на территории г. Москвы (табл. 16).

Таблица 16. Журнал образцов техногенных грунтов

№	Место отбора	Индекс	Глубина отбора, м	Описание и название по ГОСТ 25100-2011
1	г. Москва, шурф у фундамента колокольни Новодевичьего монастыря (ООО «СК КРЕАЛ», 2012)	tQ _{IV}	0,4-0,5	Песок пылеватый с прослоями суглинков и супесей, с включением битого кирпича, осколков посуды, корней растений, щебня и обломков известняка, с примесью органического вещества
2	г. Москва, площадка проектируемого строительства здания филиала МХАТ им. А. П. Чехова на пересечении пр-та Андропова с Нагатинской ул. у ст. м. «Коломенская», шурф №2 (ООО «СК КРЕАЛ», 2013)	tQ _{IV}	2,0-2,2	Суглинок тугопластичный с обломками различных строительных материалов и растительными остатками
3	Площадка строительства ТЦ «Гудзон» по адресу: г. Москва, ЮАО, Каширское ш., вл. 12, скв. 1 (ООО «Карбон», 2013)	tQ _{IV}	4,0-4,1	Суглинок полутвердый с обломками кирпича, бетона, битума

Образец техногенного песчаного грунта отобран в шурфе у фундамента колокольни Новодевичьего монастыря (рис. 24). Грунт представляет собой песок пылеватый с прослоями суглинков и супесей, с включением битого кирпича, осколков посуды, корней растений, щебня и обломков известняка, с примесью органического вещества (далее в тексте – *песок пылеватый («Новодевичий»)*).

а)



б)



Рис. 24. Разрез (а) и фотография (б) шурфа у колокольни Новодевичьего монастыря
[Отчет ООО «СК КРЕАЛ», 2012]

По классификации А.П. Афонина и др. [1990], грунт относится к классу техногенно образованных, подгруппе насыпных, типу грунтов культурного слоя. Культурный слой –

толща грунтов, содержащая артефакты, следы человеческой деятельности [Огородникова, Николаева, 2004]. Новодевичий монастырь был основан в середине XVI века, изначально строился из дерева, в Смутное время был сожжен и отстроен из камня в конце XVII века. С тех пор несколько раз реконструировался и достраивался [Новодевичий Богородице-Смоленский монастырь, 2006]. Таким образом, формирование техногенного грунта в основании колокольни монастыря происходило в течение 500 лет инженерно-хозяйственной деятельности человека. Грунт содержит исторические артефакты (осколки посуды) и включения строительных материалов различных эпох, следовательно, разной степени разложения и преобразования.

Участок отбора образца техногенного суглинка у ст. м. «Коломенская» характеризуется значительной мощностью техногенных грунтов – до 10 м [Отчет ООО «СК КРЕАЛ», 2012]. В момент отбора образца участок был незастроенным, на поверхности развито травяное покрытие (рис. 25). Образец отобран с глубин 2,0-2,2 м и представлен суглинком тугопластичным с обломками различных строительных материалов и растительными остатками (*далее в тексте – суглинок («Коломенская»)*). Высокие мощности техногенных грунтов и близость площадки к станции метро позволяют предположить, что толща была сформирована в результате складирования отвалов при проходке станций и трассы Замоскворецкой линии метрополитена. Участок линии от ст. «Автозаводская» до ст. «Каховская» был введен в эксплуатацию в 1969 г. [mosmetro.ru, 09.05.2015]. Таким образом, возраст насыпи составляет около 45 лет. По классификации А.П. Афонаина и др. [1990] образец следует отнести к классу техногенно переотложенных, подгруппе насыпных. Возможно, на формирование состава, строения и свойств грунтов оказало влияние возведение близлежащих сооружений, что объясняет присутствие в толще грунтов обломков строительных материалов. Отсутствие современной застройки обуславливает протекание процессов почвообразования по толще насыпных грунтов.

Участок отбора образца техногенного суглинка на площадке строительства ТЦ «Гудзон» на Каширском шоссе, 12-14, также характеризуется значительной мощностью техногенных грунтов – до 12-13 м. При этом по скважинам на площадке строительства мощность и состав техногенных грунтов существенно варьируются [Отчет ООО «Карбон», 2013]. Верхние метры разреза техногенных грунтов сложены песчаными насыпными грунтами с обломками строительных материалов. Большая часть разреза – суглинками с обломками кирпича, бетона, асфальтовых покрытий, битума. Образец такого состава был отобран для исследований с глубины 4,0-4,2 м (*далее в тексте – суглинок («Каширская»)*). Толща техногенных грунтов подстилается озерно-ледниковыми суглинками и супесями. Площадка расположена непосредственно у Нахимовского тоннеля Третьего транспортного кольца,

поэтому высокие и неравномерные мощности техногенных отложений возможно объяснить складированием отработанных грунтов при строительстве тоннеля. Подтверждает предположение и суглинистый состав насыпи, поскольку выемке подвергались озерно-ледниковые глинистые отложения. Тоннель построен в 2002 г [мосинж.рф/page/69/122, 09.05.2015], следовательно, возраст насыпи оценивается в 13-15 лет. По классификации А.П. Афонина и др. [1990] грунт следует отнести к классу техногенно переотложенных, подгруппе насыпных.



Рис. 25 Фотография вскрытого шурфа на участке «Коломенская»
(фото О.И. Горшколепова, 2013)

Таким образом, в работе изучены три разновидности техногенных грунтов. Формирование пылеватого песка («Новодевичий») происходило в течение 500 лет, грунт содержит обломки материалов различных эпох разной степени разложения. Суглинок «Коломенская», вероятно, сформирован из насыпи при проходке линий и станций метрополитена и под влиянием застройки прилегающих территорий, возраст грунта составляет 45-50 лет. В настоящее время участок не застроен, по толще техногенных отложений развиваются почвы. Суглинок «Каширская», возможно, сформирован из насыпи при проходке Нахимовского тоннеля ТТК, является наиболее «молодым» (возраст насыпи 13-15 лет) и наименее «преобразованным» грунтом.

Минеральный состав. Основным породообразующим минералом всех исследуемых образцов является кварц, присутствуют полевые шпаты и карбонаты, из глинистых минералов преобладают неупорядоченные смешанослойные иллит-сметитовые минералы с

преобладанием иллитовых пакетов, а также иллит и каолинит. В виде незначительных примесей содержатся гетит, гипс и карбонаты, которые являются, вероятно, новообразованными минералами в техногенной толще.

С помощью кальциметра определено валовое содержание карбонатов. В изученных грунтах оно составляет 1,8-2,4 % по массе (приложение 2), причем наименьшее значение характерно для техногенного пылеватого песка («Новодевичий»), наибольшее – для тугопластичного суглинка («Коломенская»). Карбонаты представляют собой в основном обломки строительных материалов.

Пылеватый песок («Новодевичий») был исследован под бинокулярным микроскопом. При валовом рассмотрении грунт состоял из светлой кварцевой основной массы и темноцветных включений (рис. 26). Все зерна покрыты бурой глинистой рубашкой, много мелкой глинистой «крошки» - агрегатов.

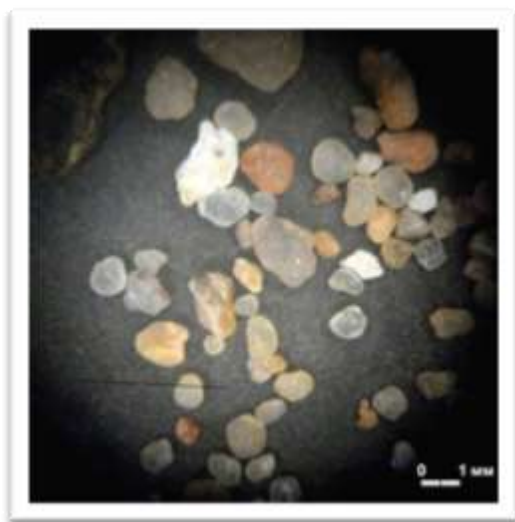


Рис. 26. Фотография пылеватого техногенного песка под бинокуляр (фракция $d > 0,5$ мм)

Фракция диаметром $>0,5$ мм состоит в основном из кварцевых зерен, дифференцированных по размеру и цвету: прозрачных, мутных, розовых, желтых, преимущественно окатанных. Окатанность зерен обусловлена тем, что в формировании техногенных грунтов участвовали местные (подстилающие) перекопанные аллювиальные пески. Нередко встречаются угловатые минералы белого цвета - вероятно, карбонаты, т.к. при взаимодействии с HCl происходит бурная реакция с выделением газа. Присутствуют также единичные непрозрачные светлые минералы, по-видимому, полевые шпаты. Включения темноцветных минералов сильно выветрелые (виднеется красная корочка), имеют неровную поверхность, яркий блеск на гранях, вероятно, являются обломками породы магматического происхождения.

Химический состав. По результатам анализа водной вытяжки суглинков («Коломенская») следует считать средней степени засоления, остальные грунты – слабой

степени засоления [Огородникова, Комиссарова, 1990]. Для образцов характерны значения pH водной вытяжки с 7,7 до 8,0 (приложение 2), что свидетельствует о слабощелочной реакции, обусловленной, вероятно, присутствием карбонатов, в том числе, водорастворимых. Следует отметить, что в водной вытяжке из пылеватого песка («Новодевичий») обнаружено незначительное присутствие органических кислот.

Для всех образцов характерно содержание органических веществ в количестве 0,3-0,7 %. Следует отметить разное происхождение и, следовательно, доступность этих органических веществ для микроорганизмов. Органические включения в пылеватом песке («Новодевичий»), вероятно, связаны с инженерно-хозяйственной деятельностью человека (ведение хозяйства на территории монастыря) и длительным разложением строительных материалов. Условно его происхождение следует считать природно-антропогенным. Подпочвенное залегание образца суглинка («Коломенская») на незастроенной территории и значительный (около 45 лет) возраст насыпи позволяют предположить, что органические вещества здесь представлены растительными остатками и гумусовыми веществами. В суглинке («Каширская») из-за глубокого залегания образца и небольшом возрасте грунта органические вещества, скорее всего, имеют преимущественно антропогенное происхождение и оказались погребенными в толще при формировании насыпи. Таким образом, по степени доступности органических веществ для разложения микроорганизмов изученные грунты стоит расположить в ряд «суглинок («Коломенская») – пылеватый песок («Новодевичий») – суглинок («Каширская»)».

Гранулометрический состав. Результаты определения гранулометрического состава образцов грунтов даны в таблице в приложении 4. Пылеватый песок («Новодевичий») содержит 83 % песчаных, 12 % пылеватых и 5 % глинистых частиц. Фракции тонкого, мелкого и среднего песка присутствуют примерно в одинаковых количествах, из них последняя незначительно преобладает (26 %). Грунт неоднороден. Несмотря на существенное содержание пылегато-глинистых частиц, грунт не обладает пластичностью, поэтому, по ГОСТ 25100-2011 является песком. Суглинок («Коломенская») содержит 73 % песчаных, 19 % пылеватых и 8 % глинистых частиц. Фракции тонкого и среднего песка присутствуют примерно в одинаковых количествах. Преобладает фракция среднего песка (27 %). Название грунта по ГОСТ 25100-2011 с учетом числа пластичности ($I_p = 8$) – суглинок легкий песчанистый. Суглинок («Каширская») содержит 78 % песчаных, 14 % пылеватых и 8 % глинистых частиц. Наименьшее количество фракции тонкого песка (11 %), мелкий и средний песок содержатся примерно в одинаковых количествах. По ГОСТ 25100-2011 грунт – суглинок легкий песчанистый.

Характерной особенностью исследуемых грунтов является высокое содержание песчаных частиц (73-83 %) при наличии высокодисперсного глинистого материала (5-8 %), который наряду с пылеватыми частицами, присутствием органического вещества, придает грунту способность проявлять пластичные свойства. Кроме того, отсутствие сортировки и исключительная неоднородность (d_{60}/d_{10} 37-125) также характерны для техногенных грунтов.

Микроагрегатный состав. Результаты его определения для исходных образцов даны в таблицах в приложении 4. Пылеватый песок («Новодевичий») характеризуется преобладанием песчаных фракций, особенно 1-0,25 мм. Коэффициент агрегированности частиц < 0,005 мм равен 1,3, что свидетельствует о слабых структурных связях в микроагрегатах [Горькова, 1975]. Значительно содержание агрегатов крупнопылеватого размера (0,05-0,01 мм).

Суглинок («Коломенская») характеризуется преобладанием фракций 0,1-0,05 мм. Коэффициент агрегированности частиц < 0,005 мм равен 1,8, что свидетельствует о слабых структурных связях в микроагрегатах [Горькова, 1975].

Суглинок («Каширская») характеризуется преобладанием песчаных фракций (1-0,05 мм), на пылеватые приходится 14 %, глинистые 7 %. Как и в предыдущем случае, гранулометрический и микроагрегатные составы близки между собой. K_a примерно равен 1.

На основании приведенных данных можно заключить, что исследуемые грунты имеют близкие распределения частиц по размерам по данным гранулометрического и микроагрегатного анализов. Наиболее дисперсные глинистые и мелкопылеватые частицы не образуют собственных микроагрегатов. Вероятно, тонкие частицы могут формировать подобие «рубашек» на более крупных, песчаных или вместе с последними образовывать крупные агрегаты, выполняя роль глинистого «цемента». Связи между агрегатами в техногенных грунтах слабые и неводостойкие.

3.1.5. Характеристика модельных глинистых грунтов

В качестве модельных глинистых грунтов использовались бентонитовые глины и каолинит (табл. 17). Грунты представляют собой мономинеральные смектиты и каолиниты соответственно, с содержанием примесей преимущественно кварца в количестве менее 5 % (приложение 3). В связи с малым количеством грунтов и недоступностью архивных данных, строение и свойства этих образцов в настоящей работе не рассматриваются.

Таблица 17. Журнал изученных модельных мономинеральных глинистых грунтов

№	Место отбора	Индекс	Название по ГОСТ 25100-2011
1	Село Глуховцы, Полтавская обл., Украина (коллекция кафедры инженерной и экологической геологии)	P ₂	Глина каолиновая
2	Казахстан. Таганское месторождение, Западный карьер, горизонт 14 (материалы Покидько Б.В., МИТХТ имени М.В. Ломоносова)	P ₂ tg	Глина бентонитовая

3.2. Характеристика микробных комплексов изученных образцов грунтов

Биомасса микроорганизмов исходных грунтов определялась методом прямого подсчета с помощью люминесцентной микроскопии. Рассматривалось общее количество клеток бактерий, длина мицелия грибов и актиномицетов. Результаты определения приведены в приложении 6 и на рис. 27 и 28.

В 1 г *природных песчаных грунтов* содержится $2,7-3,3 \times 10^8$ клеток бактерий (биомасса 0,055-0,072 мг/г грунта) и 0,2-0,6 мкм грибов (биомасса 0,01-0,02 мг/г грунта). Актиномицеты в образцах не обнаружены. Общая биомасса микробного комплекса песчаных грунтов составляет 0,075-0,092 мг/г. Стоит отметить, что при просмотре препаратов отмечалось большое количество спор грибов и бактерий, которые не учитывались при подсчете биомассы, так как не являются живыми микроорганизмами. Тем не менее, при активизации микробного комплекса внесением питательного раствора, следует ожидать развитие живых клеток из этих спор.

В аллювиальном суглинке (группа *природных глинистых грунтов*, не измененных техногенным воздействием) содержится 0,206 мг биомассы микроорганизмов на 1 г грунта, из них 0,158 мг – клетки бактерий ($7,9 \times 10^8$ клеток на 1 г грунта), 0,003 мг – актиномицеты (0,5 мкм/г) и 0,045 мг – грибной мицелий (1,5 мкм/г). Исходный микробный комплекс «юрской глины» содержит 0,068 мг бактерий на 1 г грунта ($3,4 \times 10^8$ клеток на 1 г), 0,002 мг актиномицетов на 1 г грунта (0,2 мкм) и 0,01 мг грибов (длина мицелия 0,2 мкм на 1 г грунта); общая биомасса составляет 0,078 мг/г.

Среди *техногенных грунтов* наибольшая биомасса характерна для пылеватого песка («Новодевичий») – 0,218 мг/г, из них 0,170 мг – клетки бактерий ($8,4 \times 10^8$ клеток на 1 г), 0,003 мг/г актиномицетов (0,5 мкм/г) и 0,045 мг/г грибов (1,5 мкм/г). В суглинке («Коломенская») биомасса составляет 0,144 мг/г ($5,5 \times 10^8$ клеток бактерий и 0,110 мг/г; 0,9 мкм/г и 0,004 мг/г актиномицетов и 1,0 мкм/г и 0,030 мг/г грибов). В суглинке («Каширская») общая биомасса составляет 0,126 мг/г грунта, из них бактерий – 0,100 мг/г, актиномицетов – 0,002 мг/г, грибов – 0,024 мг/г.

Наименьшие показатели биомассы обнаружены в *модельных мономинеральных глинах*. В каолиновой глине содержится лишь $1,5 \times 10^8$ клеток бактерий, грибы и актиномицеты не обнаружены (биомасса 0,031 мг/г). В бентонитовой глине содержится $1,8 \times 10^8$ клеток бактерий (биомасса 0,036 мг/г грунта), 0,4 мкм/г актиномицетов (0,002 мг/г), грибы не обнаружены. Общая биомасса составляет 0,038 мг/г.

Наибольшая биомасса характерна для приповерхностных грунтов (техногенный пылеватый песок «Новодевичий» и природный аллювиальный суглинок). В техногенных грунтах, отобранных с глубины 2-4 м, отмечено значительно меньшее содержание грибного мицелия, а общая биомасса в 1,5-2 раза ниже, чем у вышележащего техногенного песка («Новодевичий»). В природных флювиогляциальных и меловых песках не выявлен мицелий актиномицетов; общая биомасса в 3 раза меньше, чем у приповерхностных образцов. В «юрской глине», несмотря на значительную глубину залегания, отмечено присутствие всех разновидностей микроорганизмов, общая биомасса больше, чем у вышележащих песков. Наименьшие показатели численности микроорганизмов характерны для мономинеральных глинистых грунтов. В них не обнаружен мицелий грибов и актиномицетов.

Отмечается тенденция уменьшения общей численности микроорганизмов с глубиной на первых 5 м разреза по всей выборке образцов (рис. 27). Причем наиболее интенсивно биомасса уменьшается на первых см разреза – в образце техногенного суглинка «Коломенская» биомасса в 2 раза меньше, чем у отобранных с глубин 0,4-0,5 м техногенного песка «Новодевичий» и природного аллювиального суглинка. В интервале глубин 2-6 м уменьшение биомассы менее интенсивно. В более глубоких образцах биомасса остается практически одинаковой. Следует также обратить внимание на тенденцию постепенного уменьшения биомассы грибов с глубиной (рис. 28).

Прослеживается неплохая корреляция между биомассой микроорганизмов и содержанием органического вещества в грунтах (рис. 29). Исключение составляет образец «юрской глины», в которой при существенном содержании органического вещества (2,3 %) биомасса микробного комплекса менее 0,1 мг/г грунта. Это можно объяснить глубоким

залеганием грунта и преобразованиями органического вещества, произошедшими в ходе диагенеза.

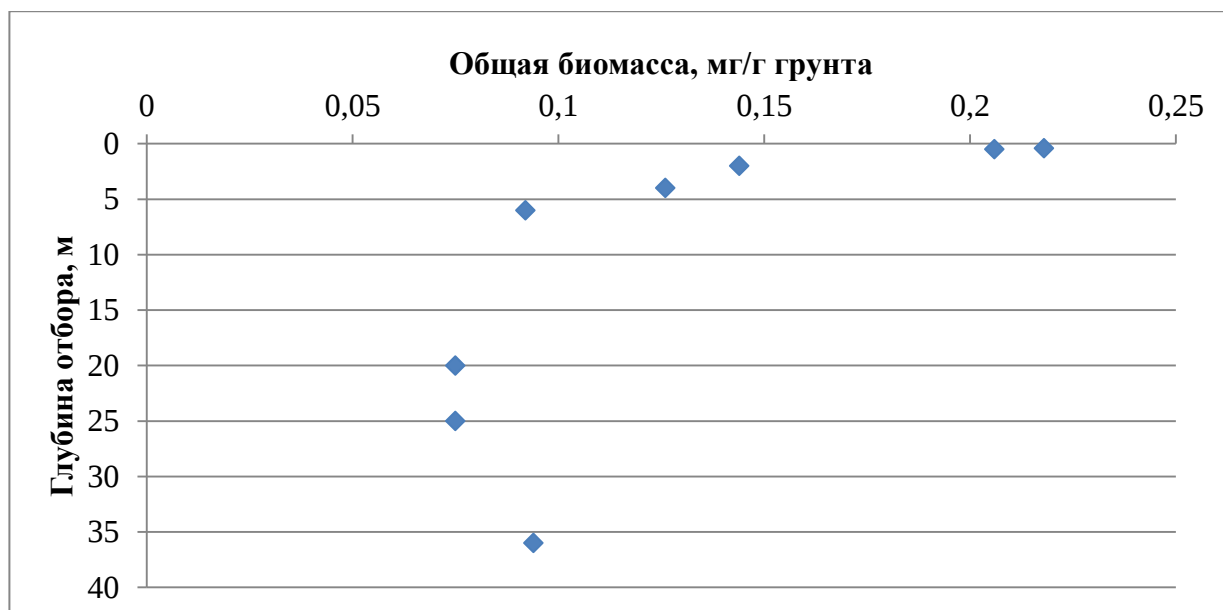


Рис. 27. Изменение общей биомассы природных микробных комплексов образцов с глубиной (по всей выборке образцов, отобранных из разных мест)

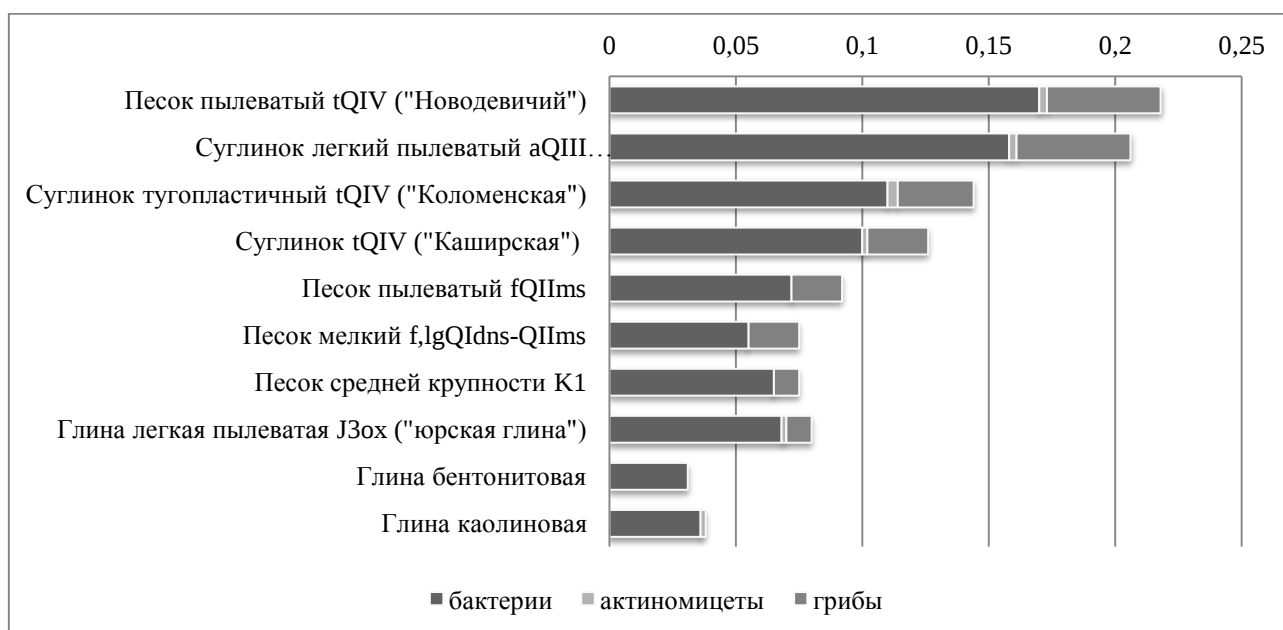


Рис. 28. Распределение биомассы по типам микроорганизмов в изученных грунтах

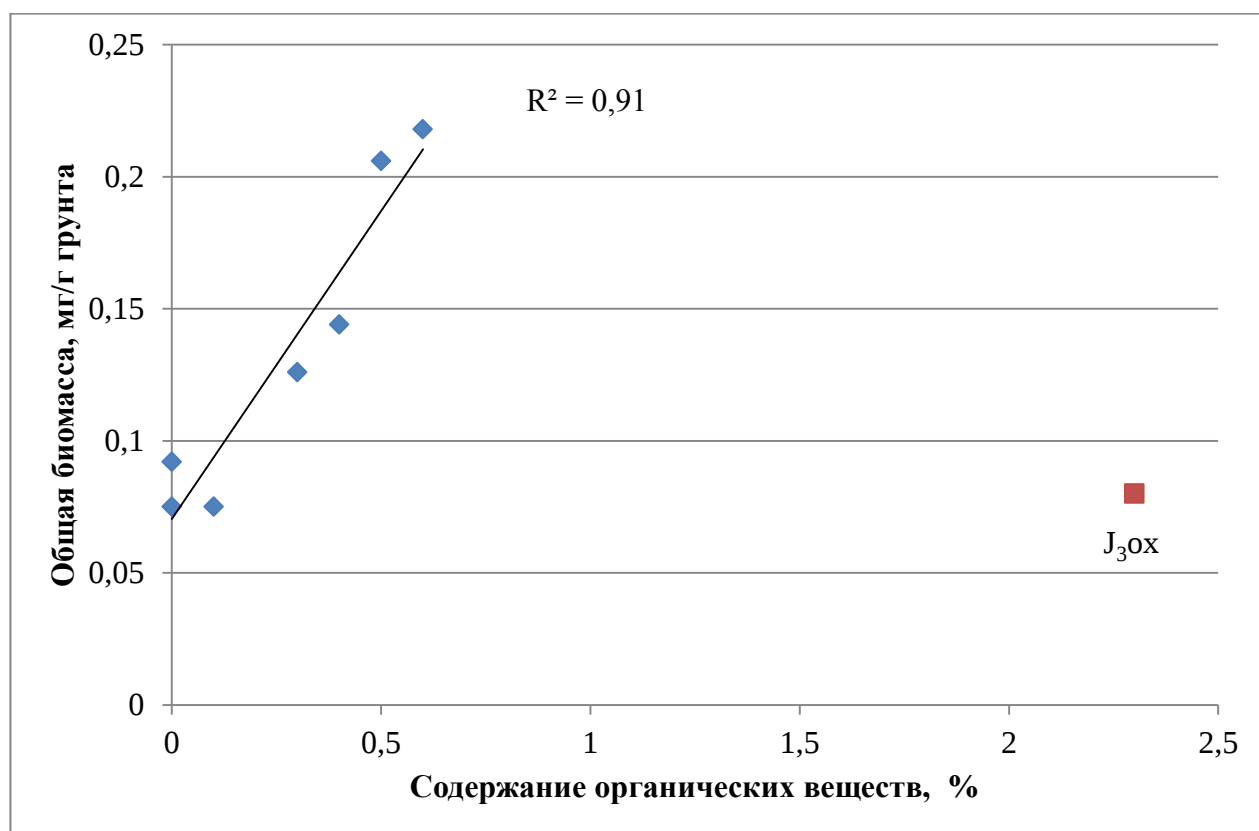


Рис. 29. Зависимость биомассы микробного комплекса от процентного содержания органического вещества в грунтах

Ю.В. Кутейниковой и Н.А. Манучаровой на факультете Почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова был изучен состав природного микробного комплекса техногенного пылеватого песка («Новодевичий»). Было установлено, что доля метаболически активных клеток в грунте составляет 50 % от их общего количества. При этом примененные зонды позволили определить, что около 40 % клеток соответствуют домену *Eubacteria*, 12 % - *Archaea*. Около половины всех клеток диагностировать не удалось (рис. 30).

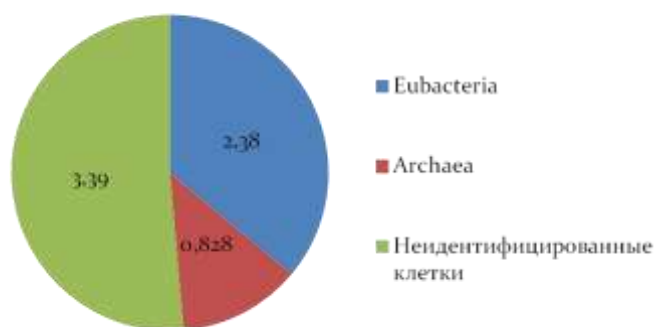


Рис. 30. Структура природного микробного комплекса техногенного пылеватого песка («Новодевичий») (10^8 кл/г грунта) (данные Ю.В. Кутейниковой и Н.А. Манучаровой)

Характеристика микробного комплекса *природных грунтов основания плотин Камской ГЭС* проведено на основании анализа накопительной культуры микроорганизмов, полученной из образца грунта (см. главу 2). Анализ выполнен на Биологическом факультете МГУ Н.Н. Куненковой.

После выделения из образцов грунта культуры гетеротрофных микроорганизмов полученный «раствор» подвергался анализу с целью выделения и изучения функциональных групп микроорганизмов. «Раствор» представляет собой мутную жидкость со специфическим запахом. Плотность жидкости составляет $1,12 \text{ г/см}^3$, pH среды 5,6, Eh 106 мВ.

По результатам анализов в «растворе» было установлено наличие бактерий-броидильщиков, денитрификаторов и нитрификаторов. Их количественное содержание приведено в табл. 19.

Органолептический анализ позволяет предположить наличие в накопительной культуре сульфатредукторов из-за характерного запаха. Однако использованными методами выделить культуры сульфатредукторов не удалось. Сульфатредукция хорошо идет совместно с активностью броидильщиков. Но поскольку все сульфатредукторы - строгие анаэробы, выделение биомассы в аэробных условиях, с одной стороны, остановило процессы брожения, с другой, угнетающе действовало на самих сульфатредукторов. Кроме того, в неблагоприятных условиях, когда сульфат истощается, а органики много, сульфатредукторы переходят на сбраживание лактата и пирувата, образуя ацетат и водород. Перечисленные факторы могут быть причиной того, что из исследуемой системы описанными методами выделить сульфатредукторов с сохранением активности и жизнеспособности было невозможно. Шансы же обнаружить эти микроорганизмы в исходных образцах глины, по мнению микробиолога Н.Н. Куненковой, достаточно велики.

Таблица 19. Количественное содержание различных функциональных групп микроорганизмов в накопительной культуре (данные Н.Н. Куненковой)

Функциональная группа	Численность, кл/мл
Бродильщики	$3,6 \times 10^5$
Денитрификаторы	$3,0 \times 10^5$
Нитрификаторы	$2,3 \times 10^2$
Общее микробное число	$4,9 \times 10^6$

Небольшое количество нитрификаторов в грунтах может быть результатом хранения пробы. Нитрификаторы в основном аэробные микроорганизмы, а процесс нитрификации

ведется при доступе кислорода. Хранение «раствора» микроорганизмов происходило в пластиковой емкости, при открытии крышки в нее проникал кислород, поэтому в верхнем слое жидкости вполне могли создаться аэробные условия.

По результатам анализа снимков, полученных при микроскопии, было установлено наличие бактерий родов *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*.

На рис. 31 представлены микроорганизмы в виде палочек, которые собираются парами, цепочками, встречаются одиночные клетки. Бактерии способны образовывать устойчивые эндоспores (прозрачные клетки с плотными стенками), представляют род *Bacillus* (рис. 31, б).

Бактерии рода *Bacillus* являются аэробными или факультативными анаэробами (способны существовать и в условиях отсутствия, и наличия кислорода). В качестве питательного вещества используют остатки растений и другое органическое вещество. Энергию для построения биомассы получают из окислительно-восстановительных реакций, в которых участвует молекулярный кислород. Разлагают их до простых органических веществ или неорганических соединений, попутно выделяя углекислый газ. При определенных условиях способны к нитрификации [Определитель бактерий Берджи, 1997]. Способны к сульфатредукции, окислению молекулярного водорода органических веществ [http://plant.geoman.ru, 12.05.2015].

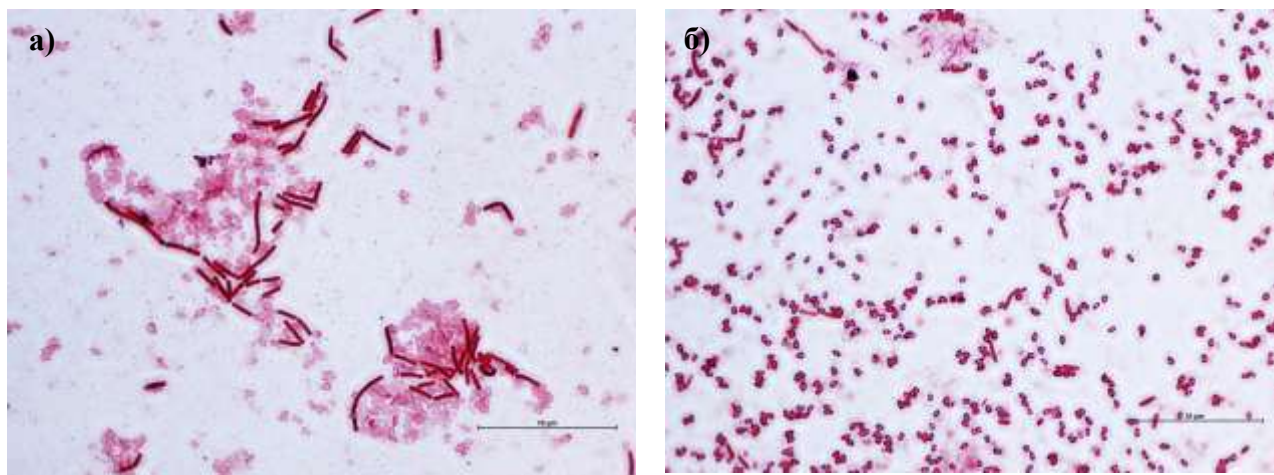


Рис. 31. Р. *Bacillus*: а) палочки, объединенные в пары и цепочки; б) эндоспores (фото Н.Н. Куненковой)

Эндоспores – клетки бактерий, находящиеся в стадии покоя. Отличаются повышенной устойчивостью к агрессивной среде, неблагоприятной для жизнедеятельности микроорганизмов. При этом эндоспores достаточно мобильны, в грунтах и почвах

переносятся с инфильтрующимися водами. При попадании эндоспор в благоприятную среду они переходят в активное состояние и быстро размножаются [Звягинцев, 1987].

На рис. 32 представлены плеiomорфные палочки, распадающиеся на кокки, при делении образуют V-образные формы – род *Rhodococcus*. Все родококки обладают характерным жизненным циклом, стадии и скорость его прохождения существенно различаются у разных представителей. У некоторых кокковидные клетки только удлиняются в процессе роста, а затем делятся бинарным делением, у других – прорастание исходных кокковидных или укороченных палочковидных клеток происходит с помощью ростовых трубок, из которых формируются более или менее ветвящиеся клетки. В дальнейшем они фрагментируются, а образовавшиеся фрагменты укорачиваются до размеров исходных клеток. Преобладающим способом разъединения клеток становится способ раскалывания, и клетки приобретают вид коротких V-образных палочек, в результате ряда последовательных бинарных делений которых образуются кокковидные клетки [Нестеренко и др., 1985].

Среди родококков выявлены штаммы, которые в качестве единственного источника углерода и энергии могут использовать такие труднометаболизируемые соединения как бензол, толуол, ксилол, п-крезол, производные бензойной кислоты, протокатехоловую, гуминовую кислоты. При этом активно выделяется углекислый газ, а сложные органические соединения разлагаются до более простых [Определитель бактерий Берджи, 1997].

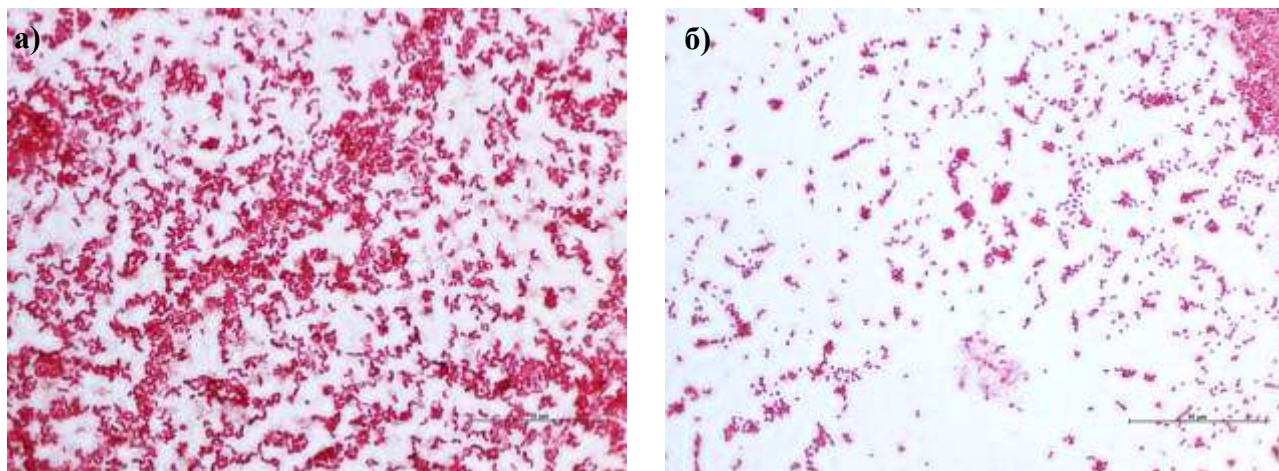


Рис. 32. Р. *Rhodococcus*. Плеiomорфные палочки (а), при делении распадающиеся на кокки (б) (фото Н.Н. Куненковой)

На рис. 33 представлены кокки, образующие тетрады или скопления неправильной формы, определенные как бактерии рода *Micrococcus*. Это неподвижные микроорганизмы, эндоспор не образуют. Могут содержать каротиноидные пигменты. Строгие аэробы, способны к нитрификации. Могут быть выделены из почвы, воздуха, морской и пресной воды, с кожи человека и животных [Kosur et al., 2006].

На рис. 34 представлены плейоморфные палочки, распадающиеся на кокки, определенные как бактерии рода *Mycobacterium*. Микобактерии – аэробы, неподвижные, грамположительные, кислото- и спиртоустойчивы, неподвижны, не образуют спор. Клетки палочковидные, прямые или слегка искривленные, со временем укорачивающиеся до кокковидных. Микобактерии обладают определенным циклом развития – прослеживается морфологическая трансформация клеток кокк-палочка-кокк. Способность использовать различные углеводороды (ароматические длинноцепочечные н-алканы, газообразные, ненасыщенные н-алканы, алканы с разветвленной цепью) настолько широко распространена среди микобактерий, что рассматривается в качестве родового признака данных бактерий [Нестеренко и др., 1985].

Микобактерии – одни из самых устойчивых к внешним воздействиям организмов. Они успешно конкурируют с другими микроорганизмами благодаря способности использовать разнообразные органические вещества и расти в широком диапазоне условий внешней среды. В процессе метаболизма выделяют углекислый газ и полимерные органические соединения (полисахариды и др.), из которых строят свою биомассу. Широко распространены в почвах, откуда легко выделяются [Hartmans et al, 2006].

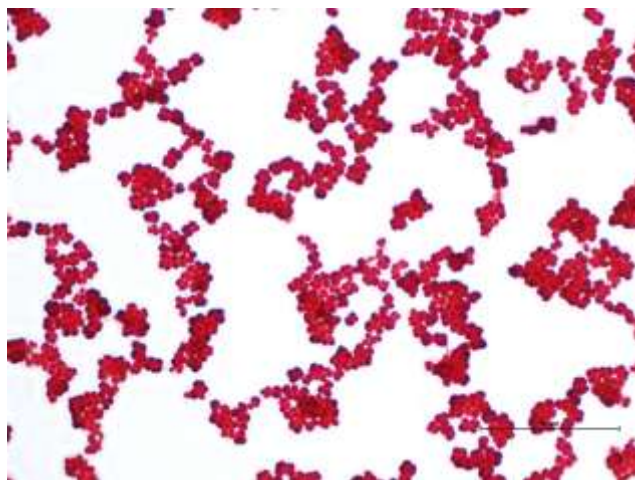


Рис. 33. Р. *Micrococcus*. Кокки, сгруппированные в тетрады (фото Н.Н. Куненковой)

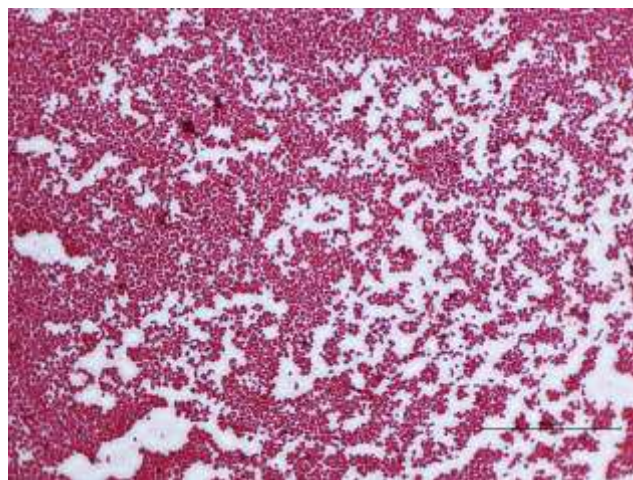


Рис. 34. Р. *Mycobacterium*. Плейоморфные палочки, распадающиеся на кокки (фото Н.Н. Куненковой)

На рис. 35 представлены одиночные слабоокрашенные палочки, определенные как бактерии рода *Pseudomonas*. Эти микроорганизмы являются как аэробами, так и анаэробами, способны к денитрификации. Способны разлагать сложные органические полимеры до более простых, некоторые могут минерализовывать их до неорганических соединений. При этом активно выделяется газ [Определитель бактерий Берджи, 1997]. Способны к сульфатредукции, окисляют сульфаты и тиосульфаты до нерастворимых

высокомолекулярных соединений [http://plant.geoman.ru, 12.05.2015].

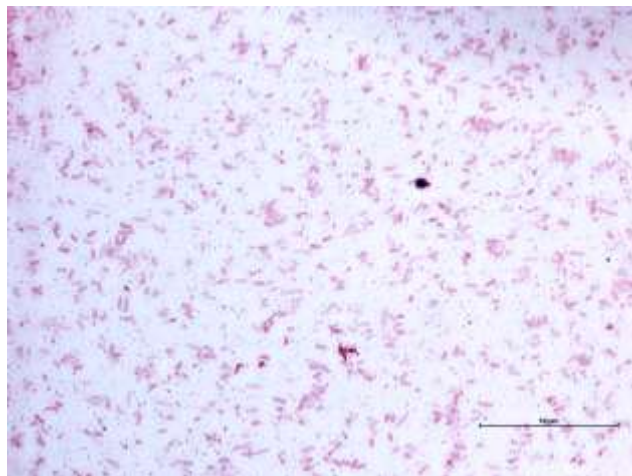


Рис. 35. *P. Pseudomonas*. Одиночные палочки (фото Н.Н. Куненковой)

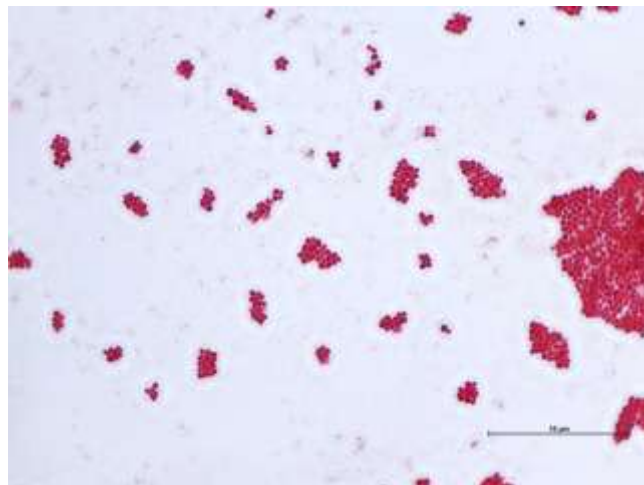


Рис. 36. *P. Arthrobacter*. Плейоморфные кокки (фото Н.Н. Куненковой)

На рис. 36 представлены крупные плейоморфные кокки, объединяющиеся в колонии, определенные как бактерии *P. Arthrobacter*. На богатых органических средах имеют четко выраженный жизненный цикл: кокки – полиморфные палочки – кокки. Бактерии рода широко распространены в природе, особенно в почвах, где могут составлять более половины от общего числа бактерий. Среди факторов, обуславливающих такое высокое содержание, следует отметить способность использовать в качестве источников углерода и энергии широкий круг органических соединений. Им присуща высокая устойчивость к высушиванию, превосходящая обнаруживаемую у других почвенных неспорообразующих бактерий, а также длительное сохранение жизнеспособности в отсутствие в среде питательных веществ [Нестеренко и др., 1985]. Некоторые представители рода способны разлагать гербициды и пестициды (2,4-дихлорфеноксиацетат, м-хлоробензоат) [Jones et al, 2006]. Способны к нитрификации – в присутствии органических субстратов окисляют аммоний с образованием гидроксиламина и далее нитритов и нитратов. Кроме того, может образовываться гидроксамовая кислота. У ряда бактерий выявлена способность осуществлять нитрификацию органических азотсодержащих соединений: амидов, аминов, оксимов, гидро-ксаматов, нитросоединений и др. [http://plant.geoman.ru, 12.05.2015]. В процессе жизнедеятельности многие бактерии этого рода активно образуют слизь, содержащую большое количество полисахаридов, агрессивных к различным минералам [Звягинцев и др., 2005].

ГЛАВА 4. ТРАНСФОРМАЦИЯ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА ГРУНТОВ В ХОДЕ СУКЦЕССИИ

Привнесение в грунт раствора глюкозы вызывает активизацию микробного комплекса и прирост биомассы. После потребления глюкозы наблюдается деградация микробного сообщества из-за нехватки питательных веществ. Кинетика процесса является схожей во всех изученных грунтах, однако, особенности их состава и строения и состояния определяют специфику сукцессии в каждом образце.

4.1. Изменение активности дыхания микроорганизмов (эмиссии углекислого газа) в ходе сукцессии

Максимум эмиссии CO_2 во всех грунтах, кроме «юрской глины», наблюдается на 7е сутки после увлажнения глюкозой (рис. 37). В *природных песчаных грунтах* флювиогляциального генезиса пик активности узкий, а максимальные значения составляют 9-11 мкмоль $\text{CO}_2/\text{г}$ грунта в сутки. Для образцов *техногенного четвертичного и природного мелового песков* пик шире, активизация микробного комплекса отмечается на 3-4 сутки сукцессии, а максимальные значения на 7 сутки после увлажнения глюкозой равны 7 мкмоль $\text{CO}_2/\text{г}$ грунта в сутки. Такие отличия в кинетике эмиссии углекислого газа следует связывать с различным содержанием органического вещества и условиями залегания грунтов. В природном залегании в толще флювиогляциальных песков формируется грунтовый водоносный горизонт. При инфильтрации атмосферных осадков через зону аэрации клетки микроорганизмов попадают в грунтовые воды, но вследствие отсутствия питательных веществ переходят в неактивное состояние. Привнесение в грунты глюкозы активизирует эти клетки, но после разложения субстрата их большая часть возвращается в неактивное состояние. В природном меловом и особенно техногенном песке обнаружено некоторое содержание органических веществ. Увлажнение грунтов глюкозой увеличивает активность микроорганизмов, а эти вещества служат дополнительным источником питания [Иванов и др., 2013а; Ivanov et al., 2013].

В *техногенных грунтах* максимальные значения эмиссии CO_2 заметно ниже, чем у природных песков, при этом пики активности достаточно широкие. Прослеживается закономерность уширения пиков с ростом содержания органического вещества в грунтах и приближения грунтов к поверхности в ряду суглинков «Каширская» (0,3 % органического вещества; глубина отбора образца 4,0-4,2 м) – суглинков «Коломенская» (0,4 %; 2,0-2,2 м) – пылеватый песок «Новодевичий» (0,6 %; 0,4-0,5 м).

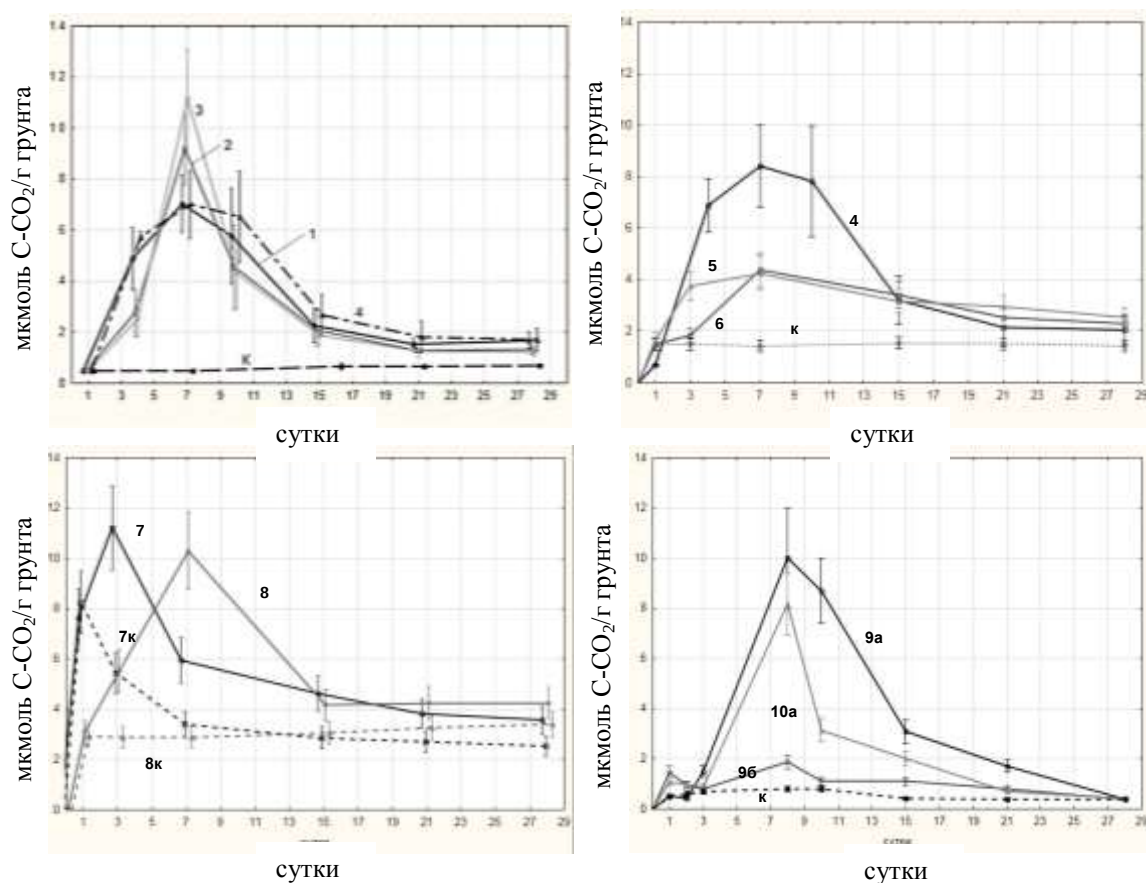


Рис. 37. Динамика эмиссии CO_2 из образцов грунтов в ходе сукцессии:

1 – песок средней крупности K_1 ; 2 – песок пылеватый fQ_{IIms} ; 3 – песок мелкий $fQ_{I-II st-dns}$; 4 – песок пылеватый tQ_{IV} («Новодевичий»); 5 – суглинок tQ_{IV} («Коломенское»); 6 – суглинок tQ_{IV} («Каширская»); 7 – глина легкая пылеватая J_{3ox} («Юрская глина»); 8 – суглинок легкий пылеватый aQ_{III} («аллювиальный суглинок»); 9а – бентонитовая глина (40 % глюкозы от сухого грунта по массе); 9б – бентонитовая глина (20 %); 10 – каолиновая глина (20 %); к – контрольные образцы (увлажнены водой)

Среди *природных глинистых грунтов* образец «аллювиального суглинка», отобранный с небольших глубин (0,4-0,5 м) и относительно богатый органическим веществом (0,5 %) имеет широкий пик активности дыхания микроорганизмов на 7 сутки сукцессии (около 10 ммоль $\text{CO}_2/\text{г}$ грунта в сутки), что несколько больше, чем в техногенном пылеватом песке («Новодевичий»), отобранном со схожих глубин и содержащего такое же количество органического вещества. Это возможно объяснить различным происхождением органического вещества в этих грунтах: суглинок отобран на ненарушенной антропогенным воздействием надпойменной террасе р. Москвы и содержит органику растительного происхождения, тогда как в техногенном пылеватом песке, являющимся грунтом культурного слоя, органические включения – продукты разложения и преобразования растительных остатков, строительных материалов и иных продуктов хозяйственной деятельности.

Выделяется на фоне общей тенденции образец «юрской глины». Пик активности дыхания в нем смещается на 3-4 сутки сукцессии, к 7 суткам наблюдается спад эмиссии углекислого газа. При этом уже на первые сутки после увлажнения раствором глюкозы активность дыхания существенно повышается до 8 мкмоль $\text{CO}_2/\text{г}$ грунта в сутки. Такие же значения характерны и для контрольных образцов, увлажненных водой. Затем активность микроорганизмов в контрольных образцах снижается и остается практически постоянной после 7 суток инкубирования. Такой характер изменения активности дыхания, по-видимому, связан с использованием высушенного порошка грунта и высоким содержанием специфических органических веществ. Увлажнение грунта водой (дистиллированной или растворителя в растворе глюкозы) частично растворяет органическое вещество, которое быстро потребляется микроорганизмами и стимулирует активизацию микробного комплекса, который способен уже на 3-4 сутки к гидролизу глюкозы. В целом, несмотря на очень высокое содержание органического вещества (2,3 %) активность микроорганизмов ниже, чем в «аллювиальном суглинке» или пылеватом песке («Новодевичий»), что объясняется преобразованиями органических соединений в «углеподобные» в ходе диагенеза, которые менее доступны для разложения микроорганизмами.

Стоит отметить, что во всех изученных грунтах на конечных сроках сукцессии активность дыхания микроорганизмов выше в 2-2,5 раза, чем в контрольных образцах. Следовательно, микробное сообщество в грунтах может активно существовать и после разложения глюкозы, вероятно, за счет органических веществ, изначально присутствующих в грунте, а также преобразования продуктов метаболизма, накопленных на активных стадиях сукцессии.

В модельных образцах в силу высокой физико-химической активности частиц дозировка 0,1 н раствора глюкозы в 10 % практически не активизирует микробный комплекс. Исследования проводились с дозировкой 20 % раствора, но для бентонитовой глины и она не привела к существенной активизации микробного дыхания, поэтому бентонитовую глину увлажняли раствором глюкозы в количестве 80 % от сухого вещества. В целом кинетика эмиссии CO_2 имеет тот же вид с острым максимумом на 7е сутки, а максимальная активность сопоставима с активностью в природных глинистых грунтах. Тем не менее, стоит отметить, что на конечных стадиях сукцессии активность дыхания не превышает контрольную, значит, в модельных грунтах устойчиво активный микробный комплекс не формируется.

4.2. Изменение биомассы микробного комплекса

Изменение биомассы во всех грунтах происходит по такому же сценарию с отчетливым максимумом на 7 сутки после увлажнения грунта глюкозой. В *природных четвертичных флювиогляциальных песках* прирост биомассы достаточно резкий, уже на 3

сутки сукцессии она в 2 раза выше, чем в контрольных образцах, а на 7 суток – в 4-5 раз. Далее наблюдается спад общей численности микроорганизмов, и к 28 суткам общая биомасса примерно в полтора раза выше, чем в контрольных образцах. В *природном меловом песке* и прирост, и падение биомассы происходит плавно, а абсолютные значения численности микроорганизмов ниже, чем в флювиогляциальных песках. В *техногенном песке* («Новодевичий») максимум биомассы также отмечается на 7 суток сукцессии, однако затем снижение биомассы происходит не столь существенно, как в остальных песчаных грунтах (рис. 38, а). Стоит отметить, что на начальных сроках сукцессии во всех образцах развивается грибная биомасса, в момент пика активности она составляет до 25 % от общей биомассы в «глубоких» природных песках и до 40 % в техногенном (рис. 38, б). На конечных сроках сукцессии существенная грибная биомасса отмечается лишь в техногенном песке («Новодевичий») [Иванов и др., 2015a; Ivanov et al., 2013].

В образцах *техногенных грунтов* абсолютные значения биомассы в ходе сукцессии чуть меньше, чем у флювиогляциальных песков. Прирост биомассы в течение первых 7 суток и ее уменьшение после 14 суток сукцессии происходит плавно, а максимум на 7 суток составляет 2-3 начальной биомассы (рис. 39, а). Во всех грунтах развиваются мицелиальные организмы, причем на конечной стадии сукцессии они обнаруживаются в количестве, примерно соответствующем грибной биомассе контрольных образцов (рис. 39, б). На конечных сроках сукцессии общая биомасса превышает контрольную в 1,5-2 раза. Стоит отметить, что на всех сроках сукцессии в техногенных грунтах прослеживается четкая тенденция уменьшения содержания и общей, и грибной биомассы с ростом глубины отбора образца в ряду пылеватый песок («Новодевичий») – суглинок («Коломенская») – суглинок («Каширская»).

В *аллювиальном суглинке* пик биомассы на 7 день сукцессии в 2 раза превышает контрольные значения, спад биомассы слабый, на 21-28 суток общая биомасса превышает контрольные значения (рис. 40, а). На всех сроках активно развиваются грибы, достигая 30-40 % от общей биомассы (рис. 40, б). В *юрской глине* отмечены низкие показатели биомассы, прирост быстрый (уже на 3 суток после увлажнения глюкозой биомасса увеличивается в 2 раза), а конечные значения общей биомассы на 10 % больше исходных (рис. 40, а). Грибы развиваются в небольших количествах (около 15 % общей биомассы к 14 суткам) и полностью отмирают к концу опыта (рис. 40, б).

Самые низкие значения биомассы отмечены в *модельных мономинеральных глинистых грунтах*. После 7 суток опыта наблюдается очень резкий спад биомассы, конечные значения оказываются равными (или меньше) контрольных (рис. 41, а). Грибы активно развиваются по бентонитовой глине, составляя на 7-14 сутки более 50 % биомассы.

К концу опыта они отмирают полностью. По каолиновой глине грибы не развиваются (рис. 41, б).

Для детального описания процессов трансформации биомассы и активности дыхания и выявления его стадийности был посчитан ряд коэффициентов, отражающих соотношение биомассы и активности в опытных и контрольных образцах. Коэффициент трансформации глюкозы (КТГ) показывает увеличение активности дыхания микроорганизмов при внесении в систему глюкозы и равен отношению величин эмиссии диоксида углерода в опытных и контрольных образцах. Аналогично приросту биомассы и абсолютных значений эмиссии углекислого газа, КТГ в природных флювиогляциальных песках имеет четкий резкий пик на 7 сутки, а значения достигают 17-25 ед. Сопоставимые значения КТГ отмечены в модельных образцах. В техногенных суглинках, природных «аллювиальном суглинке» и «юрской глине» КТГ составляет 1,5-3,5 и мало меняется в ходе сукцессии (рис. 42).

Коэффициент микробного отклика на глюкозу (КМОГ), который представляет собой отношение общей биомассы микроорганизмов в опытных и контрольных образцах, показывает прирост биомассы при внесении в систему раствора глюкозы. В целом наблюдаются те же тенденции, описанные выше для КТГ. Следует обратить внимание на выполаживание кривой КМОГ на значениях больше 1 (то есть, биомасса опытных образцов больше, чем в контрольных) на конечных сроках сукцессии во всех грунтах, содержащих органические вещества (рис. 43).

Для оценки метаболической активности микробного комплекса применялась величина удельной активности дыхания микроорганизмов, равная отношению разности эмиссий дыхания в опытных и контрольных образцах к разности биомассы в опытных и контрольных вариантах на одном и том же сроке (УДА). Во всех грунтах, содержащих органические вещества, УДА заметно повышается уже к 3 суткам сукцессии. Во флювиогляциальных песках увеличение УДА отмечается лишь на 7 сутки после внесения раствора глюкозы (рис. 44). Стабилизация удельной активности дыхания после 15 суток на отметках 10-40 мкмоль CO_2 / мг биомассы в сутки позволяет предположить формирование устойчивого микробного комплекса по итогам сукцессии.

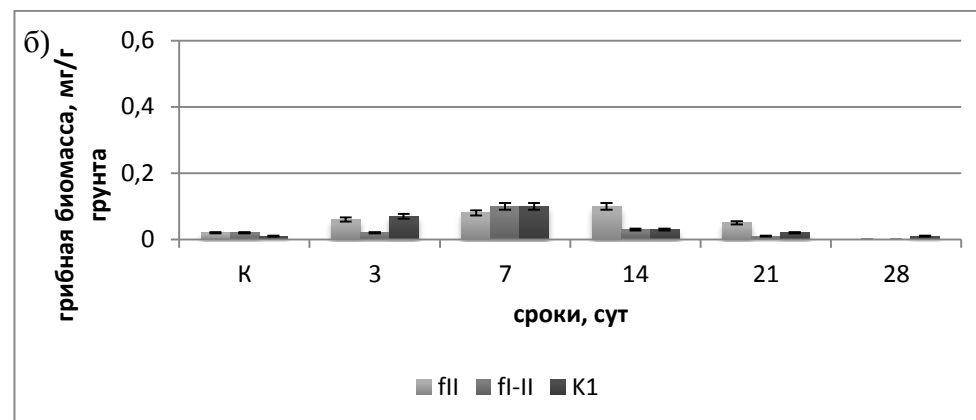
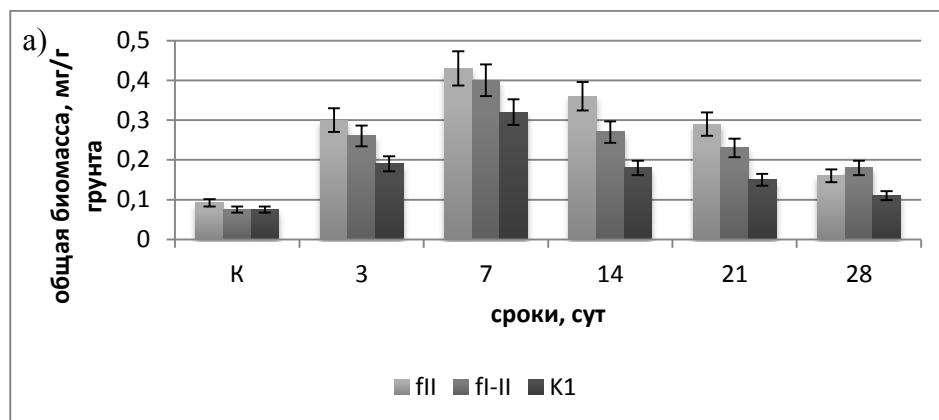


Рис. 38. Биомасса общая (а) и грибная (б) в образцах песчаных грунтов:

«fII» – песок пылеватый fQ_{IIms} ; «fI-II» – песок мелкий $f,lgQ_{I\,dns-Q_{IIms}}$; «K₁» – песок средней крупности K₁

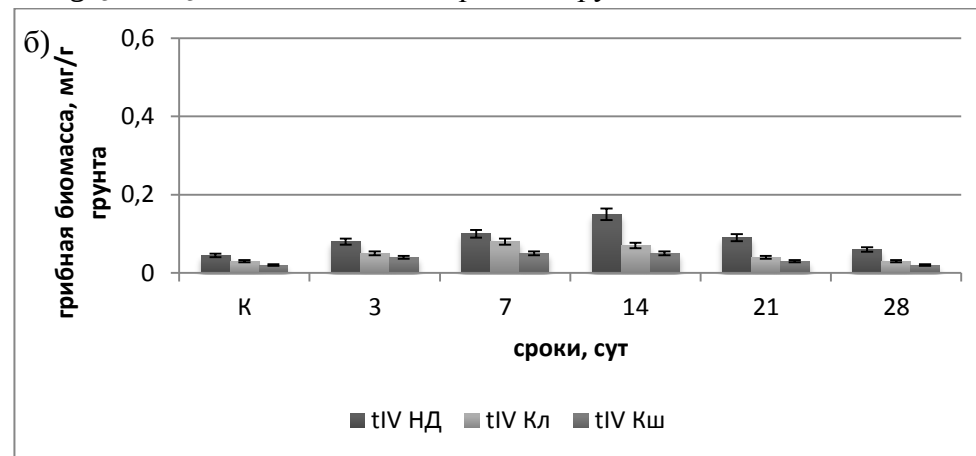
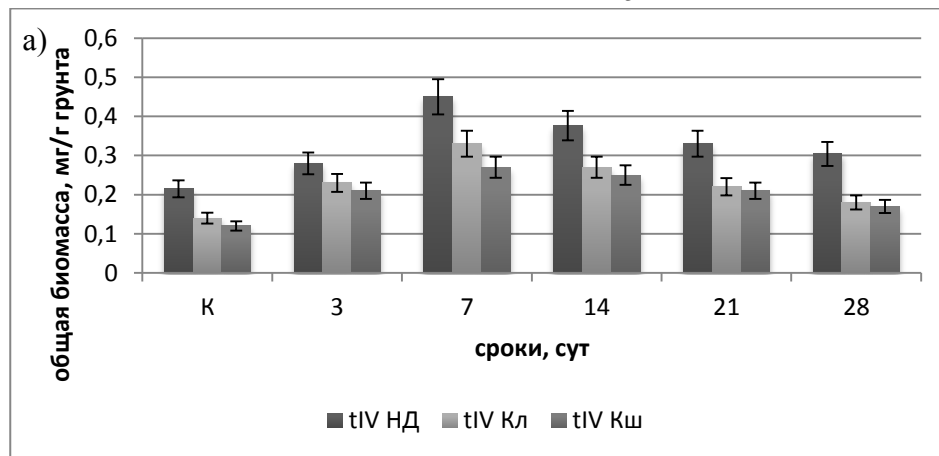


Рис. 39. Биомасса общая (а) и грибная (б) в образцах техногенных грунтов:

«tIV НД» – пылеватый песок («Новодевичий»), «tIV Кл» – суглинок («Коломенская»), «tIV Кш» – суглинок («Каширская»)

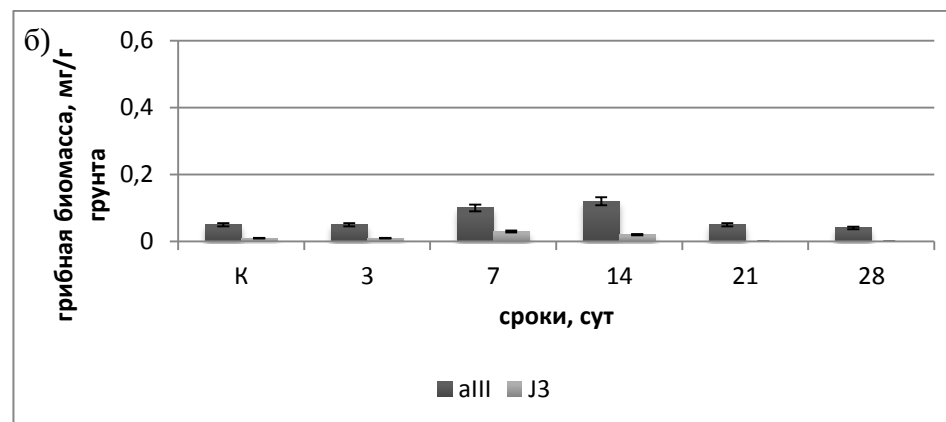
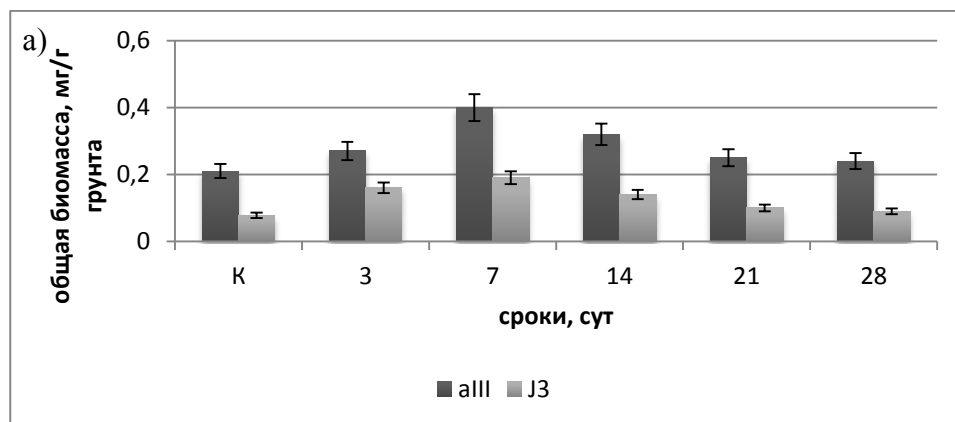


Рис. 40. Биомасса общая (а) и грибная (б) в образцах природных глинистых грунтов:
«aIII» – суглинок легкий пылеватый («аллювиальный суглинок»); «J3» – глина легкая пылеватая («юрская глина»)

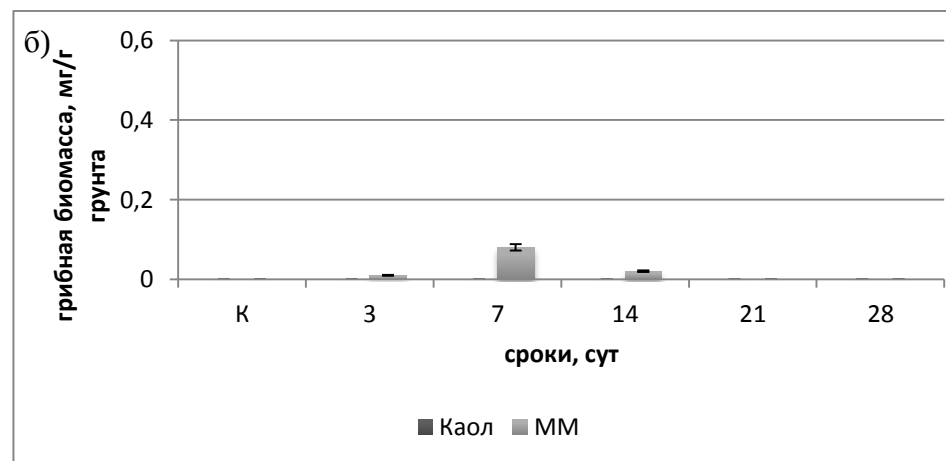
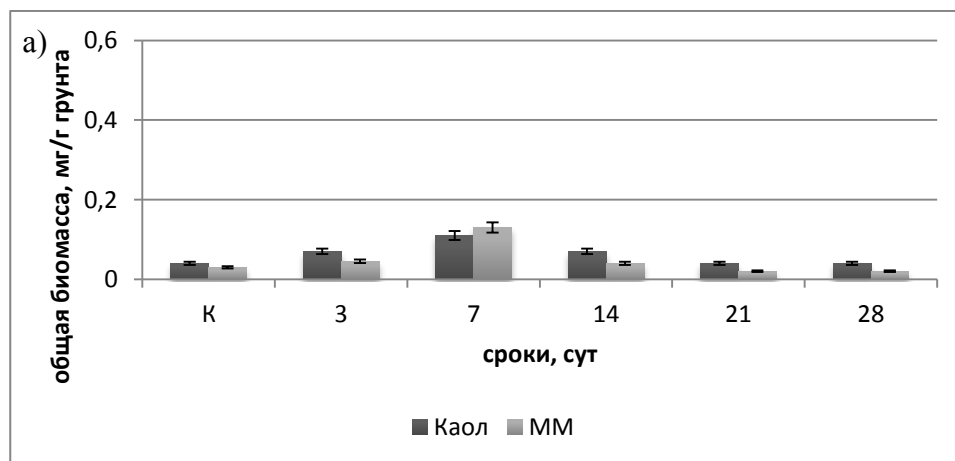


Рис. 41. Биомасса общая (а) и грибная (б) в образцах модельных мономинеральных глинистых грунтов:
«Каол» – глина каолиновая; «MM» – глина бентонитовая

Первое защищаемое положение. Установлено явление резкого возрастания активности микробного комплекса и увеличения его биомассы с максимумом на 7 сутки при увлажнении грунта питательным соединением – глюкозой, с последующим спадом активности и численности и формированием стабильного микробного комплекса с показателями в 1,5-5 раз выше, чем у исходного грунта, что объясняется равновесием процессов разложения вещества отмерших клеток и развития новой биомассы.

Степень активизации микробного комплекса путем добавления глюкозы максимальна в грунтах с отсутствием природного органического вещества. В песках отмечается большое количество спор, которые при внесении питательного вещества начинают активно развиваться. После потребления глюкозы (7-14 сутки) вследствие отсутствия других питательных веществ клетки так же быстро отмирают или переходят в неактивное состояние. В грунтах с природным органическим веществом эти процессы менее интенсивны по абсолютным значениям, но активное существование повышенного числа клеток наблюдается дольше (в период 3-14 суток).

Органическое вещество отмерших клеток после разложения глюкозы может быть субстратом для еще активных клеток. **На конечных стадиях сукцессии (после 15 суток) во всех грунтах, за исключением модельных, формируется устойчивый микробный комплекс** с активностью дыхания в 1,5-5 раз выше, чем в контрольных образцах, с большей биомассой и удельной активностью 10-40 мкмоль CO₂ / мг биомассы в сутки. Вероятно, микробный комплекс после стрессовых преобразований, связанных сначала с избытком, а затем нехваткой органических веществ, приходит в некоторое состояние постоянной численности и активности, когда процессы деления, отмирания клеток и разложения органического вещества сбалансированы.

Прямой корреляции между количеством органического вещества и характером трансформации микробного комплекса в грунтах не прослеживается. Вероятно, **помимо абсолютного содержания органики, важен ее состав и «происхождение»**. Так, наименьшие отклик на внесение глюкозы и потенциальную микробиологическую активность проявляют грунты с большим количеством органического вещества растительного происхождения (природный «аллювиальный суглинок» и техногенный суглинок «Коломенская»). Подобные явления описаны в литературе для почв. Так, микробные комплексы чернозема и серой лесной почвы слабо реагируют на внесение дополнительного питательного вещества – хитина [Манучарова и др., 2011].

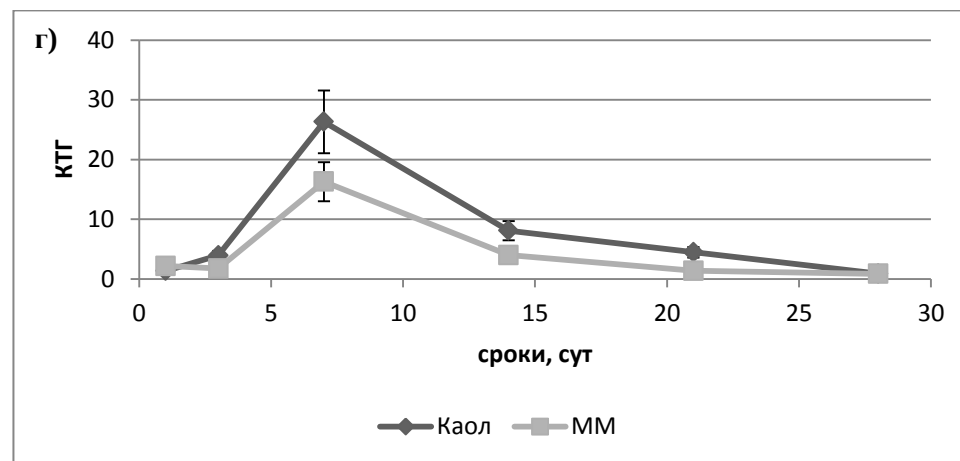
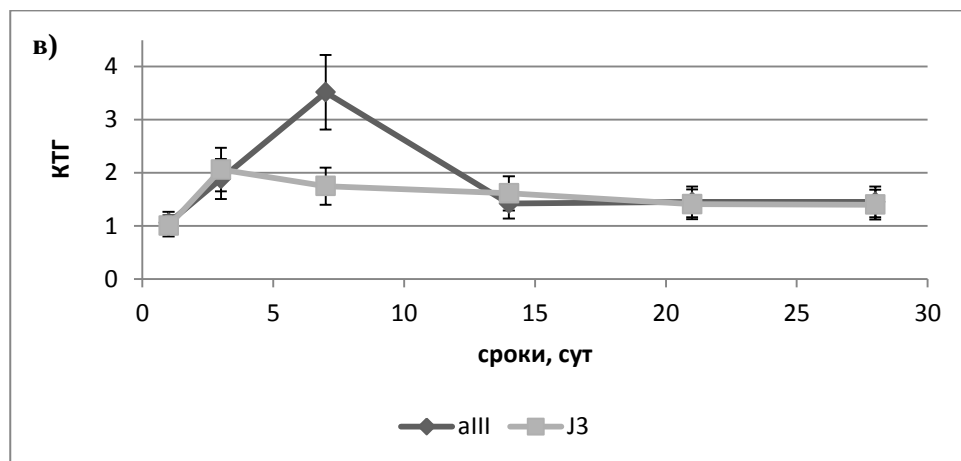
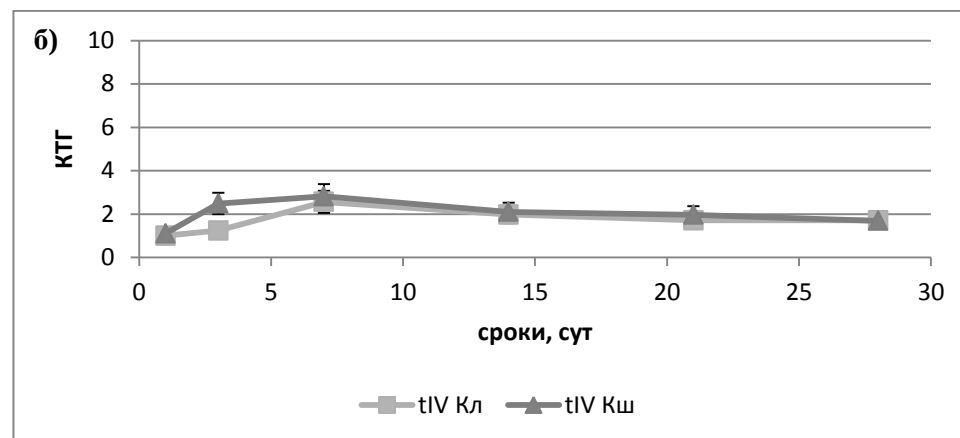
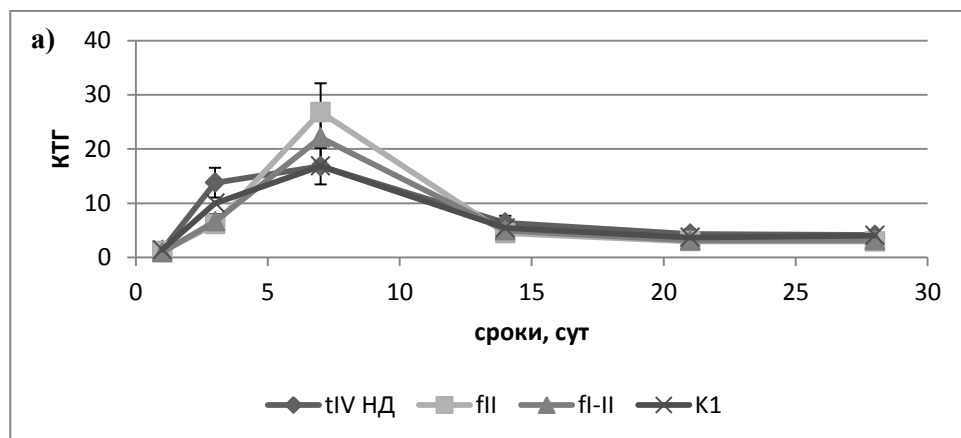


Рис. 42. Изменение коэффициента трансформации глюкозы (КТГ) в ходе сукцессии: а – «tIV HD» – пылеватый песок («Новодевичий»); «fII» – песок пылеватый fQ_{IIms}; «fI-II» – песок мелкий f,lgQ_{I dns-Q_{IIms}}; «K_I» – песок средней крупности K_I; б – «tIV Kл» – суглинок («Коломенская»), «tIV Kш» – суглинок («Каширская»); в – «aIII» – суглинок легкий пылеватый («аллювиальный суглинок»); «J3» – глина легкая пылеватая («юрская глина»); г – «Каол» – глина каолиновая; «MM» – глина бентонитовая

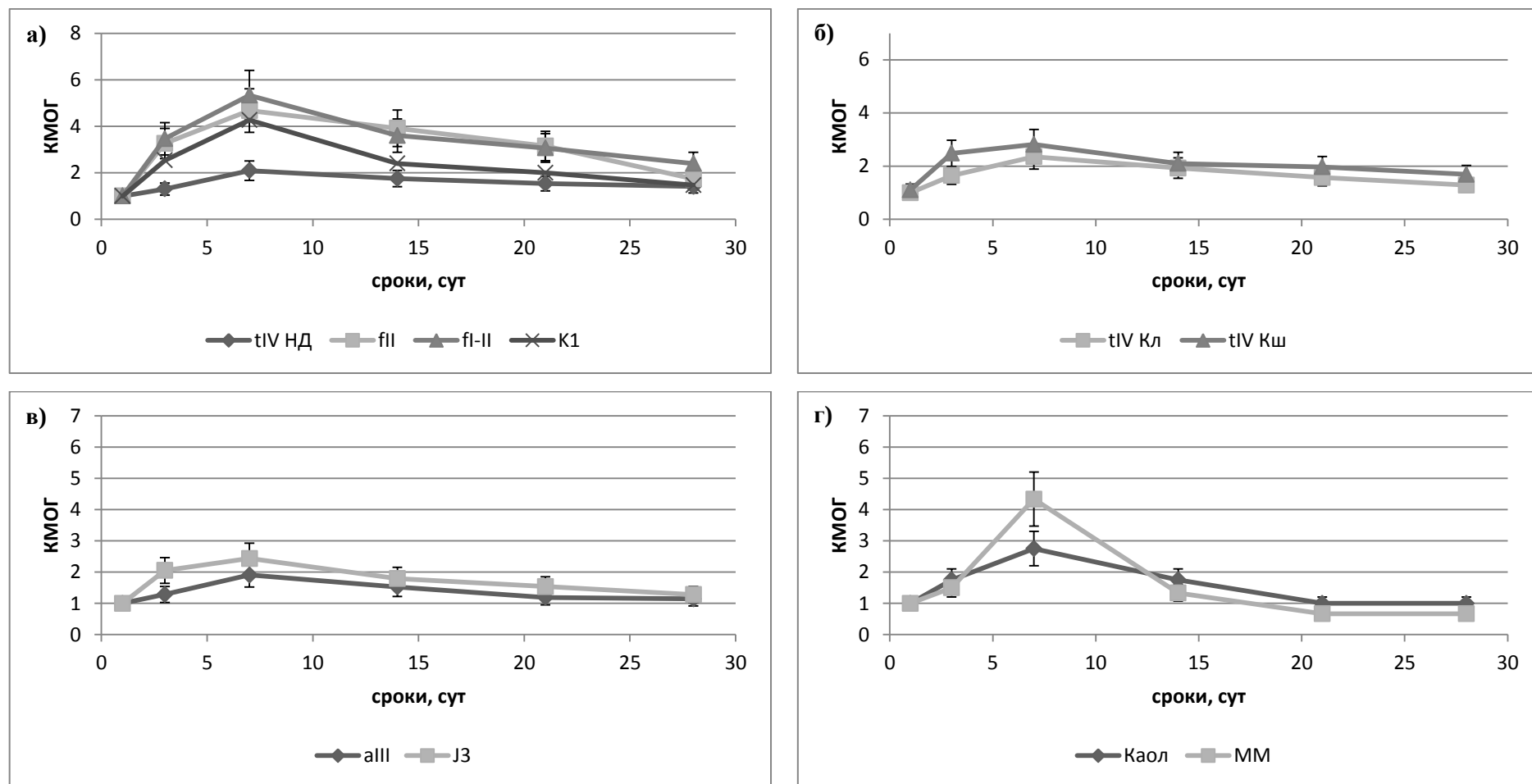


Рис. 43. Изменение коэффициента микробного отклика на внесение глюкозы (КМОГ) в ходе сукцессии: а – «tIV HD» – пылеватый песок («Новодевичий»); «fII» – песок пылеватый fQ_{IIms}; «fI-II» – песок мелкий f,lgQ_{Ims-Q_{IIms}}; «K₁» – песок средней крупности K₁; б – «tIV Кл» – суглинок («Коломенская»), «tIV Кш» – суглинок («Каширская»); в – «aIII» – суглинок легкий пылеватый («аллювиальный суглинок»); «J3» – глина легкая пылеватая («юрская глина»); г – «Каол» – глина каолиновая; «MM» – глина бентонитовая

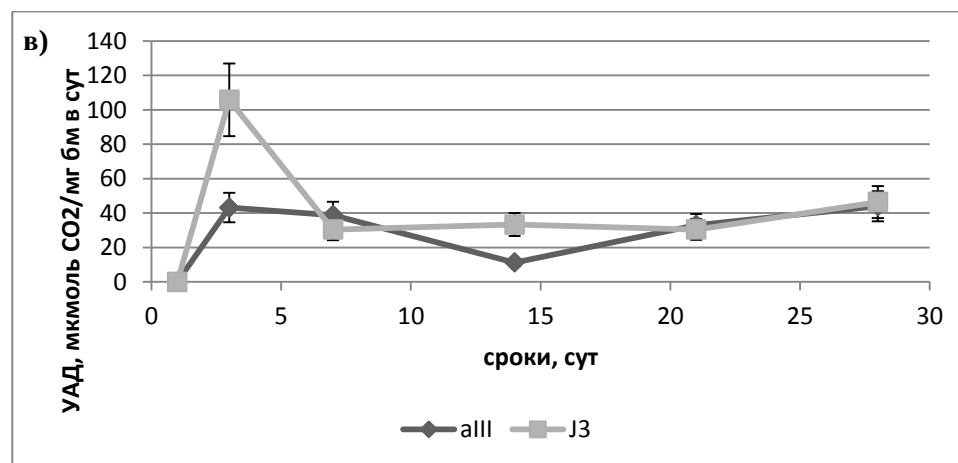
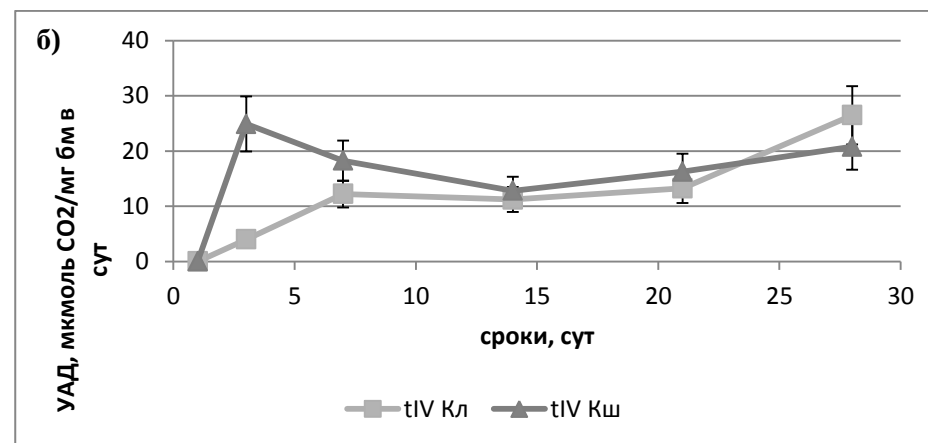
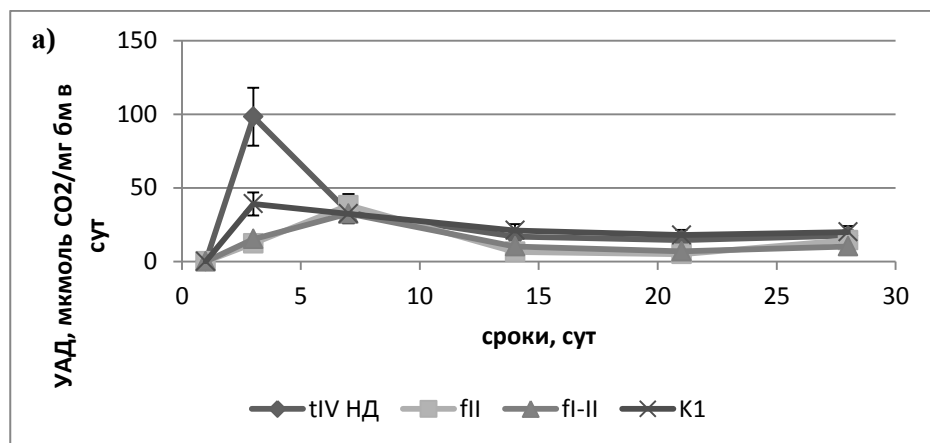


Рис. 44. Изменение удельной активности дыхания микроорганизмов (УАД) в ходе сукцессии: а – «tIV HD» – пылеватый песок («Новодевичий»); «fII» – песок пылеватый fQ_{IIms}; «fI-II» – песок мелкий f,lgQ_{I dns-Q_{IIms}}; «K_I» – песок средней крупности K_I; б – «tIV Кл» – суглинок («Коломенская»), «tIV Кш» – суглинок («Каширская»); в – «aIII» – суглинок легкий пылеватый («аллювиальный суглинок»); «J3» – глина легкая пылеватая («юрская глина»);

Органическое вещество в «юрской глине» имеет сложный преобразованный в ходе диагенеза состав, при внесении раствора глюкозы и воды оно частично растворяется, и микробный комплекс демонстрирует резкий отклик на внесение глюкозы. Однако, после 7 суток (разложения глюкозы), возможно, происходит разложение и исходного органического вещества, поскольку формируется стабильный микробный комплекс с высокой удельной активностью – около 40 мкмоль CO_2 / мг биомассы в сутки. Такие же показатели характерны для «аллювиального суглинка», в котором органическое вещество наиболее доступно для разложения микроорганизмами, несмотря на относительно низкое его абсолютное содержание (0,5 %).

Для сравнения, в техногенном песке («Новодевичий») содержится столько же органического вещества, но оно имеет иное происхождение – вероятно, это продукты многолетнего разложения строительных материалов и иной хозяйственной деятельности. Для этого грунта характерны высокие показатели удельной активности на 3-7 сутки, однако прирост биомассы достаточно слабый. На конечных стадиях сукцессии формируется стабильный микробный комплекс с удельной активностью дыхания около 20 мкмоль CO_2 / мг биомассы в сутки.

В модельных грунтах, несмотря на схожий характер процессов, на конечных сроках стабильный микробный комплекс не формируется. Вероятно, это связано с отсутствием каких-либо питательных веществ и «однообразием» субстрата для микроорганизмов. Поэтому вещество отмирающих после разложения глюкозы клеток быстро потребляется активными организмами, и уже к 15-21 суткам параметры микробного комплекса возвращаются к исходным значениям.

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ АКТИВИЗАЦИИ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА ГРУНТОВ НА ИХ СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА

5.1. Изменение химико-минерального состава грунтов

Изучение образцов глинистой фракции грунтов (менее 5 мкм) методами рентгеновской дифракции позволило установить, что кроме каолинита, иллита и смектита, в пробах глинистой фракции практически всех грунтов содержится большое количество смешанослойного минерала иллит-смектитового состава с преобладанием иллитовых пакетов. В глинистой фракции техногенного пылеватого песка («Новодевичий») смешанослойный минерал иллит-смектитового состава содержится в значительных количествах. К 7 суткам сукцессии наблюдается увеличение количества смектитовых пакетов в этом минерале, что прослеживается по появлению рефлекса с межплоскостным

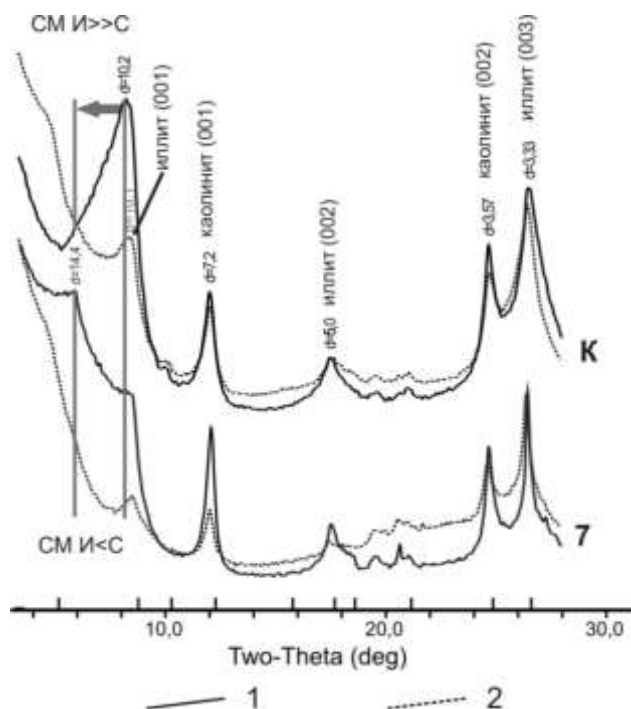


Рис. 45. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа глинистой фракции техногенного грунта («Новодевичий»):

- К – исходный образец (контроль); 7 – после 7 суток сукцессии;
- 1 – воздушно-сухой образец;
- 2 – насыщенный этиленгликолем

расстоянием в 14 Å и изменением характера дифракционной картины препарата в насыщенном этиленгликолем состоянии (рис. 45). При этом «чистые» иллит и смектиты, а также каолинит существенных изменений не претерпевают. Подъем фона и увеличение количества мелких пиков позволяет предположить накопление в системе аморфной фазы.

Аналогичный состав глинистой фракции диагностирован у природного флювиогляциального песка f,lgQ_{1st}-Q_{11dns}, в составе смешанослойного минерала преобладают иллитовые пакеты, хотя их количественное соотношение со смектитовыми несколько меньше, чем в техногенном песке (рис. 46). К 7 суткам сукцессии наблюдается смещение пика с 11,5 Å до 14,5 Å, следовательно, заметно увеличивается содержание набухающих пакетов. К 30 суткам сукцессии отмечается растворение и

увеличение дефектности всех глинистых минералов.

В минеральном составе глинистой фракции природного песка средней крупности (K₁) также отмечается смешанослойный минерал иллит-смектитового состава, в котором распределение иллитовых и смектитовых пакетов близко к 1:1 (рис. 47). Аналогично к 7 суткам отмечается сдвиг пика 11,8 Å до 14,7 Å. Иллит, каолинит и хлорит существенных изменений не претерпевают.

В глинистой фракции техногенного суглинка («Коломенская») высокий фон дифрактограмм (рис. 48) указывает на существенное содержание сложных гуминоподобных органических веществ. В техногенном пылеватом песке («Новодевичий») при большем содержании органических веществ подъем фона дифракционной картины не отмечается. Это подтверждает высказанные выше предположения о разном составе и происхождении органических веществ в этих техногенных грунтах. Также в глинистой фракции суглинка («Коломенская») обнаружены мелкодисперсный кальцит и гипс. Активизация микробиологических процессов привела к разрушению этих минералов. Изменения в

смешанослойном иллит-сметитовом минерале диагностируются по появлению отчетливого пика 19 Å в гликолизированном состоянии, тем не менее, стоит говорить, что интенсивность преобразования иллитовых пакетов здесь существенно ниже, чем в других образцах [Ivanov et al., 2014].

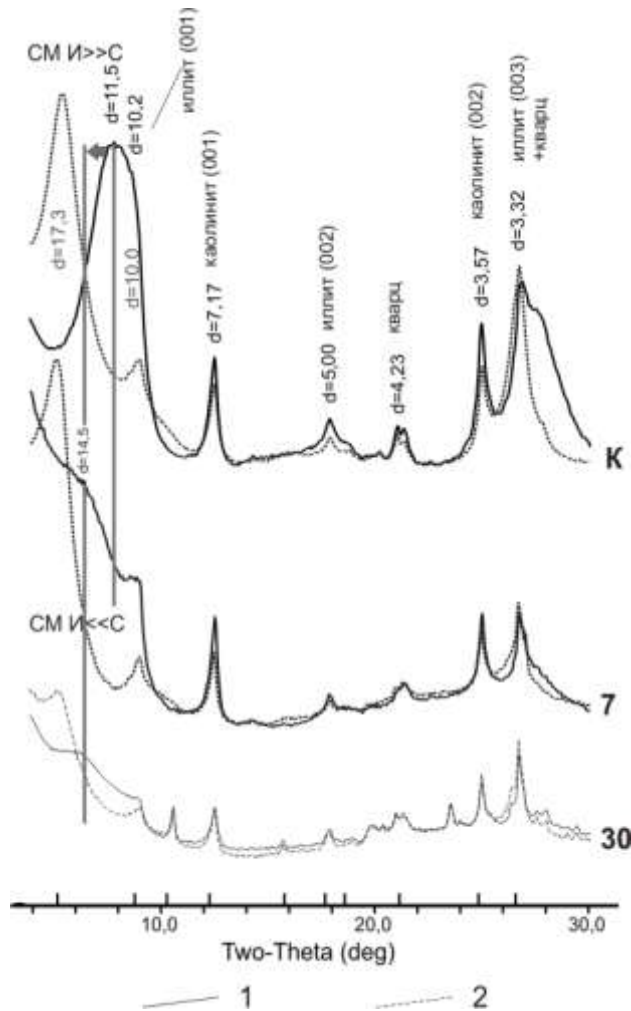


Рис. 46. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа глинистой фракции природного мелкого песка f,lgQst-Qndns: К – исходный образец (контроль); 7 – после 7 суток сукцессии; 30 – после 30 суток сукцессии; 1 – воздушно-сухой образец; 2 – насыщенный этиленгликолем

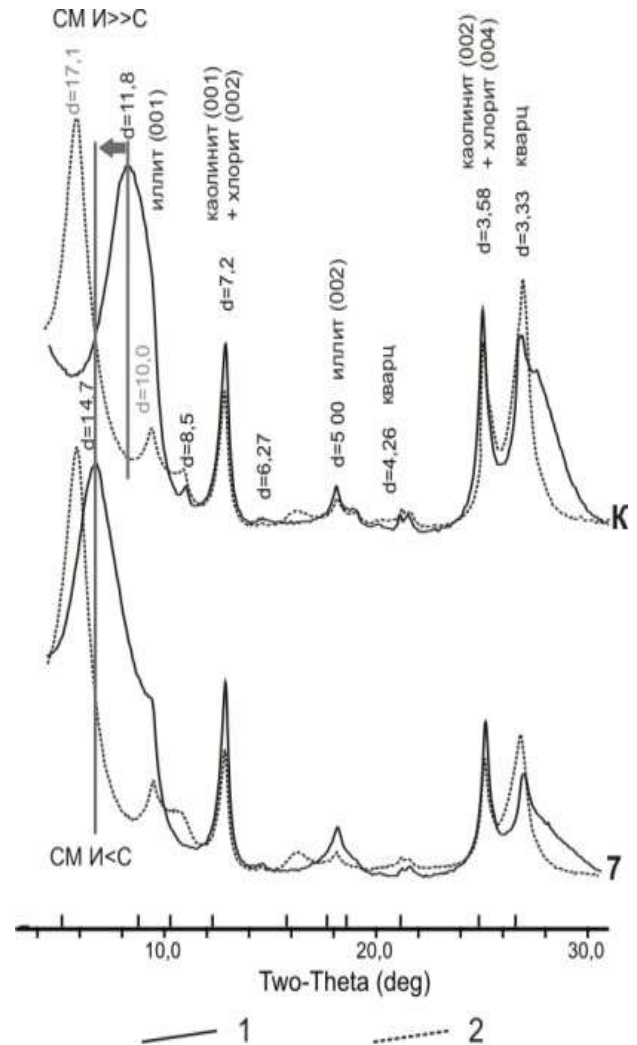


Рис. 47. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа глинистой фракции природного песка средней крупности K₁: К – исходный образец (контроль); 7 – после 7 суток сукцессии; 1 – воздушно-сухой образец; 2 – насыщенный этиленгликолем

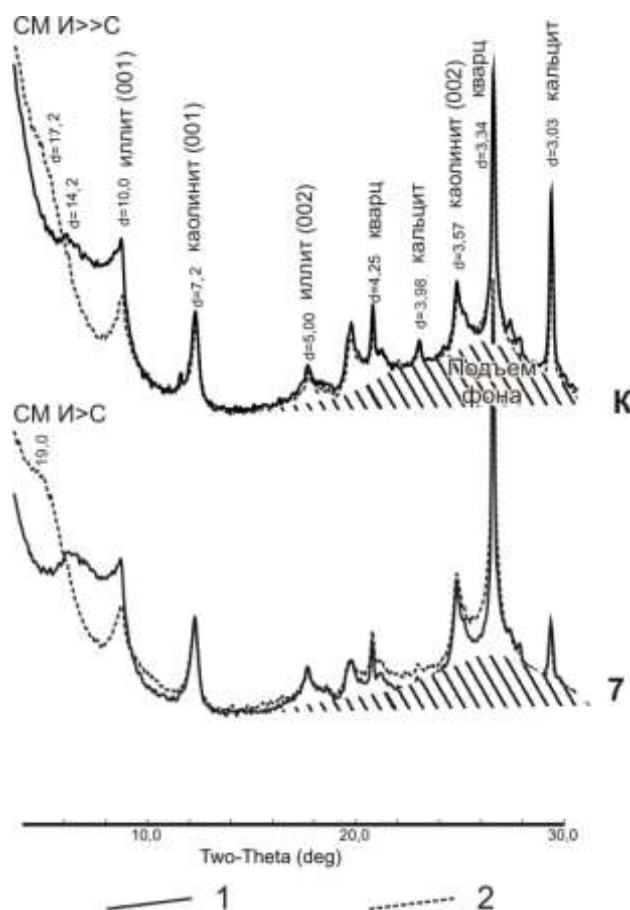


Рис. 48. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа глинистой фракции техногенного суглинка («Коломенская»): К – исходный образец (контроль); 7 – после 7 суток сукцессии; 1 – воздушно-сухой образец; 2 – насыщенный этиленгликолем

Разрушение иллитовых пакетов следует связывать с потреблением ионов калия из межслоевых пространств в результате микробиологических процессов. Это приводит к увеличению количества «сметитоподобных» набухающих пакетов в смешанослойных минералах. Механизмы выноса калия не ясны, тем не менее, эти тенденции находят подтверждение в литературе. Например, в работе Т.В. Алексеевой [2009] описано разрушение чистого иллита за счет выноса ионов калия в ходе жизнедеятельности цианобактериального сообщества.

В природном песке средней крупности (K_1) в смешанослойном минерале соотношение иллитовых и сметитовых пакетов примерно равно 1:1. С одной стороны, сдвиг пика может свидетельствовать о таком же процессе выноса ионов калия из межслоевого пространства иллитовых пакетов. С другой стороны, микробиологическая активность может вызывать обменные реакции и в межслоевом пространстве сметитовых пакетов, которые могут привести к разрушению октаэдрических слоев 2:1. Эти процессы описаны для взаимодействия с монтмориллонитовыми глинами отдельных штаммов микроорганизмов [Perdrial et al., 2009; Gates et al., 1993; Kostka et al., 2009]. В пользу этой версии говорит и обнаруженное явление растворения кальцита и других минералов – в поровом растворе при этом повышается содержание ионов кальция, которые могут вытеснять ионы натрия и других элементов из обменных комплексов сметитов.

Не совсем понятно, почему при этом к 7 суткам «чистые» иллит и сметит не подвергаются подобным изменениям. Возможно, причина в более жесткой и упорядоченной структуре иллита и сметита по сравнению со смешанослойным минералом, и ионы калия в

иллитовых пакетах смешанослойного минерала более доступны для выноса в результате микробиологических процессов.

Менее существенные изменения в структуре смешанослойного минерала в техногенном суглинке («Коломенское»), вероятно, связаны с наличием органического вещества растительного происхождения. С одной стороны, эти вещества являются дополнительным источником питания для микроорганизмов, поэтому нет необходимости получать энергию за счет разрушения глинистых минералов. С другой стороны, органическое вещество, а также тонкодисперсные кальцит, гипс, гетит и другие минералы могут формировать пленки на поверхности глинистых частиц, затрудняя доступ микроорганизмам к их кристаллической структуре. В литературе имеются примеры избирательного извлечения микроорганизмами гетита в ассоциации с кальцитом без разрушения кристаллической решетки глинистых минералов [Lee et al., 2002].

Разрушение минералов к 30 суткам сукцессии можно объяснить тем, что после разложения глюкозы и потребления легкодоступных элементов в дефектной решетке смешанослойных минералов для дальнейшей жизнедеятельности бактерии используют энергию окислительно-восстановительных реакций переменновалентных элементов (алюминия и железа). Эти элементы выносятся из кристаллической решетки глинистых минералов, за счет чего кристаллическая структура распадается.

Дополнительные исследования на модельных грунтах (мономинеральных бентонитовых и каолиновых глинах) показали, что, несмотря на активное протекание микробной сукцессии, повторяющей тенденции полиминеральных грунтов, в их структуре не происходит никаких изменений. Таким образом, разрушение кристаллической решетки глинистых минералов в грунте после потребления глюкозы в модельных образцах не происходит, а значит, этот процесс определяется факторами, присутствующими в полиминеральных грунтах – наличие смешанослойных минералов, специфический состав порового раствора и наличие биофильных элементов [Ivanov et al., 2014].

Другие методы рентгеноструктурного анализа на остальных образцах подтверждают описанные выше тенденции. Так, *природные глинистые грунты* исследовались с помощью внутреннего эталона (цинкит), относительно пика которого считалось процентное соотношение основных минералов. Результаты определения минерального состава валовых образцов исходных грунтов и проб после 7 суток сукцессии приведены в табл. 20. Из рассмотрения исключены основные породообразующие минералы (кварц и полевые шпаты), так как они за короткий срок не претерпевают существенных изменений. Сумма относительного процентного содержания остальных минералов приведена к 100 %.

Таблица 20. Соотношение некоторых минералов в исходных грунтах и после 7 суток сукцессии по данным рентгеноструктурного анализа с внутренним эталоном

Образцы	Глина (J _{3ox})	Глина (J _{3ox})	Суглинок (aQ _{III})	Суглинок (aQ _{III})
Минералы	исходный	7 суток сукцессии	исходный	7 суток сукцессии
кальцит	24	19	11	10
пирит	7	5	0	0
гипс	6	5	0	0
каолинит	2	2	5	5
хлорит	2	2	5	5
иллит	13	18	16	20
И-С (И>С)	37	26	42	35
смектиты	9	23	21	26

Примечание: И-С (И>С) – смешанослойный глинистый минерал иллит-смектитового состава с преобладанием иллитовых пакетов

Уменьшение относительного содержания иллит-смектитов и увеличение чистых смектитов может быть свидетельством протекания описанных выше процессов выноса ионов калия и из межслоевых пространств иллитов, а также обменных реакций в межслоевом пространстве смектитовых пакетов. Обращает внимание также растворение кальцита и, возможно, пирита и гипса.

Для *природных грунтов основания плотин Камской ГЭС* проведен полуколичественный рентгеноструктурный анализ исходных образцов, а также грунтов после обработки накопительной культурой микроорганизмов, инкубированной из одного из этих грунтов. Обработка результатов велась по методу Бискае (см. главу 2). Метод не позволяет диагностировать количественное содержание смешанослойных иллит-смектитовых минералов, которые присутствуют в грунтах, однако дает представление о количестве иллитовых и смектитовых пакетов в грунте. Результаты полуколичественного рентгеноструктурного анализа приведены в табл. 21.

В аллювиальных грунтах основания плотины Камской ГЭС также происходит накопление смектитовых пакетов. Анализ дифрактограмм (приложение 2) показывает, что в грунтах возрастает дефектность всех минералов – пики становятся менее четкими, амплитуда колебаний экспериментальных точек около линии тренда возрастает [Иванов, 2013].

Таблица 21. Результаты полуколичественного рентгеноструктурного анализа минерального состава грунтов основания плотин Камской ГЭС

Наименование образца		Содержание глинистых минералов, в %		
		сметиты	иллит	каолинит + хлорит
Суглинок тяжелый пылеватый (грунт 1)	до обработки	37	41	22
	после обработки	50	27	22
Суглинок легкий песчанистый (грунт 2)	до обработки	36	48	16
	после обработки	20	59	21
Суглинок легкий песчанистый (грунт 3)	до обработки	61	24	14
	после обработки	47	38	14

Анализ дифракционных картин с применением различных методов обработки данных показывает, что в минеральном составе всех изученных грунтов главные изменения связаны со смешанослойными минералами иллит-сметитового состава: наблюдается увеличение содержания набухающих пакетов сметитового типа. Происходит растворение кальцита и менее интенсивно – гипса и пирита. Возрастает дефектность минералов, а к 30 суткам сукцессии наблюдается практически полное разрушение глинистой фракции песчаных грунтов.

Для оценки изменения химического состава и подтверждения предположения о растворении кальцита проведен временной анализ содержания ионов Ca^{2+} и HCO_3^- в суспензиях на основе техногенных грунтов, а также «юрской глины» с водой (контроль) и с раствором глюкозы той же концентрации (в пересчете на навеску грунта), что и во всех остальных определениях. Параллельно определялись pH и Eh суспензии. Пробы брали 1 раз в сутки в течение 20 дней.

pH суспензий заметно снижается в течение первых 100-200 часов опыта (5-8 суток) по сравнению с контрольными образцами. Вероятно, это связано с химическим взаимодействием раствора глюкозы (с pH 6,9) с компонентами грунта, pH водной вытяжки из которых выше (около 7-7,5). По мере активизации микробиологических процессов pH повышается, в техногенных грунтах он достигает значений, равных или выше контрольных (рис. 49). В «юрской глине» он остается несколько ниже, чем в суспензии с водой. Eh контрольных образцов постепенно снижается, но через 100-200 часов как правило

стабилизируется в области низких положительных значений (40-50 мВ в техногенных грунтах и около 100 мВ в природной «юрской глине»). Это можно объяснить затрудненным доступом кислорода в грунт через толщу воды и постепенным формированием пограничных окислительно-восстановительных условий. В суспензиях с глюкозой уменьшение E_h происходит интенсивнее за счет потребления кислорода микроорганизмами, а также растворения в воде CO_2 , выделяемого при микробном дыхании. Через 200-300 часов выстаивания окислительно-восстановительный потенциал переходит в зону отрицательных значений, что говорит о создании восстановительных условий после потребления всего кислорода. В таких условиях переменновалентные элементы (алюминий, железо, кремний и др.) будут восстанавливаться. Железо способно переходить в растворимую двухвалентную форму [Третьякова, 2013]. Это может приводить к выносу железа и других основных элементов из кристаллической решетки глинистых минералов, что описано по результатам анализа дифрактограмм минерального анализа глинистой фракции грунтов.

На 10 сутки (240 часов) опыта в «юрской глине» отмечается стойкий запах сероводорода, что говорит о протекании процессов сульфатредукции и преобразования соединений серы в грунте (пирита и гипса).

Отмечено увеличение содержания ионов кальция и гидрокарбонатов в суспензии с ростом активности микроорганизмов (рис. 50). За счет гидролиза глюкозы и дыхания микроорганизмов происходит обогащение порового раствора CO_2 . В присутствии CO_2 в поровом пространстве повышается растворимость карбонатов, увеличивается pH суспензии. Пик активности дыхания соответствует пику содержания этих ионов в суспензии. Со спадом микробиологической активности снижается и содержание этих ионов в растворе, то есть кальцит выпадает в осадок. Поскольку на рентгенограммах образование кальцита не отмечено, можно предположить, что новообразованный кальцит либо имеет аморфную структуру, либо формирует частицы более 5 мкм. К тому же, насыщение порового раствора кальцитом способствует протеканию обменных реакций в межслоевом пространстве смектитов и обмену ионов Na^+ на Ca^{2+} , что косвенно подтверждено рентгеноструктурными анализами.

В целом, содержание ионов кальция и гидрокарбонат-ионов в суспензиях имеет тесную связь с эмиссией CO_2 , образованного при дыхании микроорганизмов. Коэффициенты детерминированности линейной связи составляют 0,6-0,9 (рис. 51). В суспензии на основе «юрской глины» математическая связь не прослеживается в силу иного характера активизации микробного комплекса (увеличение эмиссии CO_2 на первый день сукцессии при увлажнении воздушно-сухого грунта и максимума активности на 3 сутки), тем не менее,

визуально стоит говорить о тенденции к увеличению содержания этих ионов с ростом концентрации углекислого газа.

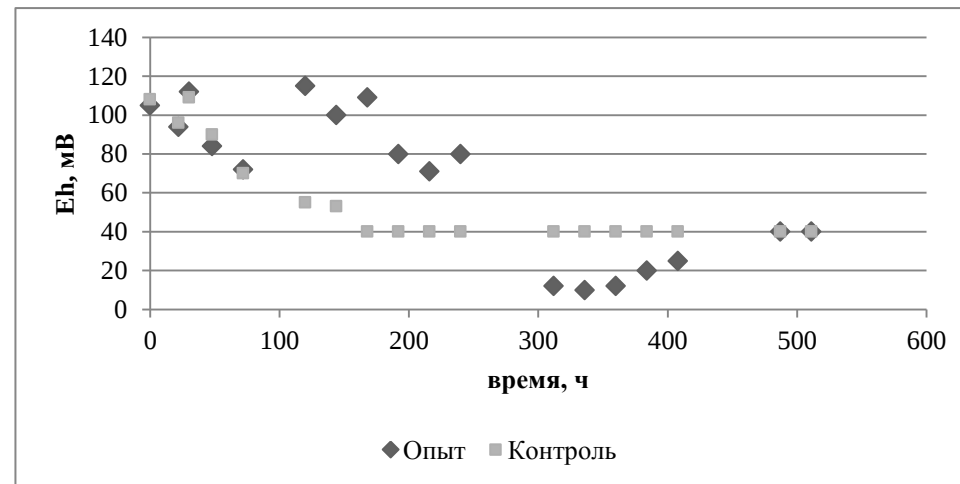
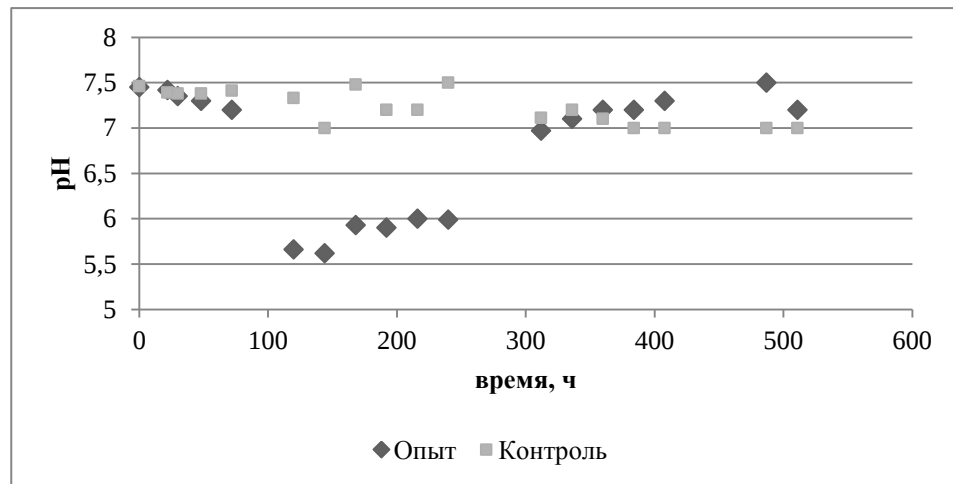
По результатам анализа химического состава водного раствора грунтовой суспензии следует говорить о создании специфических восстановительных условий при длительном выдерживании суспензии. В «юрской глине», содержащей соединения серы, начинаются процессы сульфатредукции и преобразование пирита и гипса, что отмечается по результатам рентгеноструктурного анализа. В период наибольшей активности дыхания микроорганизмов при насыщении суспензии углекислым газом происходит растворение карбонатов, за счет чего pH повышается. Со спадом микробиологической активности карбонаты выпадают в осадок [Ivanov et al., 2014; Иванов и др., 2015б].

Обобщая результаты определения изменения химико-минерального состава грунтов в ходе сукцессии, выведем **Второе защищаемое положение. При активизации природного микробного комплекса происходит изменение химико-минерального состава грунтов, проявляющееся в следующем:**

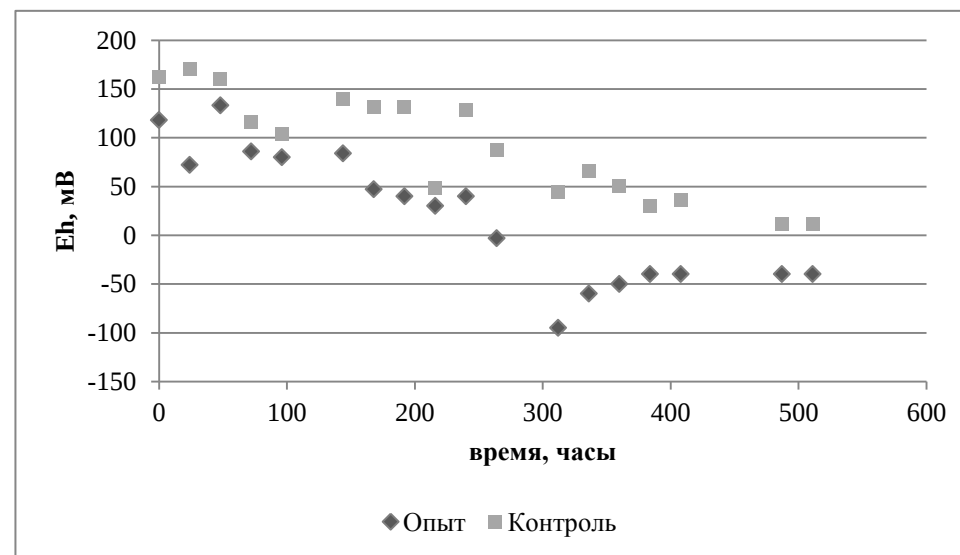
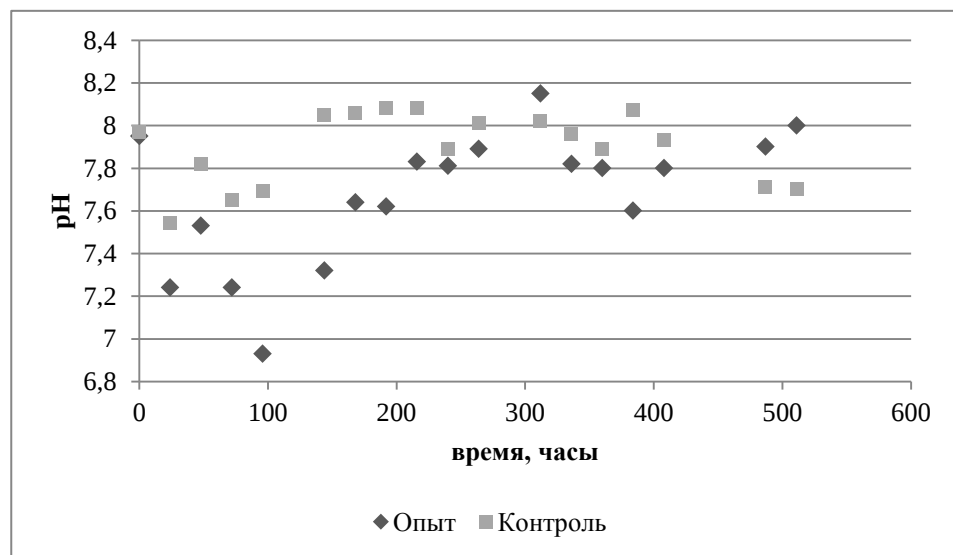
а) иллитовые пакеты в смешанослойных минералах иллит-сметитового состава переходят в набухающие пакеты; наблюдается повышение дефектности кристаллических решеток всех глинистых минералов и их разрушение, эти изменения необратимы при спаде микробной активности;

б) карбонаты разрушаются за счет увеличения концентрации углекислого газа в поровом растворе в результате дыхания микроорганизмов; при снижении микробной активности содержание ионов кальция и гидрокарбонатов в грунтовых суспензиях закономерно уменьшается.

1



2



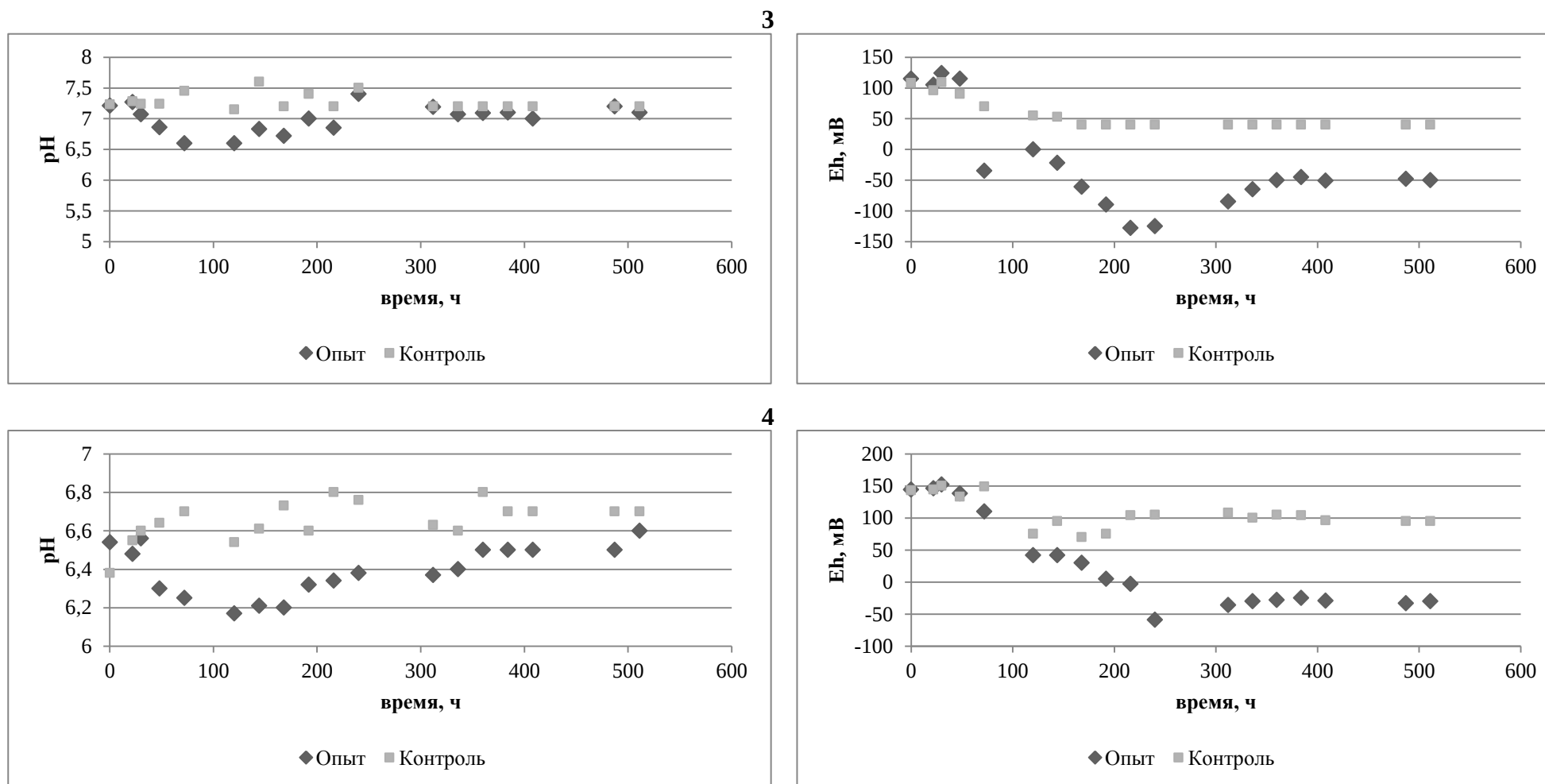
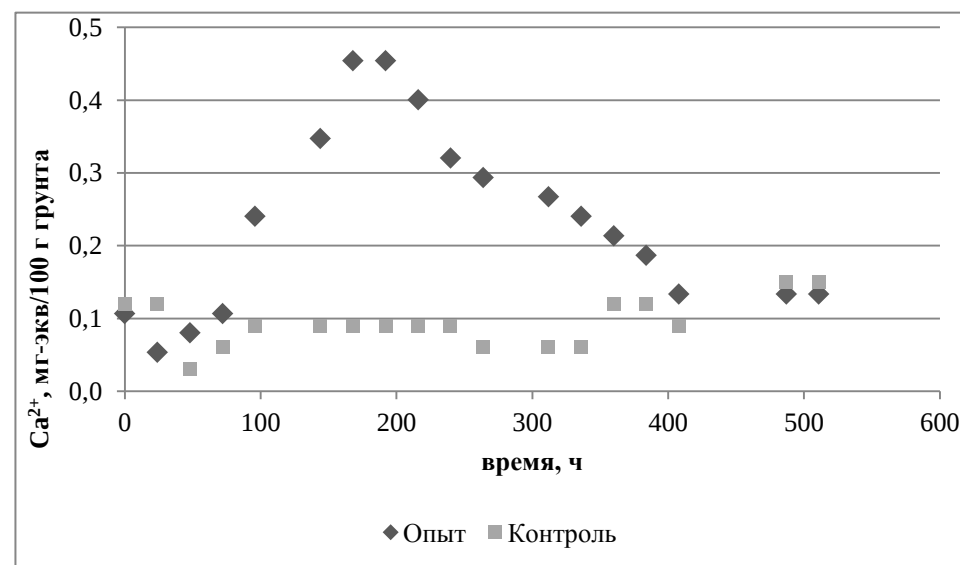
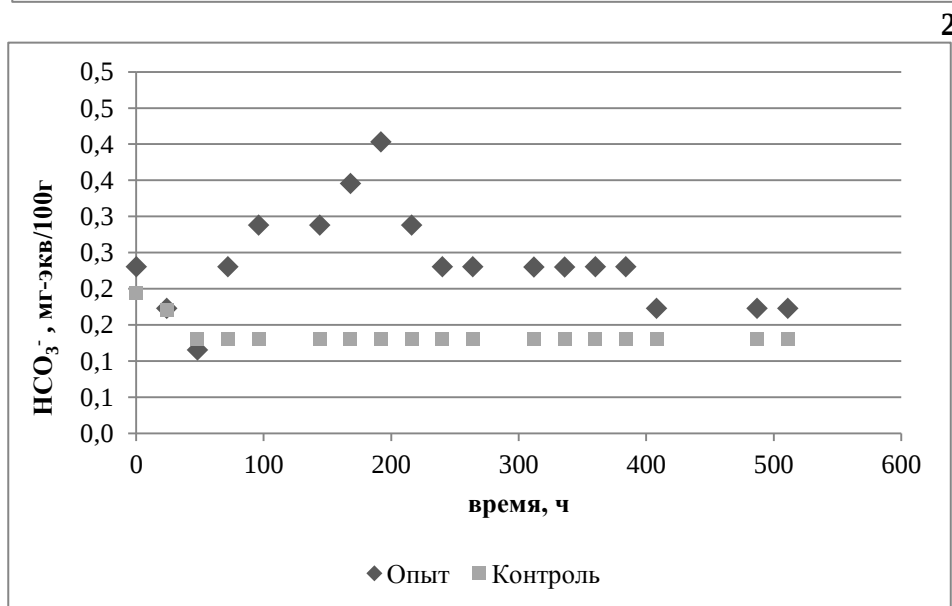
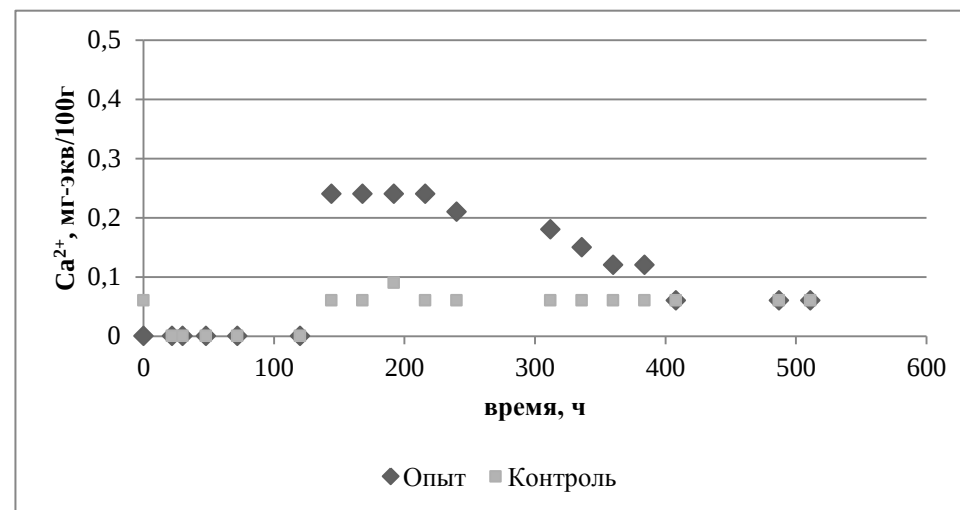
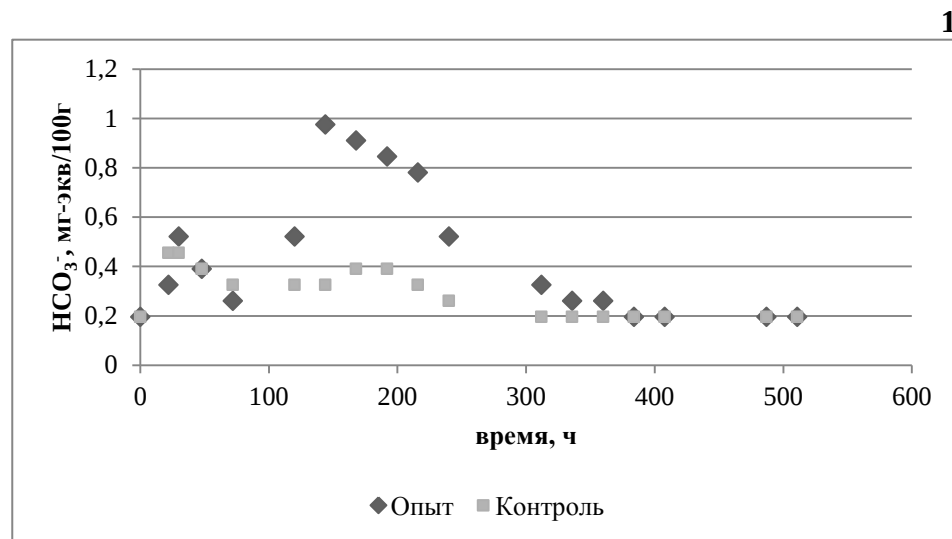


Рис. 49. Изменение pH (слева) и Eh (справа) во времени суспензий на основе 1 – пылеватого песка («Новодевичий»); 2 – суглинка («Коломенское»); 3 – суглинка («Каширская»); 4 – глины («юрская глина»). «Опыт» – суспензия с раствором глюкозы; «Контроль» - с водой



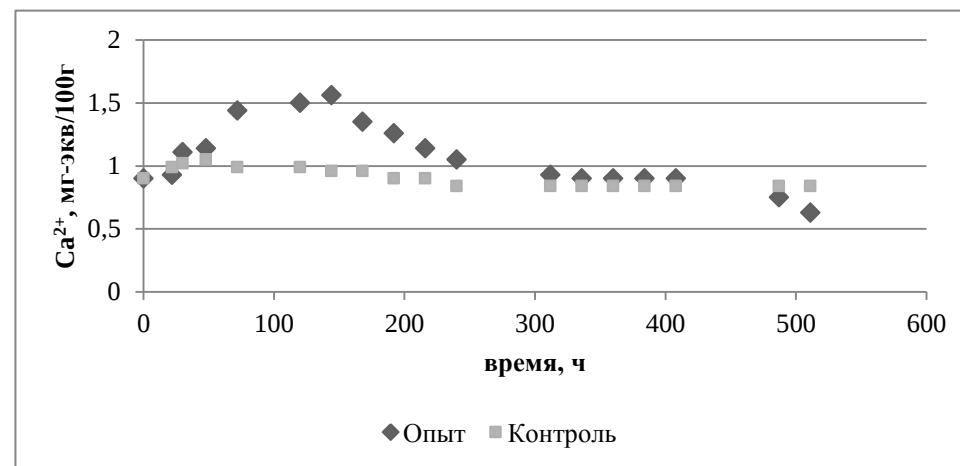
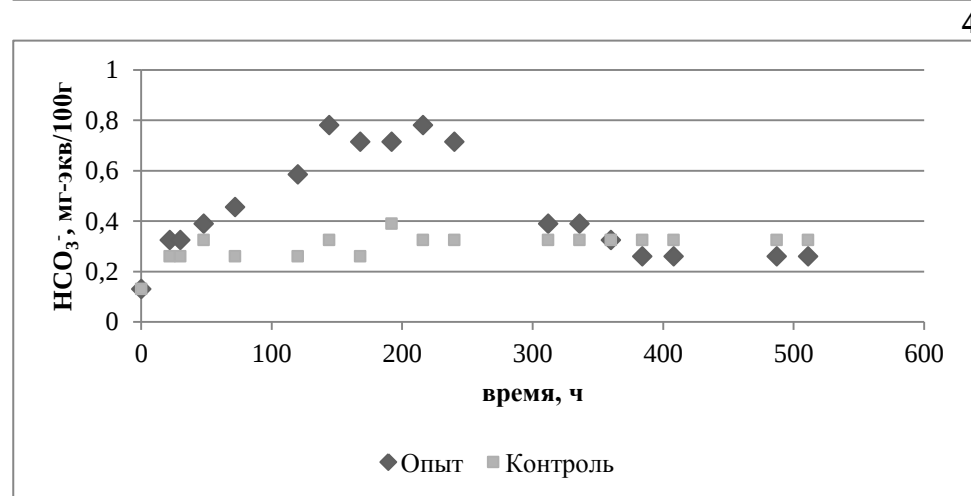
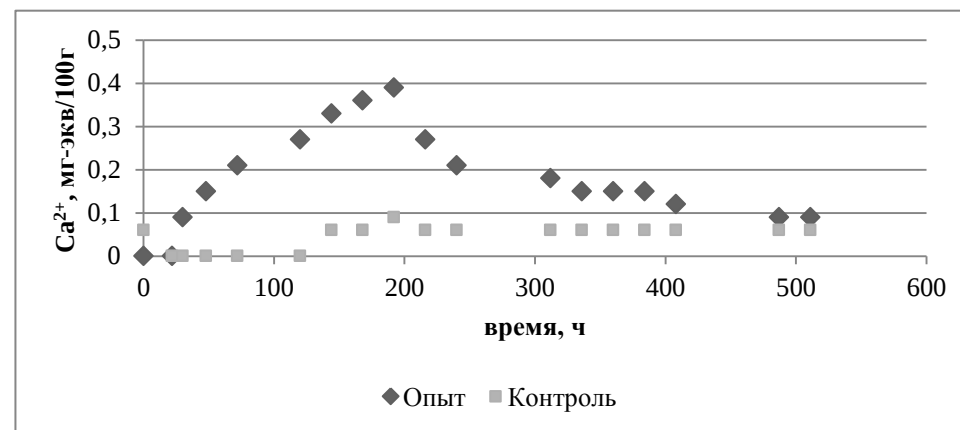
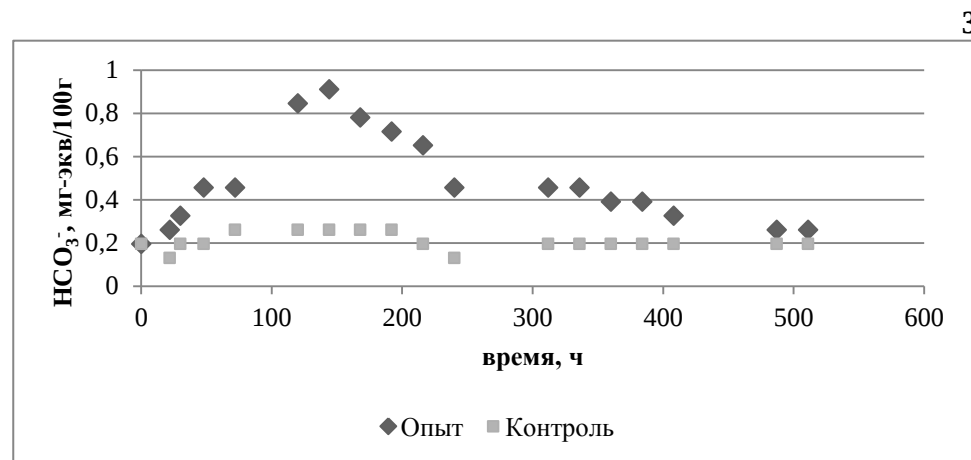
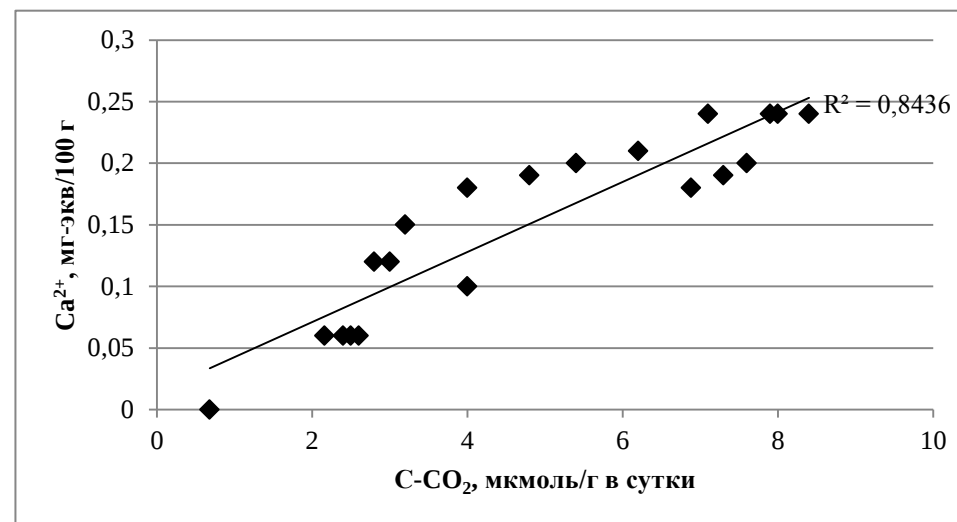
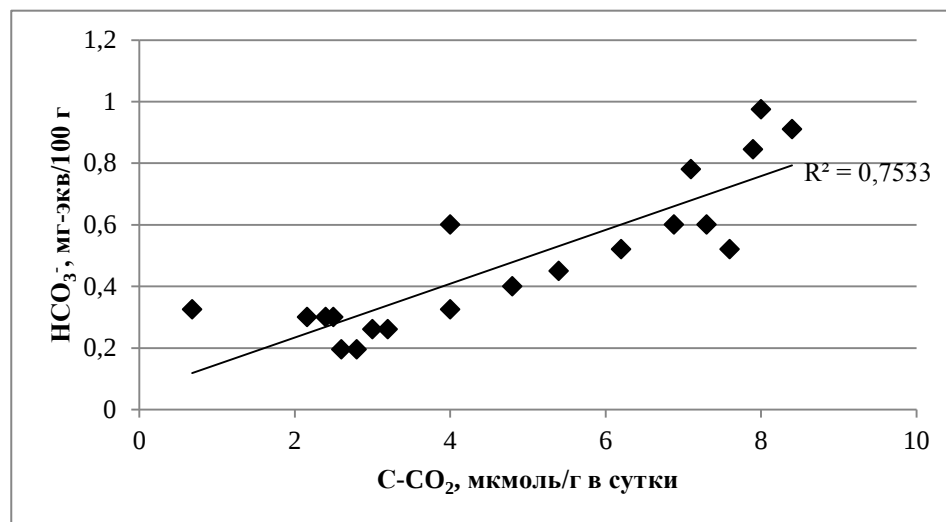
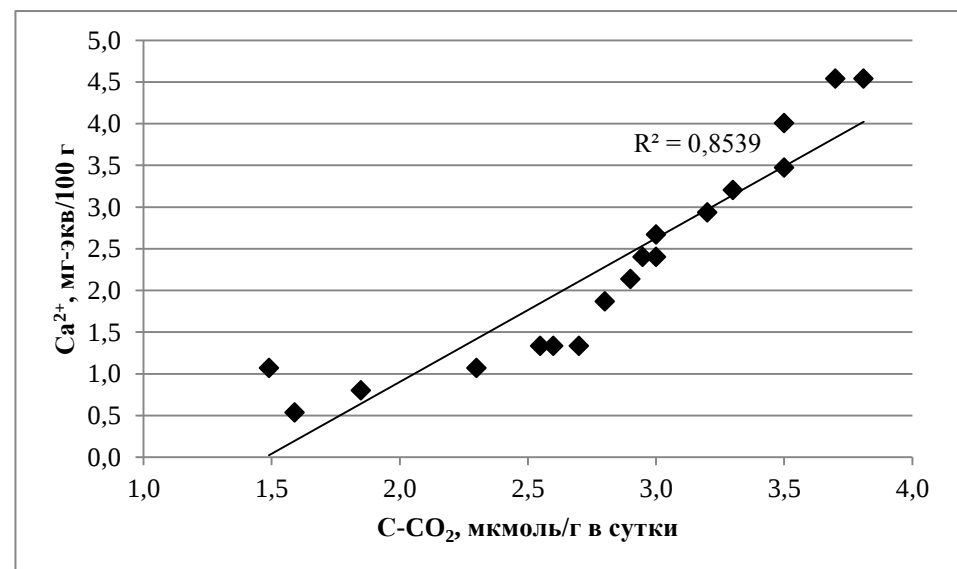
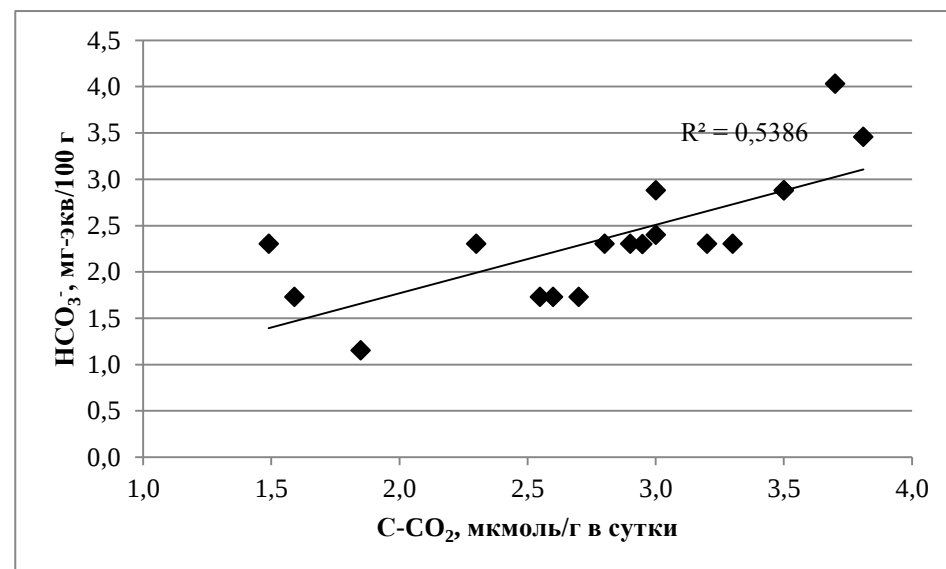


Рис. 50. Изменение содержания ионов HCO_3^- (слева) и Ca^{2+} (справа) во времени в суспензиях на основе 1 – пылеватого песка («Новодевичий»); 2 – суглинка («Коломенское»); 3 – суглинка («Каширская»); 4 – глины («юрская глина»). «Опыт» – суспензия с раствором глюкозы; «Контроль» – с водой

1



2



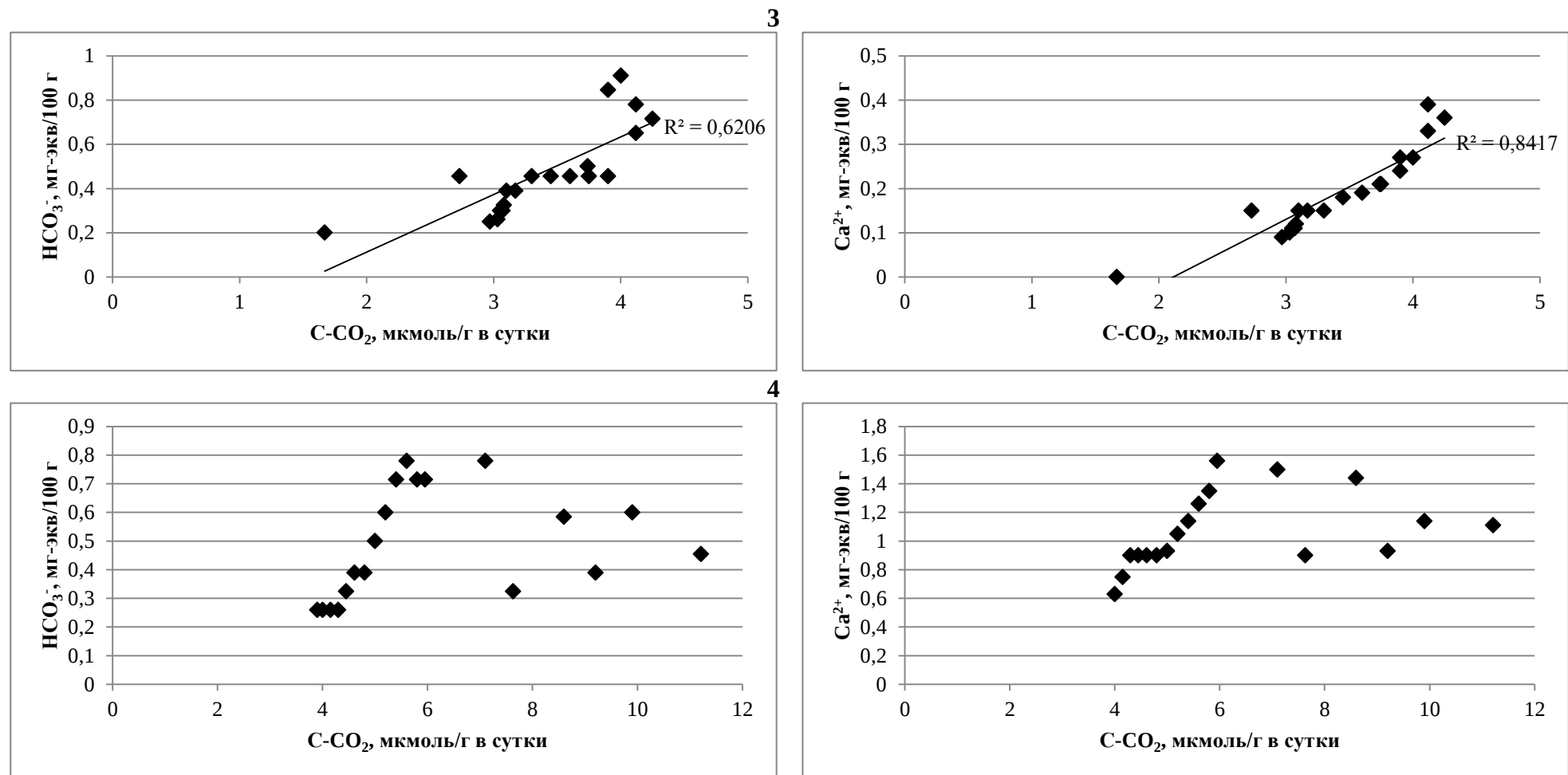


Рис. 51. Корреляция между содержанием ионов HCO_3^- (слева) и Ca^{2+} (справа) в суспензиях и активности дыхания микроорганизмов

1 – пылеватый песок («Новодевичий»); 2 – суглинок («Коломенское»); 3 – суглинок («Каширская»); 4 – глина («юрская глина»).

5.2. Изменение строения грунтов

5.2.1. Понятия «биогенные» и «биогенно обусловленные» структурные связи

Для описания изменения строения грунта следует определиться с понятиями «биогенные» и «биогенно обусловленные» структурные связи. По [Грунтоведение, 2005] к биогенным структурным связям в грунтах относятся: биоэлектростатические структурные связи, обусловленные наличием у живых клеток определенного заряда; биохимические структурные связи, образующиеся за счет ферментов, продуктов метаболизма и формирования биоцемента, а также менее значимые в рамках настоящей работы фитогенные и зоогенные структурные связи.

В почвоведении считается, что одним из главных факторов формирования микроагрегатов является избирательная адгезия клеток бактерий и гифов грибов к твердым частицам для извлечения необходимых для жизнедеятельности элементов [Tisdall and Oades, 1982; Звягинцев, 1987; Nichols and Halvorson, 2013 и др.]. В благоприятных для жизнедеятельности условиях мицелий микрогрибов и актиномицетов может достигать существенной длины (несколько м на г грунта) [Звягинцев и др., 2005]. Отдельными своими частями они плотно прикрепляются к частицам для извлечения необходимых для жизнедеятельности элементов и механически опутывают твердые частицы.

Выделяемые в процессе метаболизма органические вещества могут соединяться с компонентами грунта и элементами и соединениями в поровом растворе, образуя нерастворимые комплексы, обладающие «склеивающими» свойствами. Размер молекул таких соединений может быть сопоставим с размером частиц [Nichols, Halvorson, 2013]. В процессе метаболизма микроорганизмов могут образовываться новые нерастворимые соединения [Atekwana et al., 2006], обуславливая появление цементационных контактов между частицами.

Таким образом, в настоящей работе под **биогенными структурными связями** будем понимать структурные связи, образованные при **непосредственном участии клеток микроорганизмов за счет явлений различной природы** – наличия заряда и формирования электростатических связей, физико-химической адгезии клеток к частицам грунта для извлечения элементов, механического спутывания частиц мицелиальными клетками и т.д. **Под биогенно обусловленными структурными связями** будем понимать структурные связи химической и физико-химической природы, **сформированные за счет выделения различных продуктов метаболизма, в том числе, биоцемента.**

На рис. 52 представлено РЭМ-изображение крупного агрегата аллювиального суглинки (2) и мицелиальной колонии (1) микроорганизмов. Нитевидные клетки глубоко проникают в глинистые агрегаты (или толстые рубашки вокруг зерен породообразующих

минералов). Такие мицелиальные колонии способны ветвиться, проникать в несколько твердых частиц, скрепляя их. Тем самым образуется биогенный контакт между твердыми частицами грунта (рис. 53).

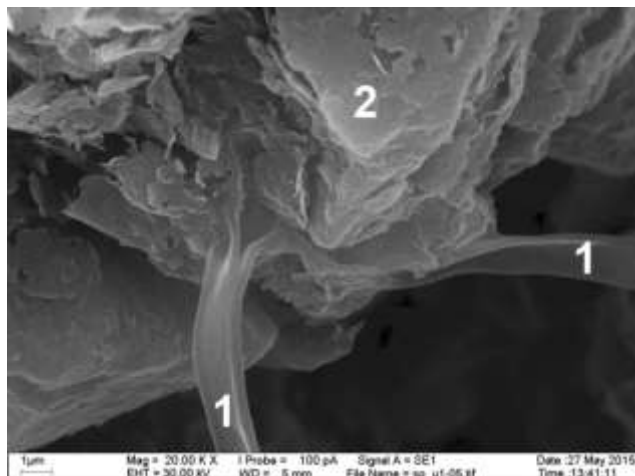


Рис. 52. Взаимодействие крупного агрегата (2) и мицелиальной колонии микроорганизмов (1) в образце аллювиального суглинка на 7 сутки после увлажнения глюкозой. Увеличение 20 000 (фото М.С. Чернова)

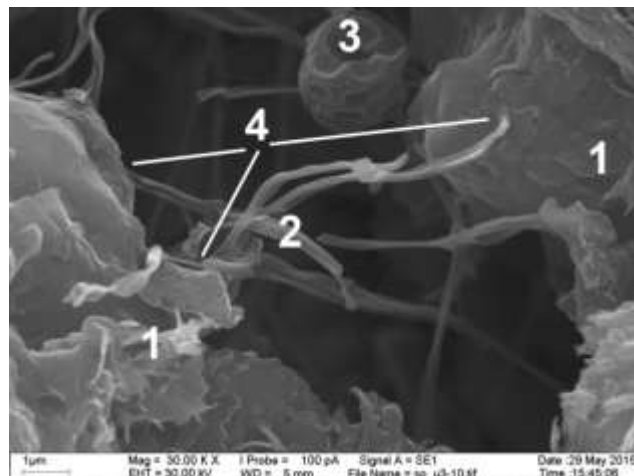


Рис. 53. Общий вид биогенного контакта в образце морской глины юрского возраста («юрская глина») на 7 сутки после увлажнения глюкозой. Увеличение 30 000 (фото М.С. Чернова): 1 – частицы грунта (микроагрегаты); 2 – мицелиальные колонии клеток; 3 – спиралевидная колония бактерий; 4 – места прикрепления клеток к частицам грунта

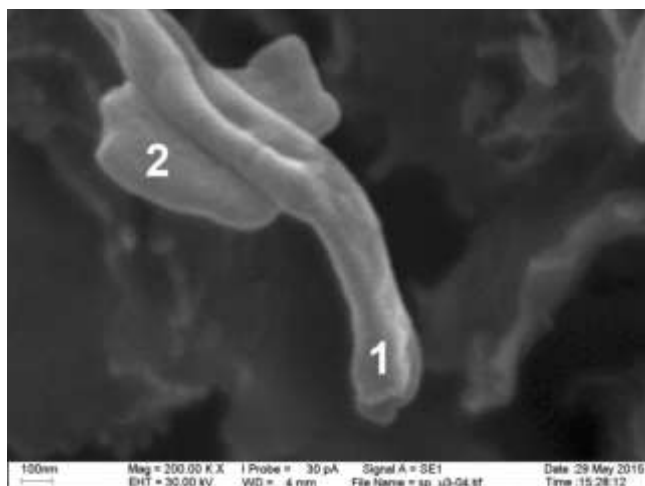


Рис. 54. Мицелиальная колония микроорганизмов (1), плотно прикрепившаяся к твердой частице (2) в образце аллювиального суглинка на 7 сутки после увлажнения глюкозой. Увеличение 200 000 (фото М.С. Чернова)

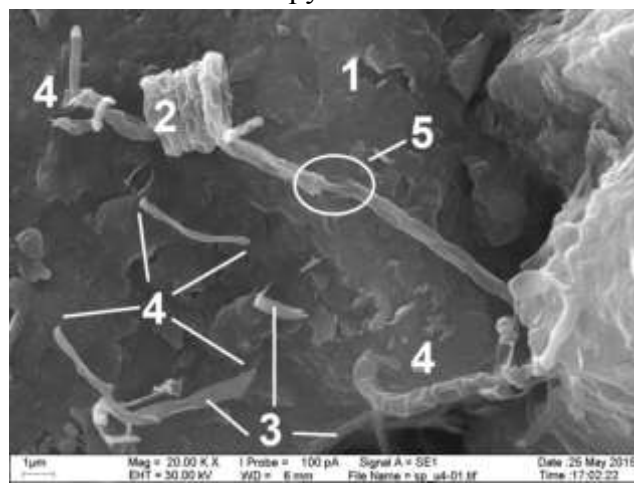


Рис. 55. Множественные контакты микроорганизмов с агрегатом в образце аллювиального суглинка: 1 – грунтовой микроагрегат; 2 – колония клеток бактерий, формирующая цепь и спирали; 3 – мицелий микроорганизмов; 4 – места проникновения клеток в микроагрегат; 5 – адгезионный контакт отдельной клетки колонии с микроагрегатом. Увеличение 20 000 (фото М.С. Чернова)

Развиваясь в грунте, клетки могут плотно прикрепляться к отдельным частицам. По мере роста колонии, возможно возникновение механических напряжений, что приводит к отрыву частицы от агрегата. Она остается подвешенной на живой клетке в межагрегатном пространстве. При этом за счет выноса отдельных элементов изменяется форма частицы – края становятся менее четкими, уменьшается толщина в месте прикрепления клетки (рис. 54).

Известно, что прочность прикрепления клеток к грунтовым частицам достаточно велика [Звягинцев и др., 2005]. При этом данных о прочности самой клетки/колонии клеток в литературе практически нет. Существуют оценки, что модуль сдвига живых клеток находится в диапазоне 10^{-1} - 10^5 Па [Atekwana et al., 2006]. Таким образом, следует предполагать, что при внешнем воздействии будут разрушаться не связи между клетками и грунтовыми частицами, а само живое вещество, и прочность индивидуального биогенного контакта будет заметно ниже, чем абиогенных (коагуляционных и точечных). Однако это предположение требует специальных исследований.

Биогенно обусловленные контакты невозможно четко различить на РЭМ-изображениях. Вероятно, часть связей внутри агрегата формируется за счет органических продуктов метаболизма и биоцемента. Тем не менее, неизвестно, как влияет сублимационное высушивание на эти вещества и как преобразуется агрегат в результате такой обработки.

Помимо формирования новых структурных связей в грунтах при протекании микробиологических процессов следует ожидать и разрушения существующих контактов. Агрегаты, связанные непосредственно через живые клетки, будут распадаться при отмирании этих клеток. В процессе метаболизма микроорганизмы разлагают органические вещества, которые в исходном грунте могут быть фактором структурообразования. Разрушение цемента грунта (прежде всего, широко распространенного в природных грунтах цемента за счет соединений трехвалентного железа) может происходить при непосредственном участии микробных клеток. Например, микроорганизмы получают необходимую энергию в ходе окислительно-восстановительных реакций, при которых нерастворимое трехвалентное железо переходит в растворимую двухвалентную форму, и цемент разрушается. С другой стороны, растворение цементирующих соединений возможно при участии побочных продуктов жизнедеятельности организмов. В предыдущем разделе описано растворение кальцита при насыщении порового раствора углекислым газом, образующимся при дыхании микроорганизмов.

Таким образом, стоит говорить не только о создании биогенных и биогенно обусловленных структурных связей в грунтах с высокой микробиологической активностью,

но и о разрушении существующих структурных связей непосредственно за счет клеток микроорганизмов и побочных продуктов метаболизма.

5.2.2. Изменение строения грунтов по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ)

На основании изучения РЭМ-изображений образцов, полученных В.Н. Соколовым и М.С. Черновым, проведен анализ изменения микростроения различных грунтов. На рис. 56 приведены РЭМ-изображения зерен *природного мелкого флювиогляциального песка* (f,lgQ_{1st}-Q_{II}dns) при разном увеличении. При подготовке пробы к анализу отмечена идеальная сыпучесть препарата, образец не держал форму, поэтому следует говорить об изучении отдельных зерен песка и контактов, образовавшихся при формовании пробы. Глинистые рубашки вокруг кварцевых зерен тонкие; утолщение и формирование различных глинистых агрегатов происходит только в местах сколов и дефектов на поверхности зерен (рис. 56, а). Между зернами формируются точечные контакты (рис. 56, б), а также возможны контакты механического зацепления.

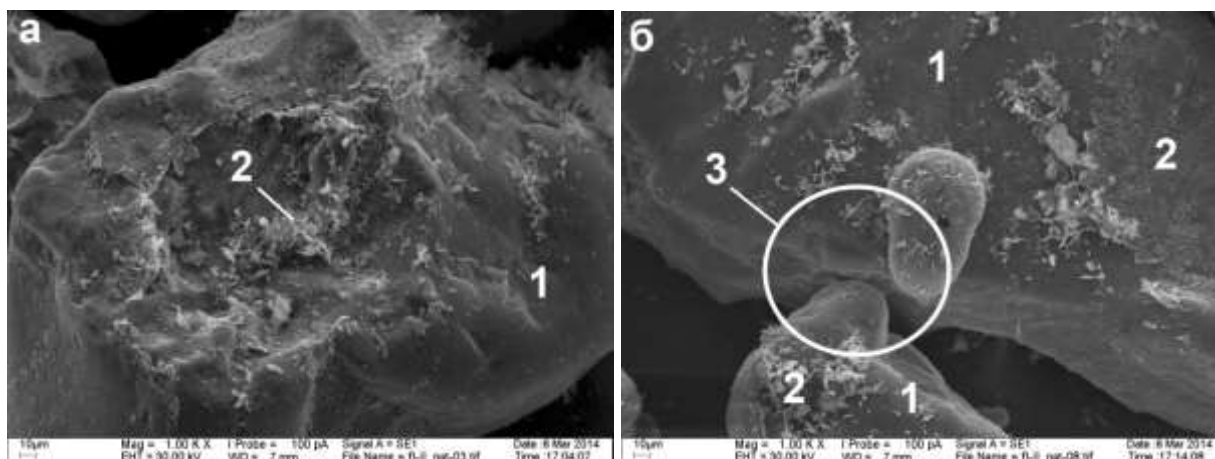


Рис. 56. РЭМ-изображения зерна природного мелкого флювиогляциального песка (а) и точечный контакт между зернами (б). 1 – кварцевое зерно, покрытое тонкой глинистой рубашкой; 2 – места утолщения глинистых рубашек в активных зонах зерен; 3 – точечный контакт между зернами. Увеличение 1000 (фото В.С. Соколова)

На 7 сутки после увлажнения образца глюкозой поверхность кварцевых зерен в песке покрывается «матом» из колоний клеток различной формы (изометричных и нитевидных), которые прикрепляются к глинистой рубашке зерна в отдельных точках (рис. 57, а). Колонии и клетки формируют крупные ветвящиеся нити (рис. 57, б), которые присоединяются к глинистой рубашке соседнего зерна, образуя биогенный контакт. Пространство между

частицами заполняется неоднородным матриксом из биомассы и глинистого материала (рис. 57, в).

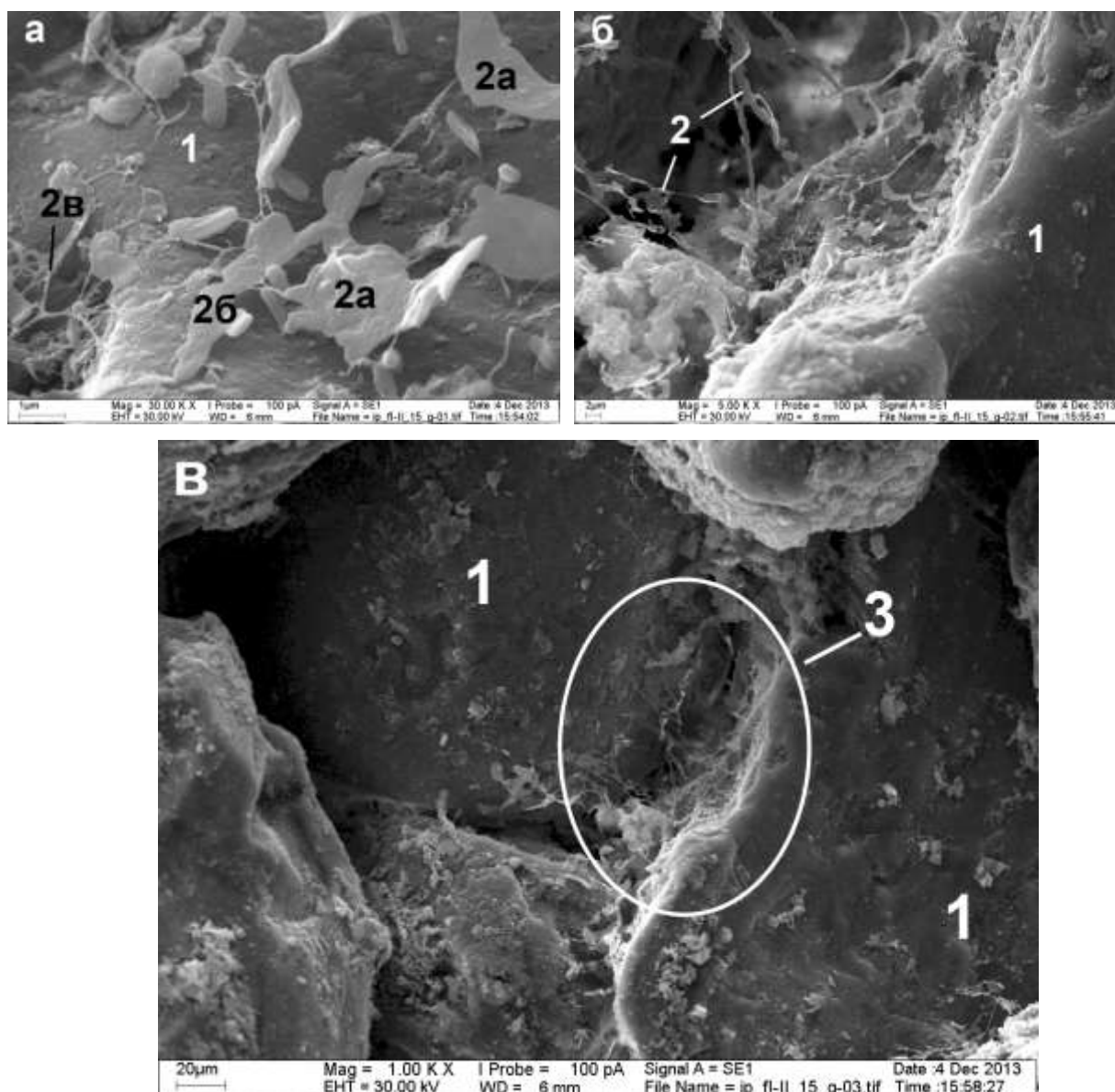


Рис. 57. РЭМ-изображение структуры природного мелкого флювиогляциального песка на 7 сутки после увлажнения глюкозой при различных увеличениях: а – 30 000; б – 5 000; в – 1 000: 1 – поверхность кварцевого зерна, покрытого «матом» из колоний и клеток (2) различной формы (2а – изометричные, 2б – нитевидные, 2в – мицелиальные), которые формируют биогенный контакт между соседними зёрнами (3) (фото М.С. Чернова)

На рис. 58 приведены РЭМ-изображения структуры техногенного пылеватого песка («Новодевичий») до увлажнения глюкозой (а) и через 15 суток сукцессии (б). Несмотря на худшее качество фотографии 58, б, заметно, что структура глинистого матрикса между крупными частицами стала менее упорядоченной, края частиц неровные, что подтверждает данные рентгеноструктурного анализа о повышении дефектности структуры глинистых минералов. Четко различаемых клеток микроорганизмов на снимке не видно.

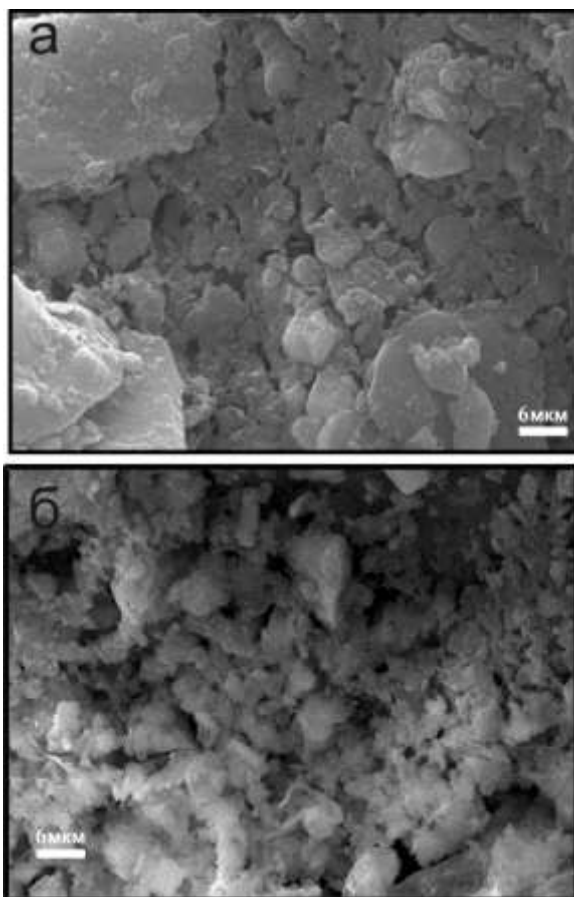


Рис. 58. РЭМ-изображения образца техногенного пылеватого песка («Новодевичий»):

а – до обработки глюкозой; б – после 15 суток сукцессии (пояснения в тексте)

На рис. 59 приведена микрофотография строения искусственно уплотненного образца (нарушенной структуры) на основе аллювиального суглинка и воды (контроль). На снимке видны отдельные нити клеток и колоний микроорганизмов, что, вероятно, связано с хранением образца в течение 7 дней в воздушно-влажных условиях в эксикаторе над водой. Общая структура грунта неоднородная, встречаются отдельные крупные зерна с тонкой глинистой рубашкой и крупные микроагрегаты, состоящие из дисперсных частиц.

В образце искусственно уплотненного грунта с раствором глюкозы после 7 суток сукцессии количество клеток микроорганизмов в несколько раз больше, чем в контрольном (рис. 60). Нитевидные клетки опутывают твердые частицы и агрегаты, формируя макроагрегат (рис. 60, а). К одному зерну прикрепляются несколько различных видов колоний и клеток (рис. 60, б), в

результате соседние агрегаты оказываются скреплены десятками нитей (рис. 60, в).

На рис. 61 приведена микрофотография строения искусственно уплотненного образца (нарушенной структуры) на основе «юрской глины». Следует отметить неоднородность строения образца, крупные частицы оказываются замешанными в глинистом матриксе. На 7 сутки сукцессии вокруг частиц видны мощные глинистые рубашки, что говорит об образовании абиогенных контактов в грунте нарушенного строения. В поровом пространстве грунта развиваются различные микроорганизмы, между соседними агрегатами формируются биогенные контакты (рис. 62). Тем не менее, не отмечается формирование сложных макроагрегатов из частиц грунта и клеток микроорганизмов, как в аллювиальном суглинке.

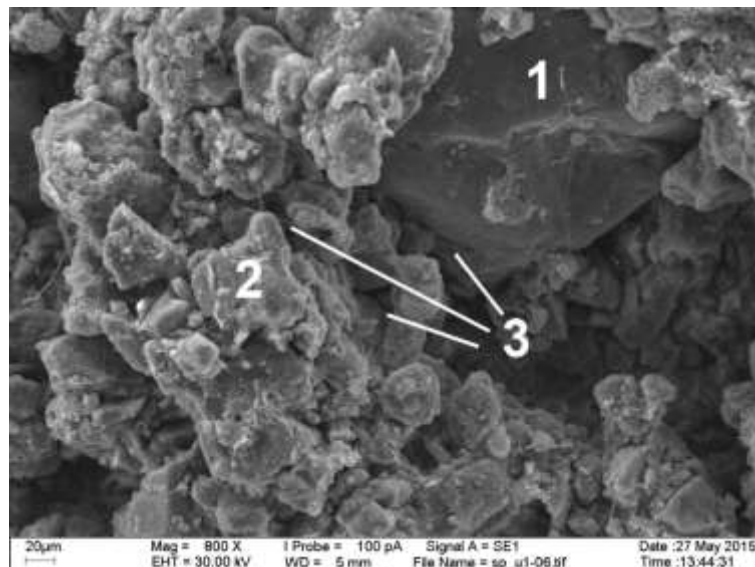


Рис. 59. РЭМ-изображение структуры образца на основе аллювиального суглинка и воды (контроль): 1 – отдельные крупные частицы с тонкими глинистыми рубашками; 2 – глинистые агрегаты; 3 – очень тонкие и едва различимые нити микроорганизмов.

Увеличение 800 (фото М.С. Чернова)

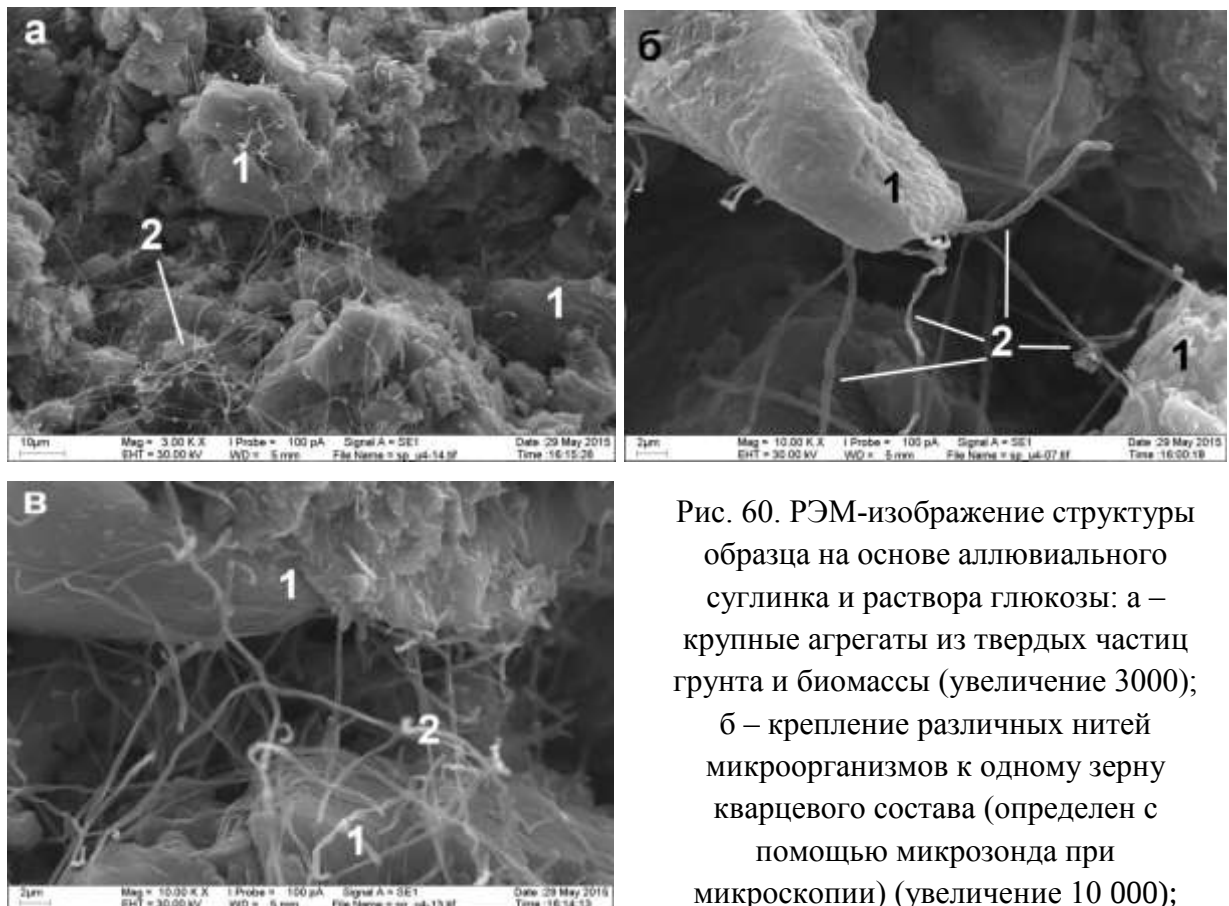


Рис. 60. РЭМ-изображение структуры образца на основе аллювиального суглинка и раствора глюкозы: а – крупные агрегаты из твердых частиц грунта и биомассы (увеличение 3000); б – крепление различных нитей микроорганизмов к одному зерну кварцевого состава (определен с помощью микрозонда при микроскопии) (увеличение 10 000);

в – формирование биогенного контакта за счет множества нитей микроорганизмов (увеличение 50 000). 1 – твердые частицы и агрегаты; 2 – нити микроорганизмов (фото М.С. Чернова)

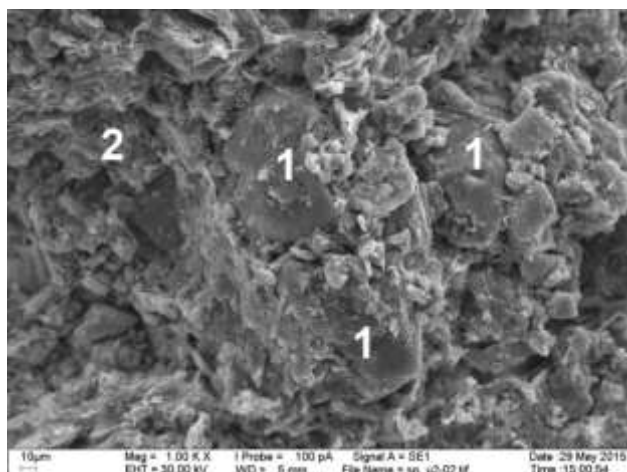


Рис. 61. РЭМ-изображение структуры образца на основе «юрской глины» и воды (контроль): крупные частицы (1), перемешанные с глинистым матриксом (2) (увеличение 1000, фото М.С. Чернова)

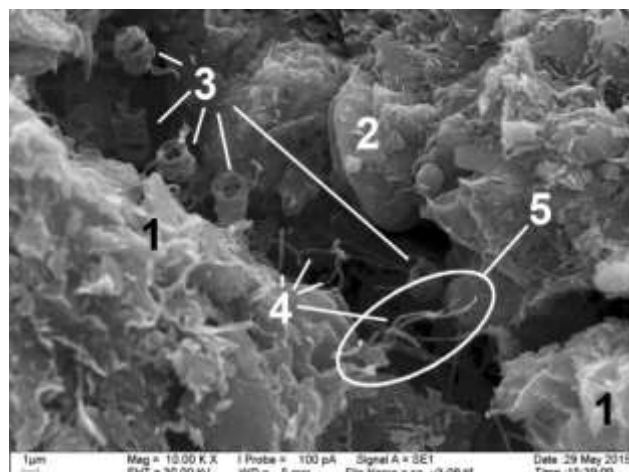


Рис. 62. РЭМ-изображение структуры образца на основе «юрской глины» и глюкозы. 1 – частицы и агрегаты грунта; 2 – обломок фауны; 3 – спиралевидные колонии бактерий; 4 – нитевидные клетки и колонии; 5 – биогенный контакт между соседними частицами. Увеличение 10 000 (фото М.С. Чернова)

5.2.3. Изменение микроагрегатного состава грунтов

Во всех изученных образцах грунтов при активизации микробного комплекса отмечалось увеличение содержания агрегатов крупных (песчаных) фракций. В зависимости от состава и строения исходных грунтов и методики активизации микроорганизмов (добавление питательного вещества – глюкозы – или обработка накопительной культурой микроорганизмов) частицы агрегировались по-разному.

В образце *аллювиального суглинка* в момент наибольшей активности микроорганизмов отмечается агрегация частиц в крупные ($>0,25$ мм) и мелкие (0,1-0,05 мм) агрегаты (рис. 63-64). Пропорциональное (в пределах ошибки пипеточного метода) уменьшение содержания фракций 0,25-0,1 мм и 0,05-0,01 мм позволяет предположить, что агрегация в более крупные структурные элементы происходит за счет этих фракций. При уменьшении микробиологической активности к 28 суткам сукцессии содержание крупных агрегатов увеличилось, а мелких – уменьшилось. Несколько увеличилось содержание агрегатов фракций 0,25-0,1 мм и 0,05-0,01 мм.

В образце «юрской глины» не наблюдается увеличение содержания агрегатов $>0,25$ мкм, при этом на 7 сутки почти в 5 раз возрастает содержание частиц фракции 0,1-0,05 мм (рис. 63-64), распределение частиц по фракциям становится более равномерным. Аналогично образцу аллювиального суглинка, отмечено уменьшение агрегатов фракций

0,25-0,1 мм и 0,05-0,01 мм. При снижении микробной активности содержание фракции 0,1-0,05 мм также уменьшается.

В *природных суглинках основания Камской ГЭС* также отмечено увеличение содержания частиц фракции 0,1-0,05 мм после недельной обработки накопительной культурой микроорганизмов и уменьшение содержания агрегатов смежных фракций (0,25-0,1 мм и 0,05-0,01 мм) (рис. 65-66) [Иванов, 2013].

Во всех изученных образцах *техногенных грунтов* отмечалась агрегация частиц в крупные агрегаты ($> 0,25$ мм) (рис. 67 и 68). Количество этих агрегатов увеличивалось на протяжении всего опыта. В суглинке («Коломенская») отмечался рост содержания агрегатов размером 0,5–0,25 мм на всем протяжении опыта (рис. 67-68). В пылеватом песке («Новодевичий») и суглинке («Каширская») наблюдалось увеличение количества частиц этой фракции на 7-14 сутки, но к концу опыта оно снизилось до близких к исходным значений. В обоих образцах суглинков («Коломенская» и «Каширская») увеличилось содержание частиц фракции 0,05–0,01 мм на 7 и 15 сутки. К 30 суткам количество этих частиц уменьшилось и было чуть больше исходного. В пылеватом песке («Новодевичий») содержание этой фракции резко уменьшилось к 7 суткам и затем оставалось заметно меньше исходного на протяжении всего опыта. Существенных изменений содержания мелких частиц (пылевато-глинистых частиц меньше 0,05 мм для пылеватого песка («Новодевичий») и частиц физической глины меньше 0,01 мм для суглинков не было выявлено [Иванов и др., 2015].

За счет формирования биогенных и биогенно обусловленных структурных связей происходит существенное изменение микроагрегатного состава. В техногенных грунтах в результате микробиологических процессов формируются крупные агрегаты ($>0,25$ мкм), которые частично распадаются при уменьшении микробиологической активности. Исходная агрегируемость частиц низкая (распределение частиц по фракциям по результатам определения микроагрегатного состава близко к распределению первичных частиц по данным гранулометрического анализа), а структурные связи, оцененные по коэффициенту агрегированности по И.М. Горьковой, являются слабыми (см. главу 3). Специфическая природная дисперсность техногенных грунтов (одновременное значительное содержание частиц мелкопылевой и глинистой фракций и крупной и среднеспесчаной фракций) обуславливает специфическое строение этих грунтов – вокруг крупных зерен песчаного размера формируются плотные рубашки из глинистого материала.

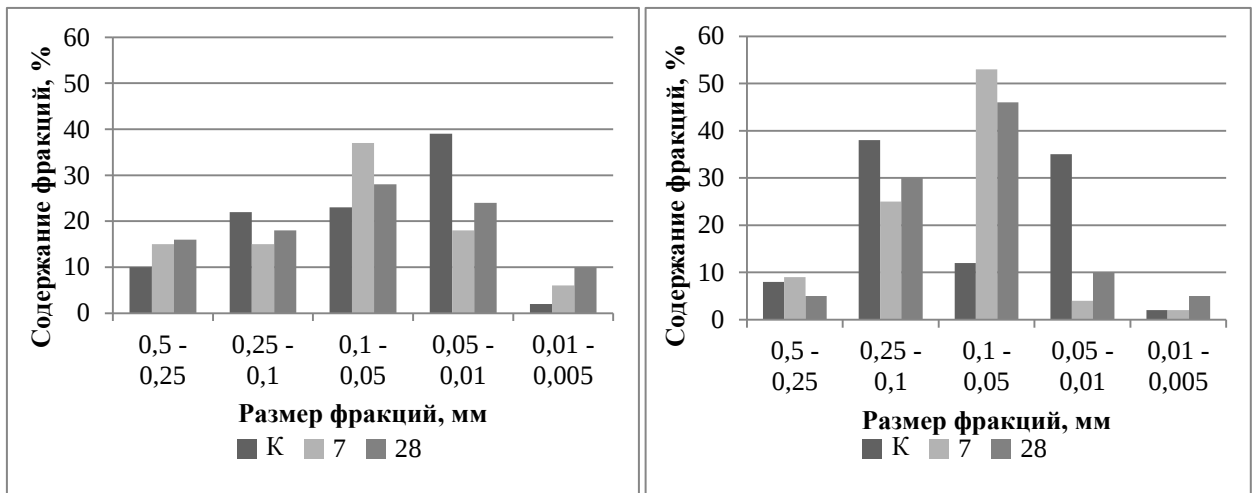


Рис. 63. Гистограммы микроагрегатного анализа «аллювиального суглинка» (а) и «юрской глины» (б) на разные сроки сукцессии:

к – контрольный образец (исходный грунт); 7 – после 7 суток; 28 – после 28 суток сукцессии

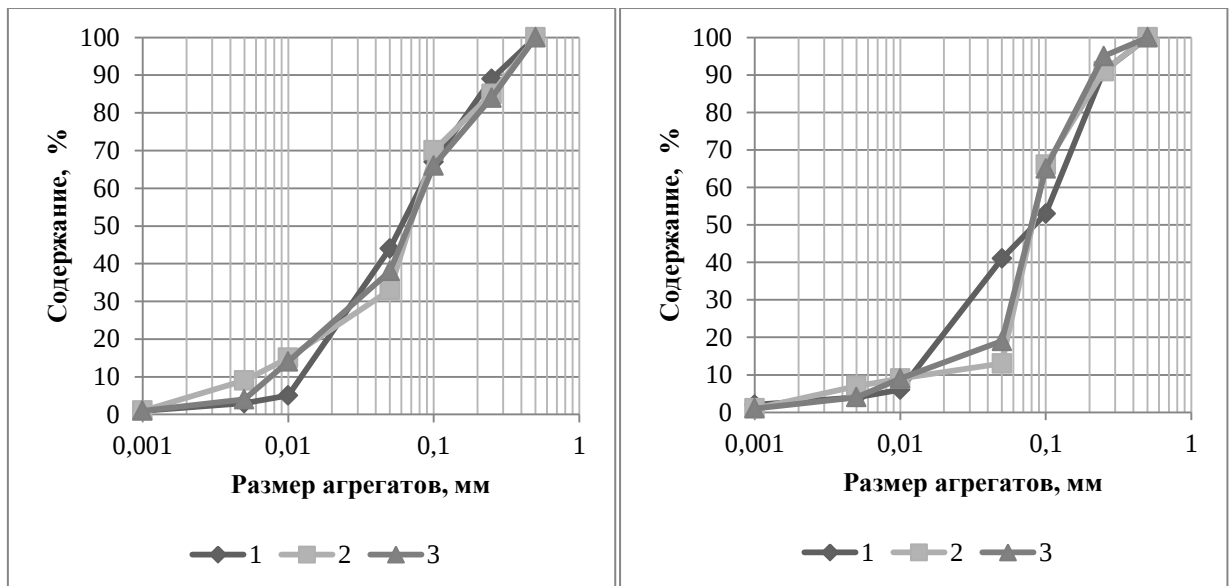


Рис. 64. Интегральные кривые микроагрегатного состава в образцах «аллювиального суглинка» (а) и «юрской глины» (б) на разные сроки сукцессии:

1 – контрольный образец (исходный грунт); 2 – после 7 суток;
3 – после 28 суток сукцессии

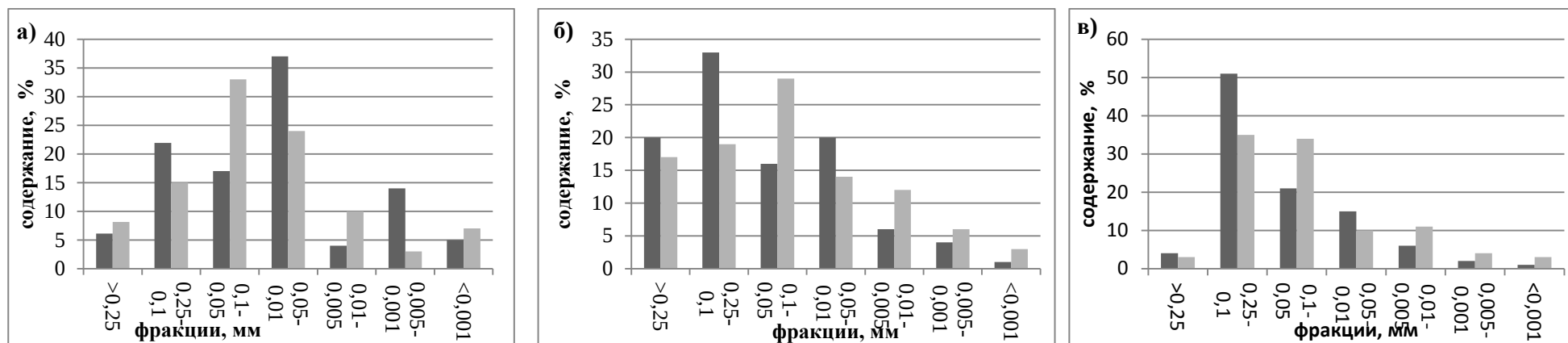


Рис. 65. Гистограммы микроагрегатного состава грунтов основания Камской ГЭС до и после обработки микроорганизмами:

а) – суглинка тяжелого пылеватого(9,3-9, 6 м) ; б) – суглинка легкого песчанистого (8,0-8,3 м);

в) – суглинка легкого песчанистого (6,5-6,8 м)

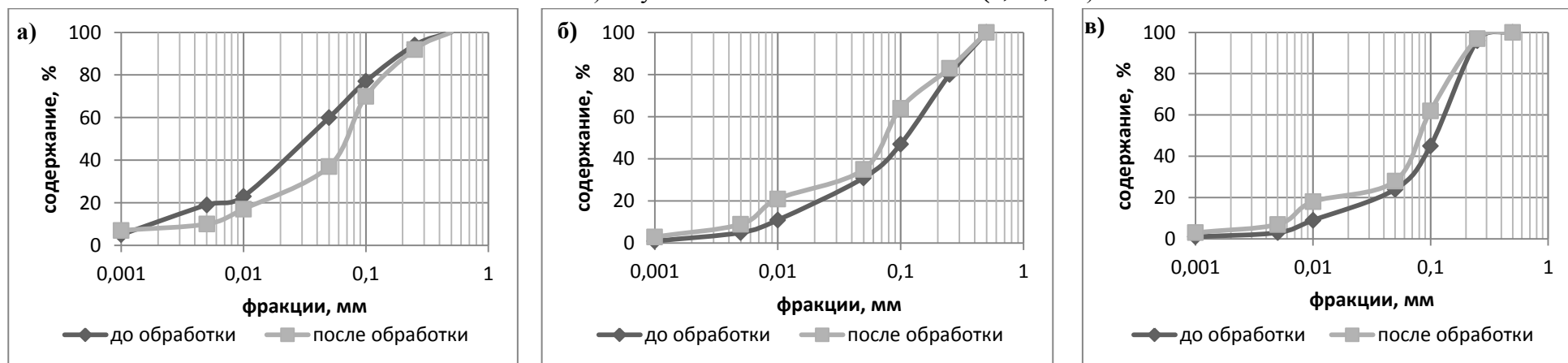


Рис. 66. Интегральные кривые микроагрегатного состава грунтов основания Камской ГЭС до и после обработки микроорганизмами:

а) – суглинка тяжелого пылеватого(9,3-9, 6 м) ; б) – суглинка легкого песчанистого (8,0-8,3 м);

в) – суглинка легкого песчанистого (6,5-6,8 м)

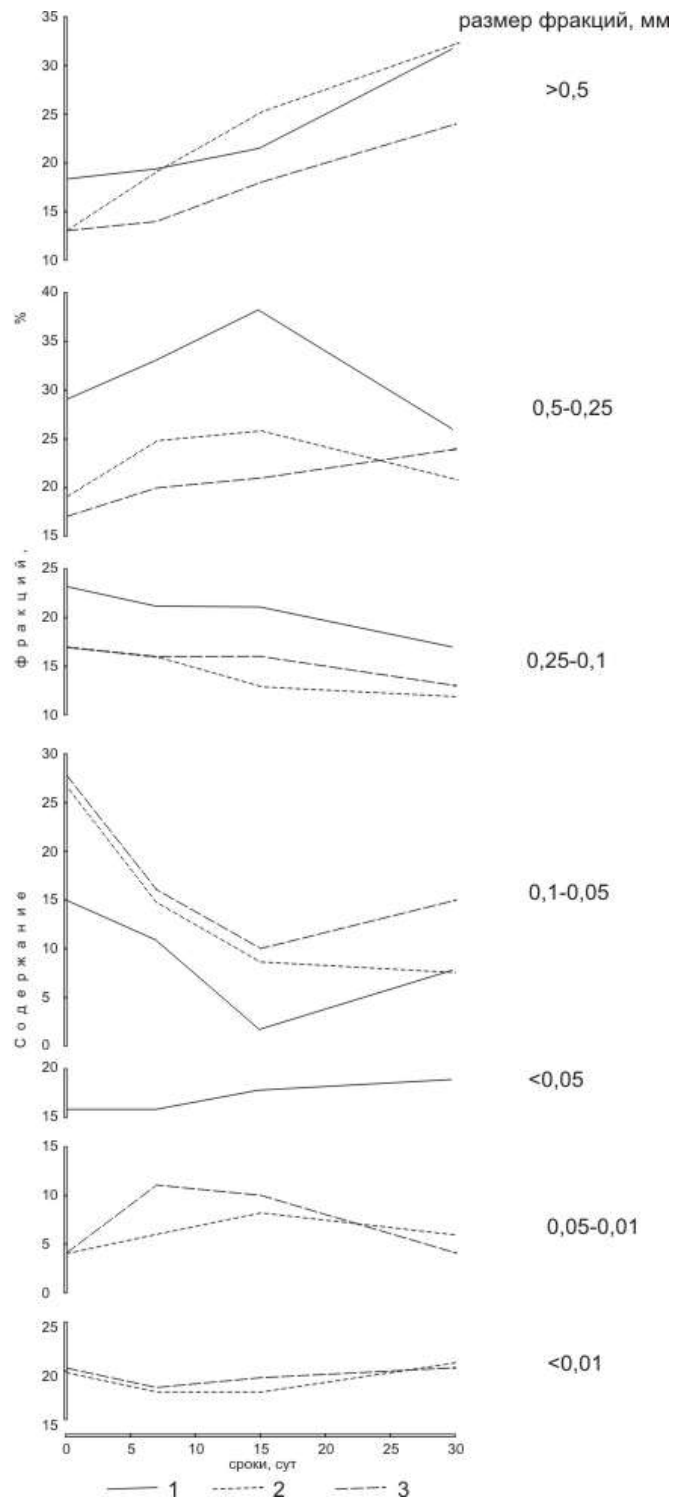


Рис. 67. Изменения количественного содержания агрегатов различных фракций после добавления раствора глюкозы для образцов: 1 – песка пылеватого («Новодевичий»); 2 – суглинка («Коломенская»); 3 – суглинка («Каширская»)

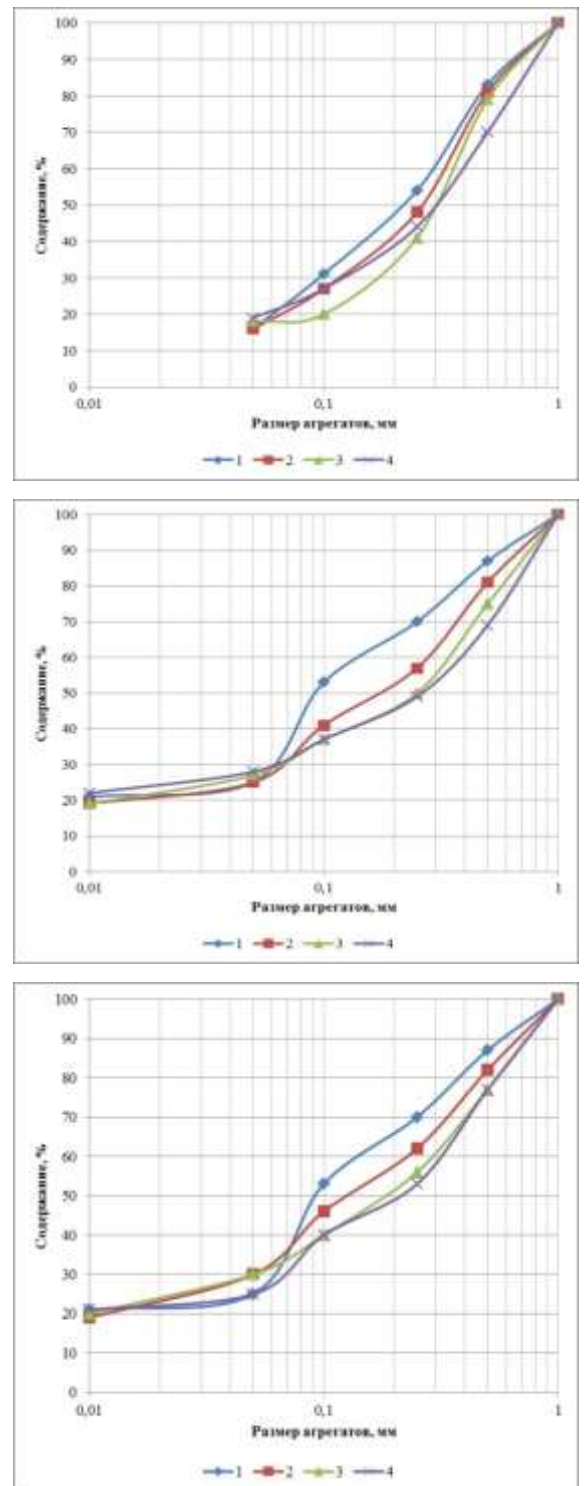


Рис. 68. Интегральные кривые микроагрегатного состава до и после увлажнения раствором глюкозы: а – песка пылеватого («Новодевичий»); б – суглинка («Коломенская»); в – суглинка («Каширская»): 1 – до увлажнения раствором глюкозы; 2, 3, 4 – на 7-е, 15-е 30-е сутки после увлажнения соответственно

Бактериальные клетки и мицелий грибов, адгезируясь к глинистому материалу для потребления отдельных элементов и соединений, «склеивают» и «спутывают» частицы в крупные агрегаты. При уменьшении биомассы агрегаты частично распадаются, а частично удерживаются, вероятно, биогенно обусловленными структурными связями – за счет органических продуктов метаболизма и их комплексов с компонентами грунта. Коэффициент агрегированности по И.М. Горьковой [1985] уменьшается на 7 сутки со значений 1,1-1,8 у исходных грунтов до 1,05-1,4, то есть, формирующиеся биогенные связи оказываются слабее, чем у исходных грунтов.

В литературе имеются данные, что основным агентом агрегации частиц грунта в крупные агрегаты при высокой микробиологической активности является мицелий грибов [Tisdall, 1994; Bearden and Petersen, 2000; Nichols and Halvorson, 2013]. По результатам микробиологических исследований отмечено существенное увеличение содержания мицелиальных организмов в техногенных грунтах (см. главу 4). Поэтому увеличение содержания крупных агрегатов можно объяснить деятельностью мицелиальных организмов. Напротив, уменьшение их количества к концу сукцессии может обуславливать распад части крупных агрегатов.

Развитием грибной биомассы следует объяснить также увеличение содержания крупных агрегатов в аллювиальном суглинке. В пользу этого объяснения говорит и тот факт, что в «юрской глине», в которой грибная биомасса в ходе сукцессии практически не развивается, содержание частиц размером $>0,25$ мкм не увеличивается. При обработке грунтов основания плотин Камской ГЭС накопительной культурой микроорганизмов, не содержащих грибы, не отмечается агрегация частиц в крупные агрегаты, при этом существенно возрастает содержание структурных элементов размером 0,1-0,05 мм.

Значительное увеличение содержания частиц фракций 0,1-0,05 мм следует объяснять адгезией клеток бактерий и формирования биоэлектростатических структурных связей в грунтах. Агрегаты такого размера по литературным данным формируются за счет клеток бактерий [Tisdall, 1994; Dexter, 1988]. При этом не стоит говорить об агрегации грунта, поскольку происходит уменьшение содержания частиц как более крупной фракции (0,25-0,1 мкм), так и более мелкой (0,05-0,01 мкм). Можно предположить, что за счет адгезии клеток к нескольким мелким агрегатам происходит агрегация частиц, а за счет химических преобразований (окислительно-восстановительных реакций, разрушения карбонатного и железистого цемента, реакций ионов металлов с органическими продуктами метаболизма и т.п.) распадаются более крупные агрегаты. Исходно высокие коэффициенты агрегированности по И.М. Горьковой (2,75 для аллювиального суглинка и 8,7 для «юрской глины») на 7 сутки заметно снижаются (до значений 1,5 и 2,8 соответственно), то есть,

биогенные структурные связи заметно слабее, чем коагуляционно-цементационные в исходных грунтах. При отмирании клеток большая часть частиц фракции 0,1-0,05 мкм не распадается. Возможно, происходит замена собственно биогенных структурных связей на биогенно обусловленные, за счет формирования кальцитового биоцемента (см. предыдущий раздел).

Еще одним возможным фактором агрегации являются реакции обмена одновалентных ионов на двухвалентные в межслоевом пространстве монтмориллонита. Рентгеноструктурный анализ показал увеличение содержания пакетов смектитового типа в смешанослойных минералах иллит-смектитового состава, а по результатам определения химического состава суспензии отмечено повышение концентрации ионов Ca^{2+} в результате микробиологической активности. Обмен одновалентных ионов (например, натрия) на кальций может привести к агрегации грунта в некрупные агрегаты.

Визуальным подтверждением процессов агрегации в грунтах является быстрое осаждение суспензии на основе грунта и раствора глюкозы (рис. 69). Уже через 30-60 секунд после взбалтывания большая доля частиц оседает, тогда как суспензия с водой остается во взвешенном состоянии. К тому же, при отборе глинистой фракции суспензии грунтов, увлажненных предварительно глюкозой, быстро коагулировали и через 2 часа оседали полностью (рис. 70). Добавление пирофосфата натрия приводило к образованию белых флоккул, которые, вероятно, были обогащены органическим веществом.



Рис. 69. Суспензии на основе техногенного пылеватого песка («Новодевичий» (слева) и «юрской глины» (справа), 30 с после взбалтывания: 12, 16 – суспензии с водой; 15, 18 – суспензии с раствором глюкозы

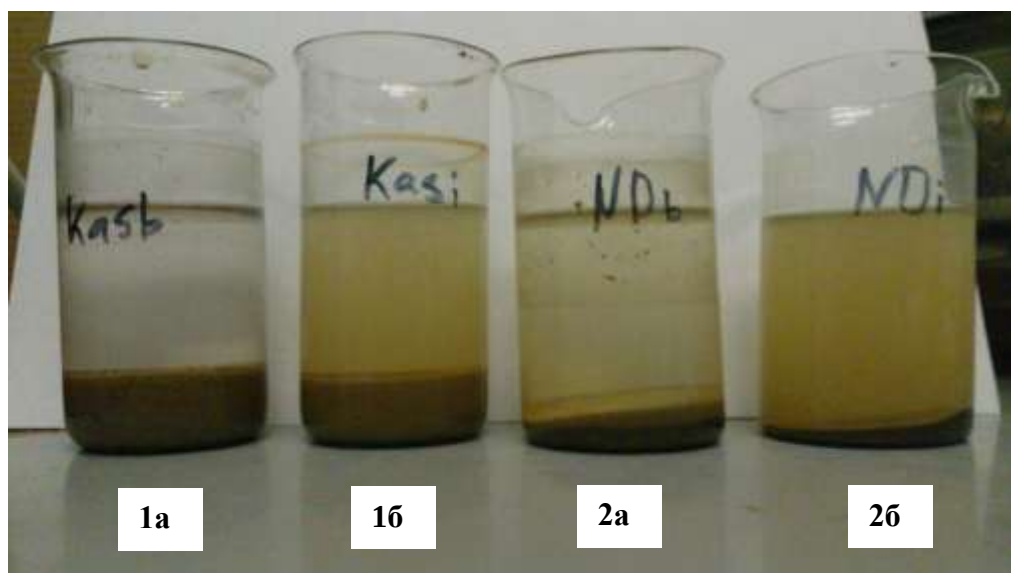


Рис. 70. Суспензии на основе грунтов, 2 ч после взбалтывания: 1 – суглинок («Каширская»); 2 – пылеватый песок («Новодевичий»); а – 7 суток после увлажнения глюкозой, б – исходный грунт

Несмотря на отчетливые изменения в структуре грунта по данным микроагрегатного анализа и РЭМ-изображений, на макроуровне изменения в структуре грунта по данным рентгеновской микротомографии для образцов искусственно уплотненных грунтов на основе «юрской глины» и «аллювиального суглинка» аQ_{III} (б) установить не удалось (рис. 71).

Таким образом, увлажнение грунтов раствором глюкозы приводит к формированию биогенных (непосредственно за счет живых клеток) и биогенно обусловленных (за счет продуктов метаболизма и их соединений с компонентами грунта) структурных связей. Происходит агрегация грунтов, уменьшается стойкость суспензий на их основе.

Третье защищаемое положение. В период максимальной микробной активности в грунтах формируются биогенные и биогенно обусловленные структурные связи за счет адгезии клеток, механического спутывания частиц грунта клетками и колониями клеток и взаимодействия продуктов метаболизма с твердым компонентом грунта, что приводит к формированию крупных агрегатов, которые частично распадаются при снижении микробиологической активности.

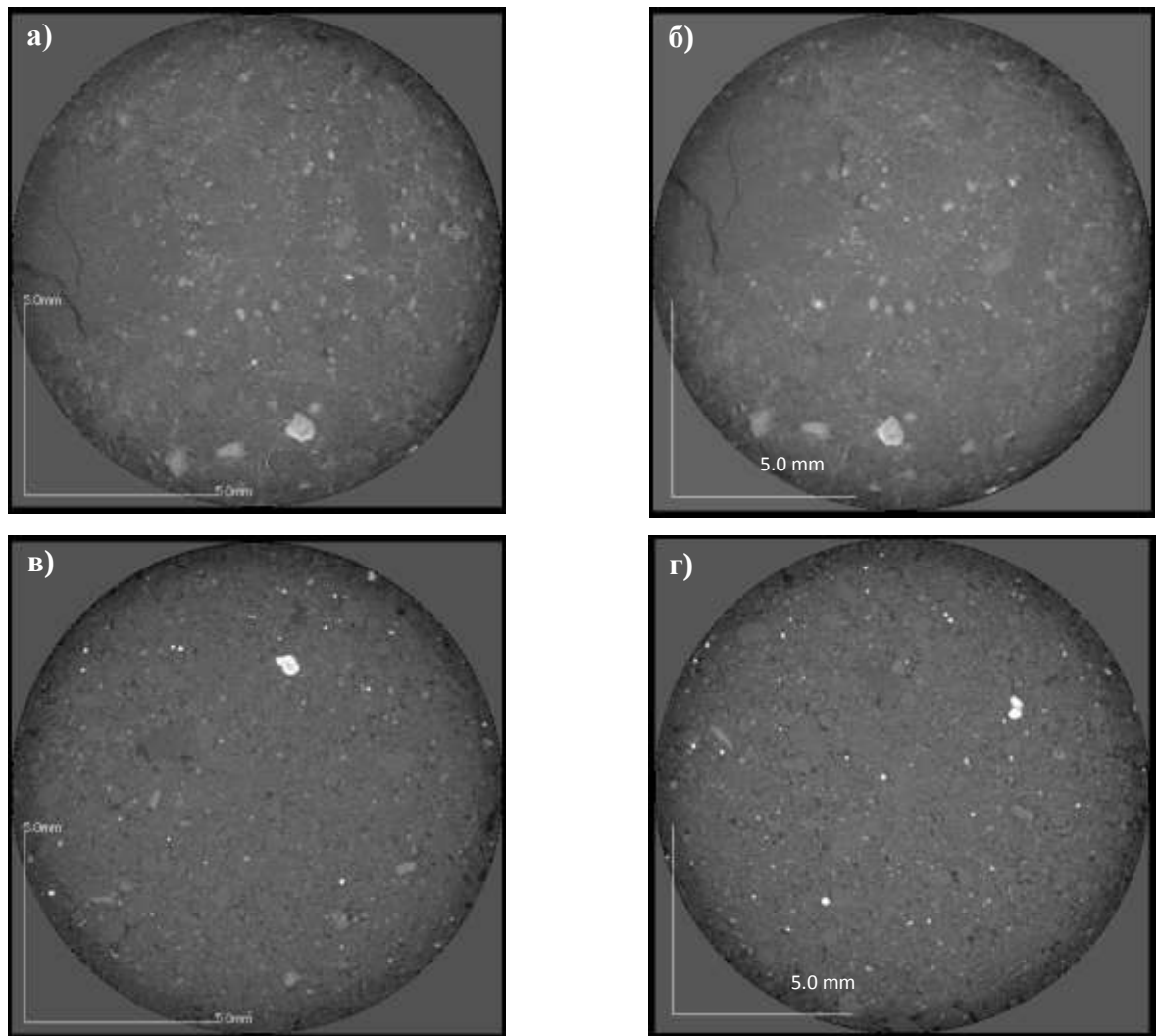


Рис.71. μ КТ-изображения структуры искусственно уплотненных образцов на основе «юрской глины» (а,б) и «аллювиального суглинка» аQ_{III} (в,г) исходные (а,в) и 15-суточные (б,г) (Фото Булыгиной Л.Г.)

5.3. Изменение свойств грунтов

5.3.1. Изменение показателей свойств грунтов при обработке накопительной культурой микроорганизмов

Природные глинистые грунты основания Камской ГЭС обрабатывались накопительной культурой микроорганизмов; определение показателей свойств грунтов проводили до и после 20 суток обработки. Таким образом, следует условно говорить, что характеристики грунта, определенные после обработки микроорганизмами, соответствуют показателям при высокой микробиологической активности. При этом применяемая методика не позволила оценить преобразование состава, строения и свойств грунтов при снижении интенсивности микробиологических процессов.

Грунты после обработки культурой гетеротрофных микроорганизмов существенно изменяют плотностные и гидрофизические свойства. В приложении 7 приведены показатели состава и свойств грунтов основания Камской ГЭС до и после насыщения микроорганизмами. Влажность полного водонасыщения грунтов после обработки микроорганизмами увеличилась (при степени водонасыщения всех образцов, равной 1). Увеличился коэффициент пористости, снизилась плотность. Стоит отметить, что наиболее контрастные изменения характерны для суглинка тяжелого пылеватого (образец 1) – его влажность после взаимодействия с микроорганизмами увеличилась с 30 % до 40%, коэффициент пористости изменился с 0,80 до 1,07, а плотность снизилась с 1,96 до 1,83 г/см³. У суглинков легких песчанистых влажность полного водонасыщения увеличилась с 26 % до 30%, плотность уменьшилась на 0,5-0,9 г/см³, а коэффициент пористости вырос на 0,09-0,13 ед. (приложение 7).

Повышение пористости можно объяснить выделением биогазов («набухание» грунтов), а также образованием органических соединений, биомассы бактерий и возрастанием дефектности минералов. За счет этого увеличивается и влажность полного водонасыщения – чем больше пористость, тем больше свободной воды может вместить в себя грунт. Достоверно объяснить влияние гранулометрического состава (дисперсности) на «отклик» грунта на насыщение микроорганизмами на данном этапе не представляется возможным. Вероятно, большее содержание частиц высокой дисперсности обуславливает большую удельную поверхность грунта, доступную для адгезии клеток. Этому способствует и повышенное содержание глинистого материала, более подходящего для извлечения необходимых элементов живыми клетками, а также высокая (по сравнению с другими образцами) исходная пористость, обуславливающая наличие большего числа микронизаций подходящими для бактерий условиями существования. Тем не менее, вопросы влияния дисперсности на активность и направленность микробиологических процессов требуют отдельного изучения.

Изменение показателей прочностных и деформационных свойств грунтов

Компрессионные кривые образцов до и после насыщения микроорганизмами приведены на рис. 72. Общее уменьшение коэффициента пористости у всех измененных грунтов за опыт несколько больше, чем у контрольных образцов. При этом снижение коэффициента пористости на первых ступенях нагрузки у грунтов, обработанных культурами микроорганизмов, больше, а модуль общей деформации в интервале нагрузок от 0,1 до 0,2 МПа у измененных грунтов меньше, чем у контрольных. Стоит отметить, что у более дисперсного тяжелого суглинка изменения деформационных свойств также выражено более ярко. Модуль общей деформации в интервале нагрузок 0,1-0,2 МПа уменьшился на

60% (с 5,1 до 3,0 МПа), тогда как у легких суглинков снижение составило около 30% (с 2,8 до 2,2 МПа и с 2,2 до 1,6 МПа соответственно у грунта 2 и 3). Очевидно, эта разница объясняется более контрастными изменениями показателей состава и физических свойств более дисперсного грунта, которые обсуждались выше.

На рис. 73 приведены диаграммы сдвига образцов до и после обработки культурой микроорганизмов. Угол внутреннего трения тяжелого суглинка при обработке бактериями практически не изменился, а сцепление снизилось с 15 до 5 кПа (рис. 73, а). Угол внутреннего трения легких суглинков при обработке бактериями снизился от 17° до 13° у образца 2 и от 18° до 11° у образца 3, а сцепление уменьшилось с 44 до 16 кПа у обоих образцов.

Для всех изученных грунтов характерно увеличение сжимаемости и снижение показателей прочностных свойств грунтов после обработки накопительной культурой микроорганизмов. Модуль общей деформации в интервале нагрузок 0,1-0,2 МПа снизился на 30-40%; сцепление уменьшилось на 30-60 %, угол внутреннего трения у одного образца (суглинок тяжелый пылеватый) изменился незначительно, у остальных – уменьшился [Иванов, 2013]. Большая степень изменения характерна для тяжелого суглинка, что связано с большим изменением пористости и плотности при взаимодействии с микроорганизмами.

5.3.2. Изменение показателей свойств грунтов в ходе микробной сукцессии, вызванной увлажнением питательным веществом – глюкозой

Изменение прочностных показателей природных и техногенных песчаных грунтов

Сдвиговые испытания природных и техногенных песчаных грунтов проводились на образцах нарушенного сложения методом простого одноплоскостного среза. Образец грунта помещался в сдвиговое кольцо таким образом, чтобы плотность скелета грунта с учетом влажности была равна заданной (средней между плотностью в рыхлом и плотном сложении воздушно-сухого грунта, см. главу 3). После опыта определяли влажность и рассчитывали истинные плотностные характеристики, степень водонасыщения и другие параметры.

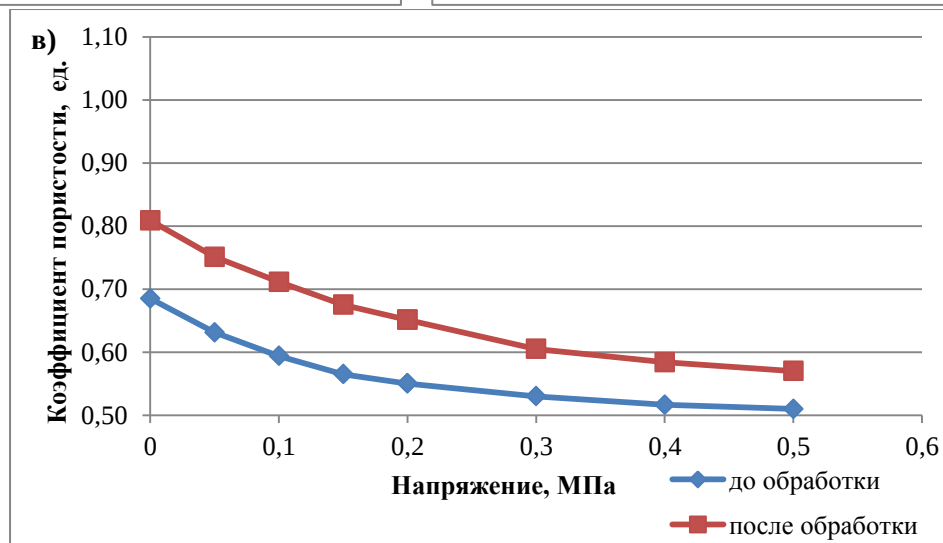
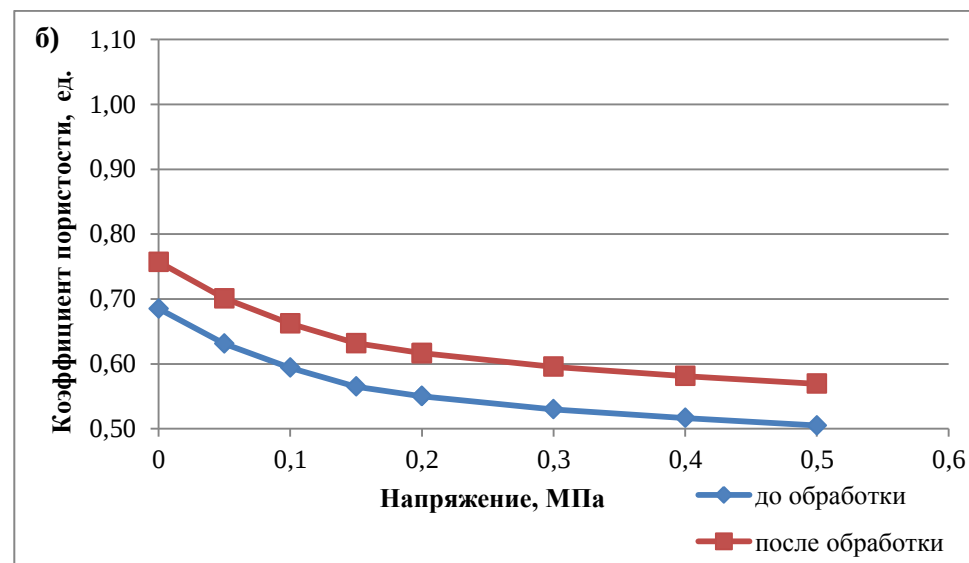
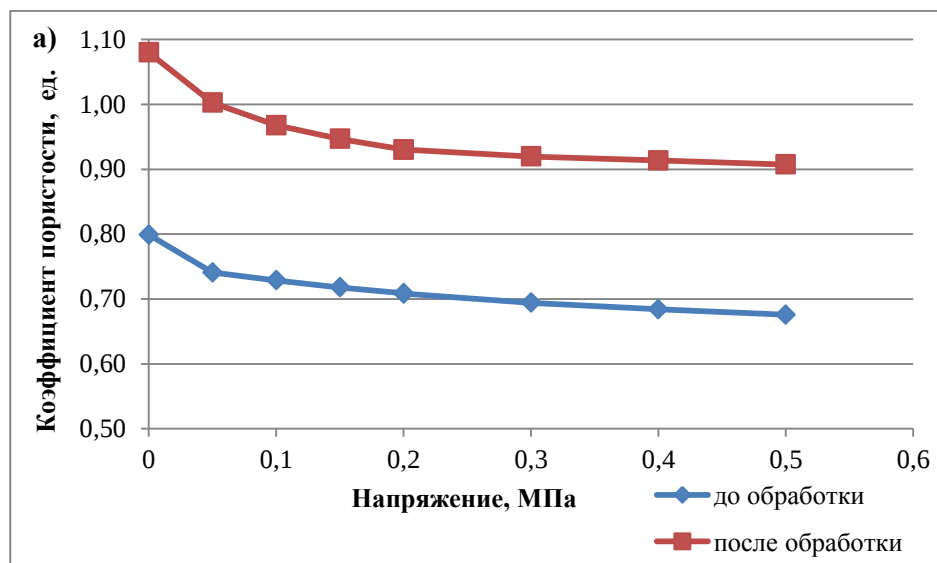


Рис. 72. Компрессионные кривые образцов грунтов основания Камской ГЭС до и после обработки микроорганизмами: а) суглинка тяжелого пылеватого (9,3-9,6 м); б) суглинка легкого песчанистого (8,0-8,3 м); в) суглинка легкого песчанистого (6,5-6,8 м)

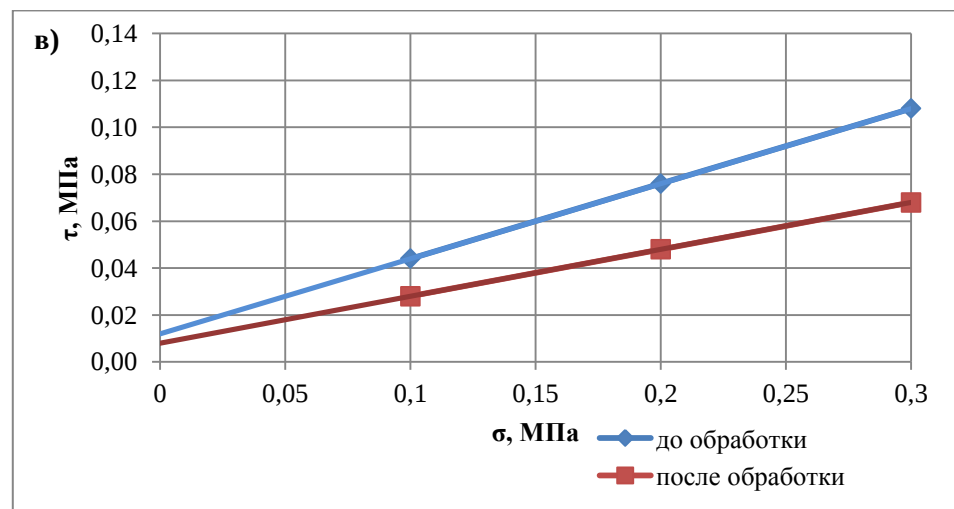
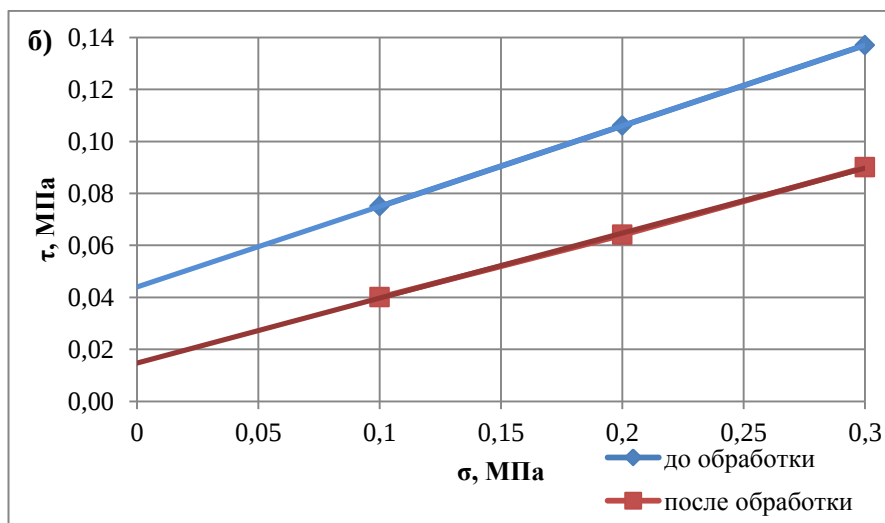
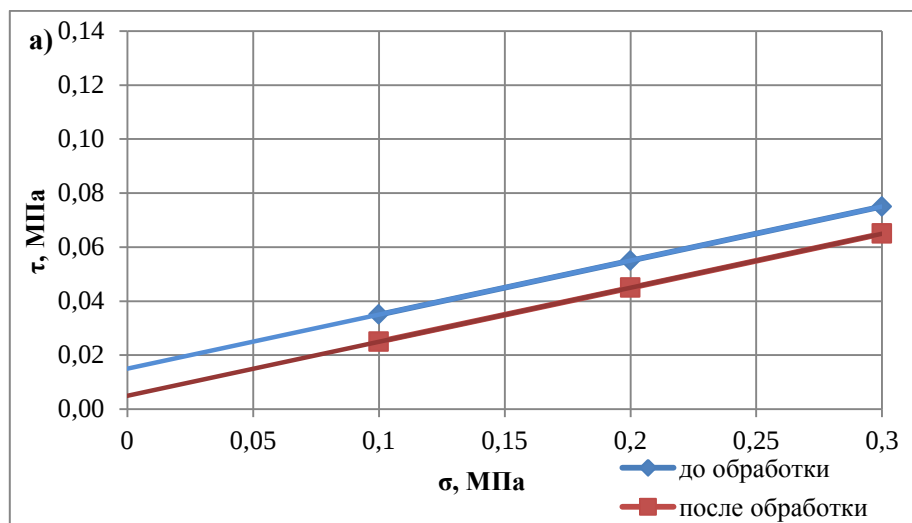


Рис. 73. Диаграммы сдвига образцов грунтов основания Камской ГЭС до и после обработки микроорганизмами: а) суглинка тяжелого пылеватого (9,3-9,6 м); б) суглинка легкого песчанистого (8,0-8,3 м); в) суглинка легкого песчанистого (6,5-6,8 м)

Диаграммы сдвигов исследованных песчаных грунтов приведены на рис. 74. Наибольшей прочностью в исходном состоянии обладает природный мелкий песок ($f, lgQ_{I\text{dns}}-Q_{II\text{ms}}$), значения сцепления и угла внутреннего трения (1 кПа и 33°) в нем максимальны по сравнению с другими образцами. Следующим по показателям прочности следует техногенный пылеватый песок («Новодевичий») – его сцепление равно 2 кПа, а угол внутреннего трения - 23° . В двух оставшихся природных песках в исходном состоянии значение сцепления было равно нулю. Наименьшей прочностью среди всех образцов обладает пылеватый песок $fQ_{II\text{ms}}$ ($C=0$ кПа, $\varphi=17^\circ$) (табл. 22).

Таблица 22. Показатели прочности исследуемых образцов по срокам

№ образца	Образец	Показатели прочности					
		исходных		7-9 сут сукцессии		30 сут сукцессии	
		С, кПа	φ , град	С, кПа	φ , град	С, кПа	φ , град
1	Песок пылеватый tQ_{IV}	2	23	3	20	8	17
2	Песок пылеватый $fQ_{II\text{ms}}$	0	17	3	12	0	24
3	Песок мелкий $f, lgQ_{I\text{dns}}-Q_{II\text{ms}}$	1	33	9	28	4	37
4	Песок средней крупности K_1	0	21	7	15	0	23

В силу разной влажности и заданной плотности скелета при опытах в образцах не прослеживается напрямую тенденция к уменьшению угла внутреннего трения и росту сцепления с увеличением дисперсности грунта. Так, образец № 3 (песок мелкий $f, lgQ_{I\text{dns}}-Q_{II\text{ms}}$) имеет наивысшие значения показателей прочности ввиду максимальной плотности среди других образцов (табл. 23). Образец № 1 (песок пылеватый tQ_{IV} «Новодевичий») обладает низким значением влажности, поэтому его сопротивление сдвигу оказывается достаточно высоким, но меньшим, чем у выше рассмотренного образца (№3), вероятно, вследствие большей дисперсности техногенного песка. Далее по величине сопротивления сдвигу следует образец № 4 (песок средней крупности K_1). Он обладает наименьшей дисперсностью, но ввиду его высокой влажности, а также значительного содержания монтмориллонита в глинистой фракции (см. раздел 5.1) показатели прочности оказываются

пониженными. Последним по величине сопротивления сдвигу является образец №2 (песок пылеватый fQ_{IIms}), вследствие его повышенной дисперсности и средних среди остальных образцов значений влажности и плотности.

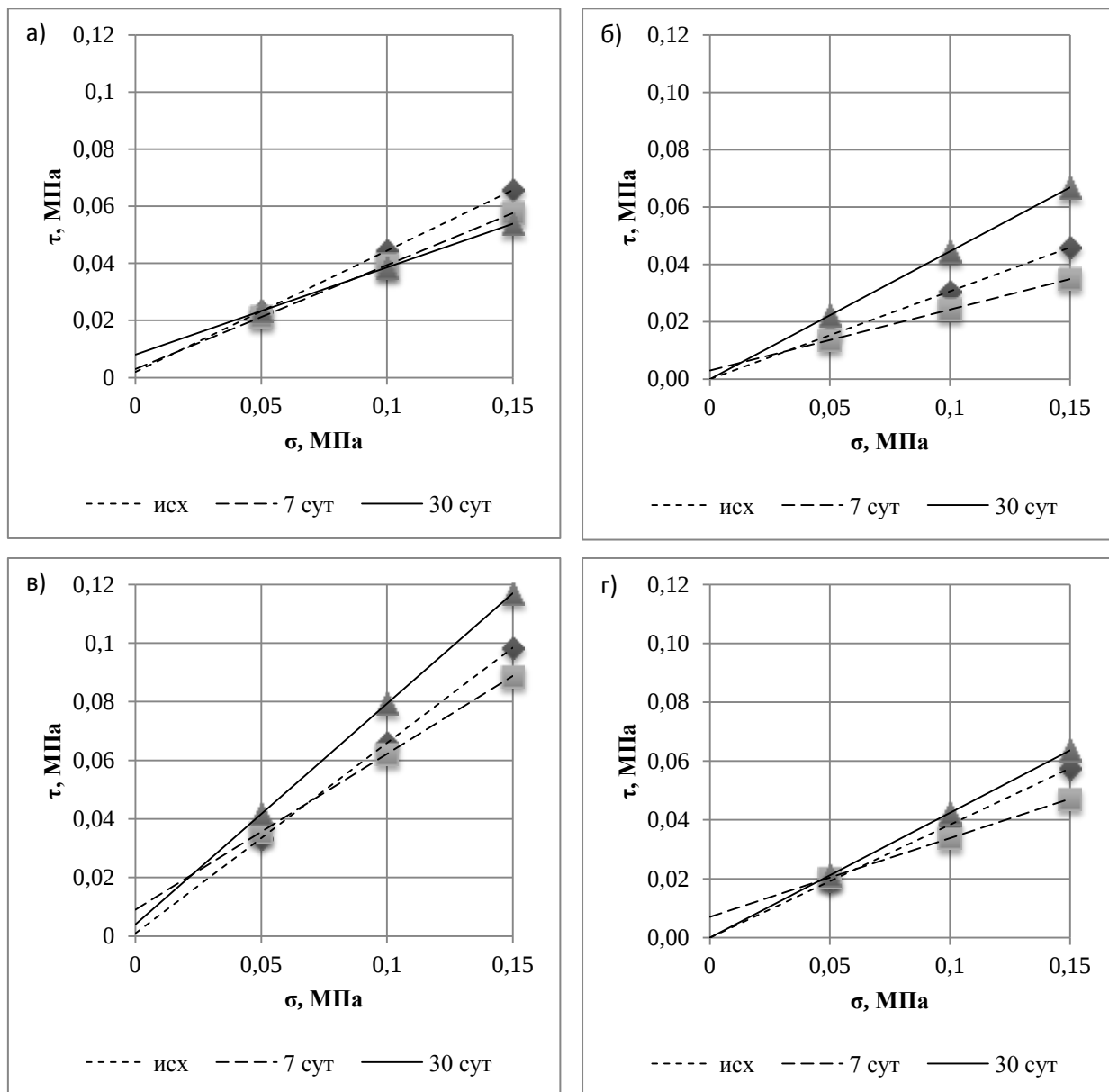


Рис. 74. Диаграммы сдвига песчаных грунтов:

а – песок пылеватый tQ_{IV} («Новодевичий»); б – песок пылеватый (fQ_{IIms}); в – песок мелкий ($f, lgQ_{I dns} - Q_{IIms}$); г – песок средней крупности (K_1):

«исх» – исходный; «7 сут» – на 7 сутки сукцессии; «30 сут» – на 30 сутки сукцессии

На 7-9 сутки сукцессии (период максимальной активности микроорганизмов) во всех образцах существенно возрастает сцепление, а угол внутреннего трения уменьшается (см. табл. 22). К 30 суткам в природных песках сцепление возвращается к исходным значениям, а угол внутреннего трения достигает значений, несколько превышающих

исходные. В техногенном песке сцепление на протяжении всего опыта увеличивается (с 2 кПа в исходном состоянии до 8 кПа на 30 сутки сукцессии), а угол внутреннего трения – уменьшается (с 23° до 17°). Влажность, плотность скелета, пористость и другие показатели состава и свойств грунтов при этом меняются незначительно (табл. 23, приложение 7), поэтому наблюдаемые изменения связаны с деятельностью микроорганизмов и формированием биогенных и биогенно обусловленных структурных связей.

Таблица 23. Показатели влажности, плотности и плотности скелета исследуемых грунтов по срокам

№ образца	Образец	Влажность, %			Плотность, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³		
		естественная	7-9 сут	30 сут	исх	исх	7-9 сут	30 сут
1	Пылеватый песок, $t_{Q_{IV}}$	10	15	14	1,60	1,45	1,43	1,43
2	Пылеватый песок, $f_{Q_{IIms}}$	15	14	13	1,71	1,49	1,50	1,51
3	Песок мелкий, $f, lgQ_{I dns} - Q_{II ms}$,	22	23	22	1,88	1,54	1,53	1,54
4	Песок средней крупности, K_1	22	20	20	1,77	1,45	1,48	1,48

Результаты изучения прочностных свойств выявили общую тенденцию к увеличению сцепления и уменьшению угла внутреннего трения на первой неделе исследований. Глюкоза за 7 суток полностью потребляется микроорганизмами, при этом накапливается биомасса. В грунте формируются биогенные структурные связи (за счет адгезии клеток и мицелия грибов к глинистым рубашкам, а также механическому спутыванию частиц, см. раздел 5.2), а также биогенно обусловленные связи (прежде всего, за счет образования органических продуктов метаболизма). Наличие биогенных связей и замена ими существовавших в грунте ранее контактов (преимущественно точечных, прочность которых в песках контролируется по большей части трением) может обуславливать увеличение сцепления в момент наибольшей активности микроорганизмов. Накопление органических веществ, прежде всего, внеклеточных полисахаридов [Горин, Роот, 1978], а также возможное растворение железистого и карбонатного цемента снижает трение и прочность существующих индивидуальных контактов в грунтах, за счет чего снижается угол внутреннего трения. При отмирании организмов клетки отсоединяются от частиц грунта и разлагаются активными

микроорганизмами вместе с накопленным ранее органическим веществом, чем можно объяснить снижение сцепления к 30 суткам сукцессии. При этом, наличие необратимых преобразований минерального состава грунта (разрушение глинистой фракции) и возможное осаждение кальцита в качестве цемента может быть причиной повышения угла внутреннего трения. С другой стороны, при дальнейшем разложении органического вещества к 30 суткам на поверхности зерен, вероятно, образуются своеобразные “корки” высушивания, подобные поверхности “hardground”, поэтому связность ослабевает, сцепление понижается, а в результате увеличения шероховатости поверхности частиц угол внутреннего трения повышается [Иванов и др., 2015 а].

В техногенном пылеватом песке на 30 сутки сукцессии активность микроорганизмов выше, чем в остальных песках, к тому же, присутствуют мицелиальные формы (см. главу 4). Вероятно, этим объясняется дальнейшее снижение угла внутреннего трения и увеличение сцепления даже на 30 сутки сукцессии [Иванов и др., 2015 а].

В природных и техногенных песчаных грунтах в момент наибольшей активности микроорганизмов за счет формирования биогенных контактов и выделения продуктов метаболизма происходит увеличение сцепления и уменьшение угла внутреннего трения. При снижении микробиологической активности биогенные контакты распадаются, обуславливая снижение сцепления, а накопленное органическое вещество отмерших клеток и продуктов метаболизма преобразовывается, что обуславливает повышение угла внутреннего трения грунтов.

Изменение прочности искусственно уплотненных образцов глинистых грунтов

На основе воздушно-сухих растертых глинистых грунтов были приготовлены искусственно уплотненные образцы (см. главу 2), которые по срокам испытывались на одноосное сжатие с контролем влажности, плотности и расчетом основных показателей состава, строения и свойств (плотности скелета, пористости, коэффициента водонасыщения). Результаты представлены в приложении 7.

Сразу после приготовления образцов наибольшей величиной временного сопротивления одноосному сжатию обладали образцы на основе техногенного суглинка («Каширская») и природной «юрской глины» – 1,1 и 0,9 МПа соответственно (рис. 75).

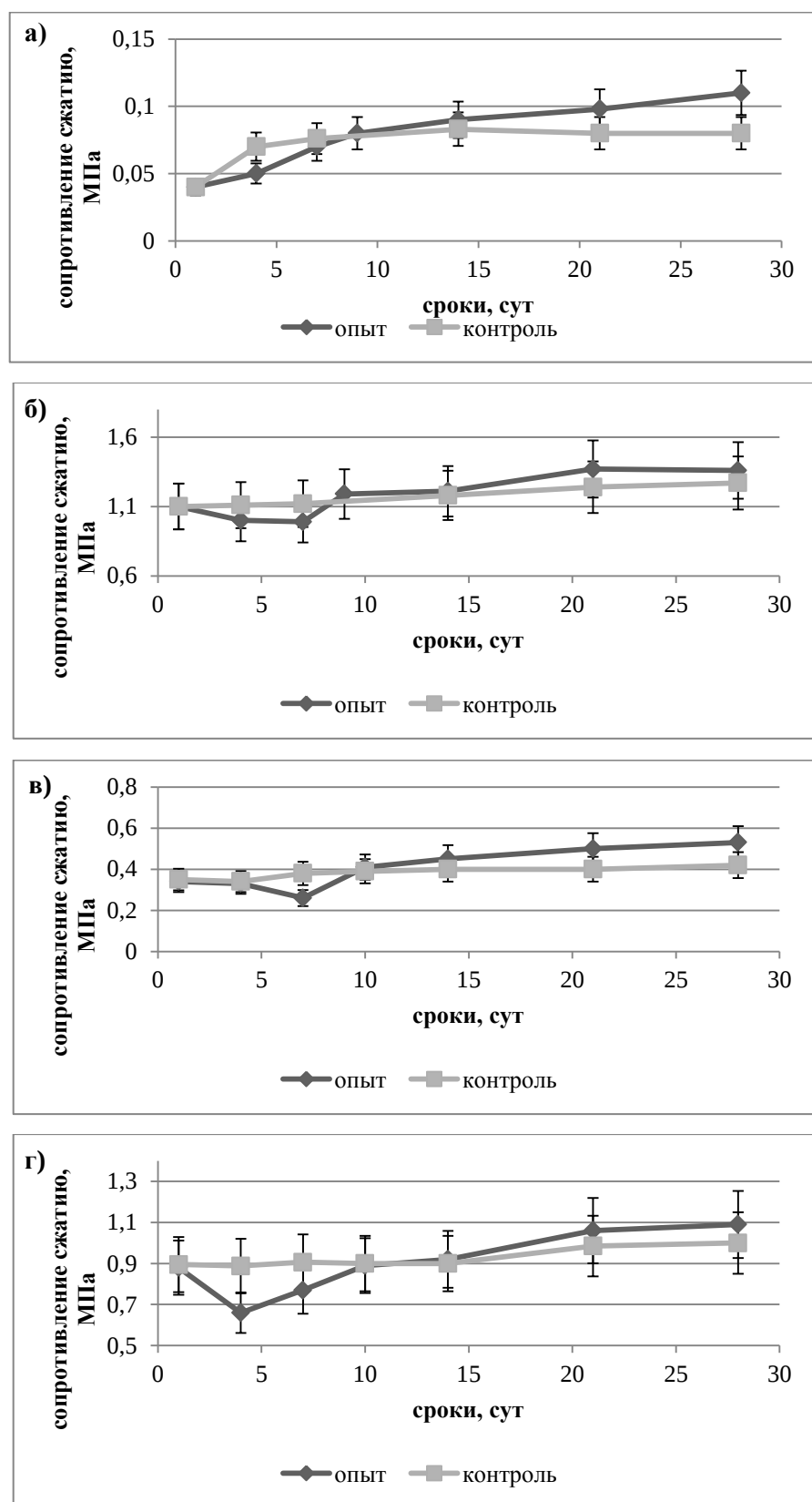


Рис. 75. Изменение временного сопротивления одноосному сжатию искусственно уплотненных образцов на основе: а – техногенного пылеватого песка («Новодевичий»); б – техногенного суглинка («Каширская»); в – «аллювиального суглинка»; г – «юрской глины»
«опыт» - образцы с раствором глюкозы; «контроль» - с водой

Сопротивление сжатию образцов на основе природного аллювиального суглинка составляло около 0,35 МПа; исходная прочность образцов на основе техногенного пылеватого песка («Новодевичий») равна 0,04 МПа. Стоит отметить, что величина сопротивления сжатию контрольных образцов (с водой без глюкозы) увеличивается на протяжении опыта. Это связано с формированием новых структурных связей в грунтах после полного разрушения исходной структуры грунта при высушивании, растирании, формовании и уплотнении влажной грунтовой массы. Причем образцы на основе наименее дисперсного техногенного пылеватого песка («Новодевичий») в течение первых 7-10 суток опыта увеличивает величину сопротивления сжатию в 2 раза – до 0,08 МПа, что, вероятно, связано в том числе и с формированием новых глинистых рубашек (абиогенных контактов) вокруг крупных частиц. Более дисперсный неоднородный техногенный суглинок («Каширская») аналогично значительно увеличивает прочность, к концу опыта она увеличивается с 0,90 до 1,27 МПа. Образцы на основе более однородных природных грунтов («аллювиального суглинка» и «юрской глины») увеличивают показатели прочностных свойств незначительно (рис. 76). Опытные образцы (с раствором глюкозы) имеют заметно меньшую величину сопротивления сжатию по сравнению с контрольными в период наибольшей активности микроорганизмов (3-10 сутки) (рис. 76), величина временного сопротивления грунтов одноосному сжатию снижается на 20-30 %.

Согласно теории прочности дисперсных грунтов В.И. Осипова и В.Н. Соколова [Осипов, 1978; Осипов и др., 1989], прочность грунта определяется количеством и прочностью индивидуальных контактов между частицами. Поскольку разница в прочности на одноосное сжатие опытных и контрольных образцов определяется замещением части абиогенных контактов на биогенные, а прочность образцов в среднем на 20-30 % ниже, можно заключить, что **прочность биогенных контактов как минимум на 20-30 % ниже, чем абиогенных** в аналогичных образцах без микроорганизмов.

После спада микробиологической активности величина временного сопротивления одноосному сжатию опытных образцов резко увеличивается до значений, равных контрольным (10-14 сутки) и в дальнейшем превосходит их. Возможно, упрочнение происходит за счет формирования новых структурных связей (прежде всего, биогенно обусловленных) и их упрочнения во времени за счет преобразования образовавшихся в грунте органических веществ, а также из-за осаждения биогенных цементирующих веществ – карбоната кальция и нерастворимых соединений железа [Иванов и др., 2015 б].

Чтобы доказать, что падение прочности – результат жизнедеятельности микроорганизмов, а не изменения состава, строения и свойств грунтов при длительном

хранении в эксикаторе над водой, были построены графики зависимости плотности скелета (рис. 76, а) и влажности образцов (рис. 76, б) от времени хранения.

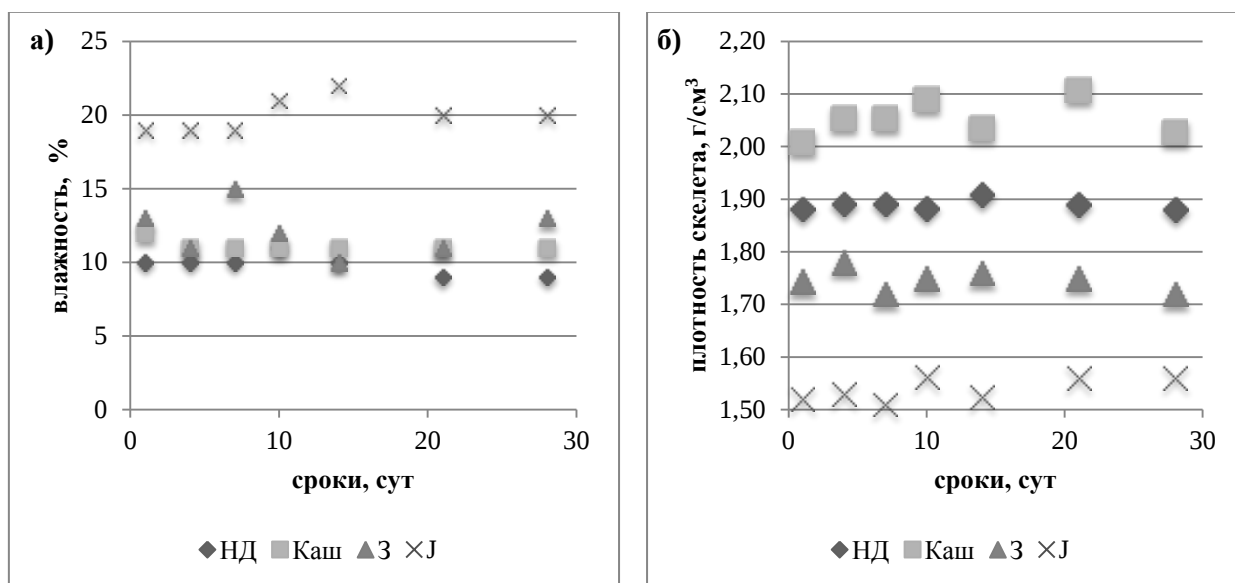


Рис. 76. Графики изменения влажности (а) и плотности скелета (б) искусственно уплотненных образцов на основе: «НД» – техногенного пылеватого песка («Новодевичий»); «Каш» – техногенного суглинка («Каширская»); «З» - природного аллювиального суглинка; «Ж» – природной морской «юрской глины»

Влажность на всем протяжении опыта изменяется случайным образом и незначительно. Плотность скелета грунтов также находится в узком интервале для каждого образца. Тем не менее, нельзя отрицать возможное влияние газообразования на структуру грунтов и некоторое увеличение пористости и уменьшение плотности скелета на этапе высокой микробной активности. Колебания влажностных и плотностных показателей учтены при обработке результатов опыта и формируют достаточно большую ошибку определения показателей прочности на одноосное сжатие – 10-15 %. Однако прослеживается прямая пропорциональность между величиной временного сопротивления одноосному сжатию образцов и активностью дыхания микроорганизмов (рис. 77).

Значит, снижение прочности грунтов в период максимальной активности микроорганизмов происходит за счет микробной активности, а изменение влажностно-плотностных характеристик в процессе хранения не оказывает существенного влияния на показатели прочности.

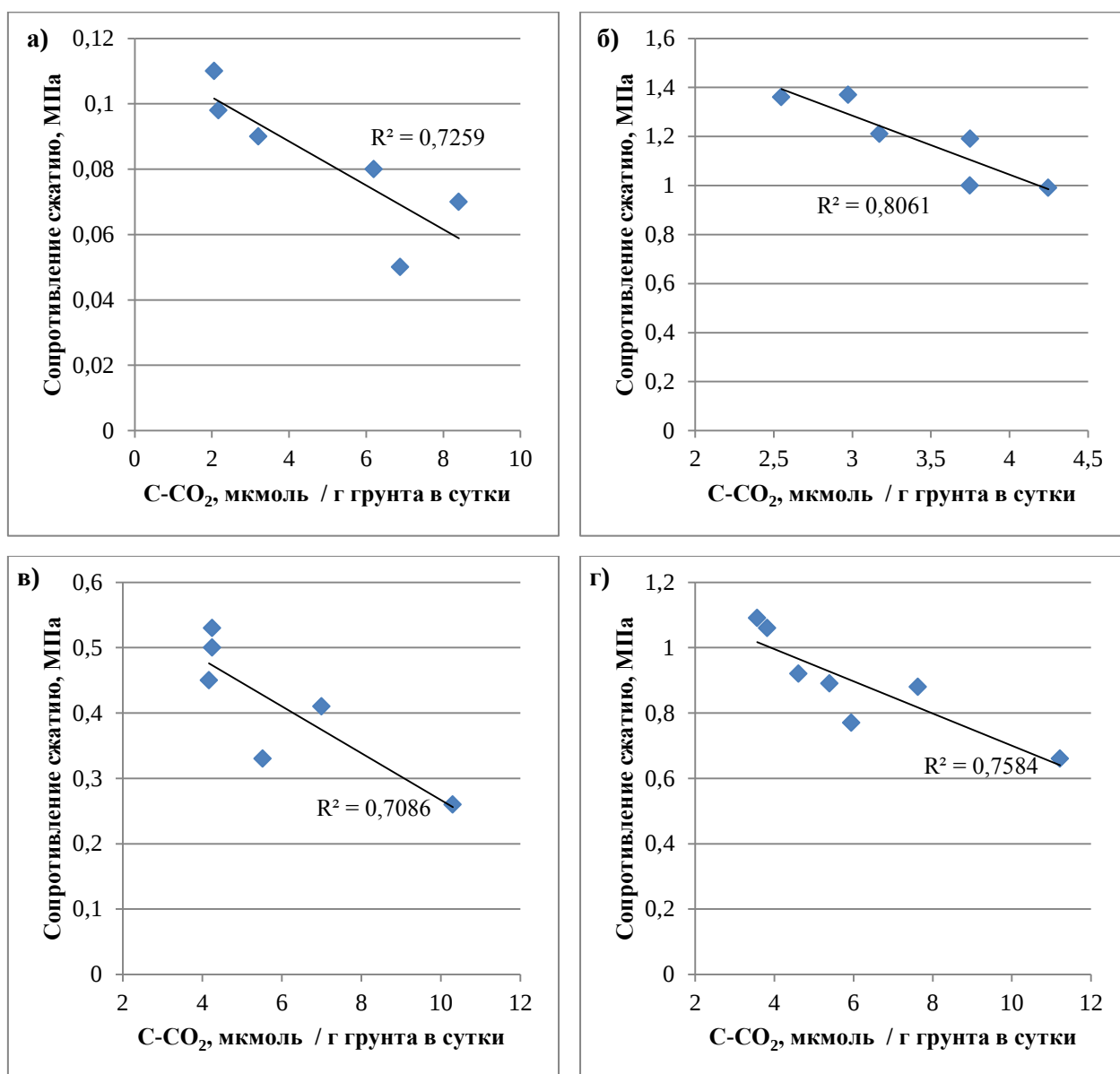


Рис. 77. Корреляция между прочностью на одноосное сжатие образцов и активностью дыхания микроорганизмов в этих грунтах в ходе сукцессии:
 а – техногенный пылеватый песок («Новодевичий»); б – техногенный суглинок («Каширская»); в – «аллювиальный суглинок»; г – «юрская глина»

В искусственно уплотненных образцах на основе глинистых грунтов в период максимальной микробной активности (4-10 сут) формируются биогенные структурные связи, которые оказываются слабее абиогенных связей в контрольных образцах на 20-30 %. При спаде активности микробного комплекса прочность грунтов на одноосное сжатие возрастает и становится больше, чем у контрольных образцов, за счет преобразования биогенных контактов в биогенно обусловленные при выпадении биоцементов и разложения органического вещества отмерших клеток и продуктов метаболизма.

На основании полученных данных по изменению показателей прочностных свойств грунтов при однократной активизации микробного комплекса возник вопрос о наличии кумулятивного эффекта при многократной активизации микробного комплекса. Был поставлен пробный эксперимент на образце природного мелкого флювиогляциального песка ($fQ_{Ist}-Q_{II\,dns}$) и техногенного песчанистого суглинка (tQ_{IV}). Образцы воздушно-сухих грунтов помещались в пластиковые контейнеры, к ним добавлялся 0,1н раствор глюкозы в количестве 0,1 мл на 1 г грунта, а также дистиллированная вода до влажности, близкой к природной. Контейнеры помещались в эксикатор над водой с плотно закрытой крышкой. На 7 сутки проводили испытания грунтов на сдвиг по той же схеме, что и в случае с однократной активизацией микробного комплекса. После этого контейнер оставляли на 10-12 ч на воздухе для испарения влаги, а затем вновь добавлялся раствор глюкозы в такой же дозировке и вода до необходимой влажности. Еще через 7 суток повторяли сдвиговые испытания.

Исследования показали, что аналогично случаю с однократным внесением питательного вещества, на 7 сутки наблюдается увеличение сцепления и снижение угла внутреннего трения и песчаных, и глинистых грунтов (рис. 78). На более поздних сроках показатели прочностных свойств частично восстанавливаются, но заметно отличаются от исходных. Вероятно, после стрессовых преобразований микробного комплекса при первом внесении питательного вещества в дальнейшем происходит формирование стабильного микробного комплекса с показателями, соответствующими вносимому количеству глюкозы. Показатели прочностных свойств грунтов со стабильно активным грунтовым комплексом меняются слабо; сцепление оказывается выше, чем у исходного грунта, а угол внутреннего трения – ниже, что коррелирует с полученными данными при однократном увлажнении грунта глюкозой. Тем не менее, вопросы кумулятивного эффекта требуют подробного изучения за рамками данной работы.

Объединяя результаты определения изменения различных показателей прочностных свойств, выведем **Четвертое защищаемое положение. Частичное замещение исходных абиогенных контактов биогенными и биогенно обусловленными на этапе максимальной активности микробного комплекса приводит к увеличению сцепления и снижению трения в несвязных грунтах, а также к уменьшению прочности на одноосное сжатие связных грунтов; дальнейшее преобразование состава и структуры грунта, связанное со спадом микробной активности, обуславливает снижение сцепления, увеличение угла внутреннего трения и прочности грунтов на одноосное сжатие.**

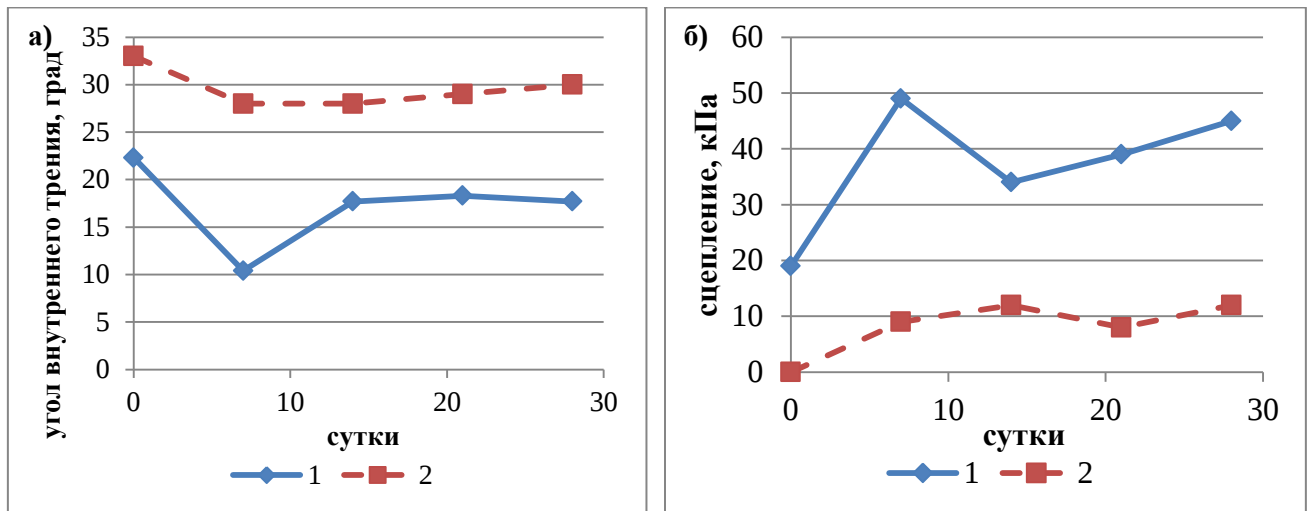


Рис. 78. Изменение угла внутреннего трения (а) и сцепления (б) техногенного суглинка (1) и природного мелкого песка (2) при периодической активизации микробного комплекса

5.4. Практические рекомендации

По результатам работы следует рекомендовать систему наблюдений на площадках инженерных сооружений, в основании которых возможно загрязнение грунтов органическими веществами (заводы и фабрики, гидроэлектростанции, канализационные коммуникации и т.п.). В период эксплуатации сооружений необходимо отслеживать возможные утечки; после регистрации загрязнения целесообразно проводить следующие наблюдения в течение 30-45 суток:

- 1) определение концентрации углекислого газа, метана и других биогенных газов на поверхности, в подпочвенном слое и на глубинах распространения загрязнения;
- 2) периодический отбор проб грунтов с целью определения биомассы микроорганизмов. Исследования следует проводить каждые 2-3 дня в первые 14 суток после загрязнения, затем с интервалом в 5 дней;
- 3) отбор проб грунтов для лабораторных исследований или полевое определение показателей прочностных и деформационных свойств с последующим расчетом устойчивости сооружения;
- 4) наблюдения следует проводить до тех пор, пока показатели биомассы микроорганизмов и свойств грунтов не стабилизируются. На основании проведенных работ следует разработать необходимые мероприятия для поддержания устойчивой эксплуатации сооружений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. При однократной активизации природного микробного комплекса происходит резкое увеличение активности и численности микроорганизмов с максимумом на 7 сутки. Степень активизации микробного комплекса путем добавления глюкозы максимальна в грунтах с отсутствием органического вещества. На конечных стадиях сукцессии (после 15 суток) во всех грунтах, за исключением модельных, формируется устойчивый микробный комплекс с активностью дыхания и с биомассой в 1,5-5 раз выше, чем в контрольных образцах. Прямой корреляции между количеством органического вещества и характером трансформации микробного комплекса в грунтах не прослеживается. Вероятно, помимо абсолютного содержания органики, важен ее состав и «происхождение».

2. В минеральном составе глинистой фракции всех изученных грунтов главные изменения связаны со смешанослойными минералами иллит-сметитового состава: наблюдается увеличение содержания набухающих пакетов смектитового типа. В период наибольшей активности дыхания микроорганизмов при насыщении порового раствора углекислым газом также происходит растворение карбонатов. Со спадом микробиологической активности карбонаты, вероятно, выпадают в осадок.

3. При активизации микробиологических процессов в грунтах формируются биогенные и биогенно обусловленные структурные связи, которые частично замещают существовавшие в исходном грунте абиотические связи. Под биогенными структурными связями следует понимать структурные связи, образованные при непосредственном участии клеток микроорганизмов за счет явлений различной природы – наличия заряда и формирования электростатических связей, физико-химической адгезии клеток к частицам грунта для извлечения элементов, механическое спутывание частиц мицелиальными клетками и т.д. Биогенно обусловленные структурные связи – это связи химической и физико-химической природы, сформированные за счет выделения различных продуктов метаболизма, в том числе, биоцемента.

4. В момент пика микробной активности за счет формирования биогенных и биогенно обусловленных контактов происходит агрегация частиц грунта в крупные агрегаты. При спаде микробной активности агрегаты частично распадаются.

5. В природных и техногенных грунтах в момент наибольшей активности микроорганизмов за счет формирования биогенных контактов и выделения продуктов метаболизма происходит увеличение сцепления и уменьшение угла внутреннего трения, а также снижение сопротивления одноосному сжатию. При спаде микробиологической активности биогенные контакты распадаются, обуславливая снижение сцепления, а

накопленное органическое вещество отмерших клеток и продуктов метаболизма преобразовывается, что обуславливает повышение угла внутреннего трения и сопротивления одноосному сжатию грунтов.

6. На основании проведенных лабораторных экспериментов сформулированы рекомендации по наблюдениям на площадках инженерных сооружений, на которых возможно загрязнение грунтов основания органическими веществами, активизирующими микробный комплекс грунтов. Наблюдения за концентрацией углекислого газа, метана и других биофильных соединений, отбор проб грунтов для определения биомассы микроорганизмов, полевые и лабораторные определения прочностных и деформационных свойств грунтов с последующим расчетом устойчивости сооружения следует проводить каждые 2-5 дней в течение 30-45 суток после выявления загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева, Т.В. Преобразование глинистых минералов под воздействием алкалофильного циано-бактериального сообщества [Текст] / Т.В. Алексеева, Е.В. Сапова, Л.М. Герасименко, А.О. Алексеев // Микробиология. – 2009. – Т. 78, № 6. – С. 816–825.
2. Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв [Текст] / Е.В. Аринушкина. – Издание 2-е, переработанное и дополненное. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.
3. Афонин, А.П. Классификации техногенных грунтов [Текст] / А.П. Афонин, И.В. Дудлер, Р.С. Зиангиров, Ю.М. Лычко и др. // Инженерная геология. – 1990. – № 1. – С. 115–121.
4. Беляев, С.С. Выделение, селекция и исследование микроорганизмов-деструкторов углеводов нефти [Текст] / С.С. Беляев, И.С. Звягинцева, Т.Н. Назина и др. // Тезисы докладов конференции «Биотехнология защиты окружающей среды». – Пушкино: Изд-во Пуш. науч. центра РАН, 1994. – С. 4.
5. Библиотека «Жизнь Растений» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://plant.geoman.ru>. (12.05.2015).
6. Болотина, И.Н. Микробиологические исследования в инженерной геологии [Текст] / И.Н. Болотина, Е.М. Сергеев // Инженерная геология. – 1987. – №5. – С. 3–17.
7. Болотина, И.Н. Микроорганизмы в процессах оглеения глинистых грунтов / И.Н. Болотина, К.С. Болатбекова [Текст] // Инженерная геология. – 1985. – №3 – С. 32–38.
8. Болотина, И.Н. О возможности техногенных биогеохимических явлений при силикатизации гипсоносных пород [Текст] / И.Н. Болотина, С.Д. Воронкевич, Н.Г. Максимович // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 1986. – №4. – С. 49–53.

9. Булыгина, Л.Г. Анализ структуры грунтов комплексом растровый электронный микроскоп – рентгеновский компьютерный микротомограф (РЭМ–μКТ) [Текст] / Л.Г. Булыгина, В.Н. Соколов, М.С. Чернов, О.В. Разгулина, Д.И. Юрковец // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2014. – №5. – С. 457–463.
10. Влияние макро– и микроорганизмов на свойства грунтов. Часть 5 [Электронный ресурс] / ПСК «ТОПстрой». – Режим доступа: <http://stylishtex.ru/archives/32>. (21.08.2014).
11. Глазовская, М.А. Геохимические функции микроорганизмов [Текст] / М.А. Глазовская, Н.Г. Добровольская. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 152 с.
12. Глинка, Н.Л. Общая химия [Текст] / Н.Л. Глинка. – М.: «Кнорус», 2011. – 752 с.
13. Горин, С.Е. Влияние микроорганизмов на прочностные свойства песчаных грунтов [Текст] / С.Е. Горин, П.Э. Роот // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. – 1978. – Вып. 4. – С. 59–61.
14. Горькова, И.М. Физико–химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях [Текст] / И.М. Горькова. – М.: Стройиздат, 1975. – 151 с.
15. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [Текст]. – Введ. 2011-01-06. – М.: МНТКС., 2010. – 156 с.
16. ГОСТ 12536-79 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Текст]. – Введ. 1980-07-01. Переиздание Сентябрь 2003. – М.: Стандартиформ, 2008. – 15 с.
17. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартиформ, 2013– 38 с.
18. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик [Текст]. – Введ. 1985-07-01. Переиздание Октябрь 2005. – М.: Стандартиформ, 2005. – 18 с.
19. Грунтоведение [Текст] / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский; под ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
20. Гузев, В.С. Структура инициированного микробного сообщества как интегральный метод оценки микробиологического состояния почв [Текст] / В.С. Гузев, Н.Г. Бондаренко, Б.А. Бызов и др. // Микробиология. – 1980. – Т.1, № 49. – С.134–139.
21. Гусев, М.В. Микробиология [Текст]: Учебник / М.В. Гусев, Л.А. Минеева. – 2-е изд. – М.: изд-во МГУ, 1985. – 376 с.
22. Гусева, Ю.З. Роль микроорганизмов в процессе увеличения нефтеотдачи [Электронный ресурс] / Ю.З. Гусева, В.С. Овсянникова, Л.И. Сваровская, Л.К. Алтунина. – Режим доступа: <http://www.ipc.tsc.ru/proekts/1/10/index.htm>. (02.09.2014).

23. Дашко, Р.Э. Геотехника и подземная микробиота [Текст] / Р.Э. Дашко, Д.Ю. Власов, А.В. Шидловская. – Институт «ПИ Геореконструкция». Санкт–Петербург, 2014. – 280 с.
24. Дашко, Р.Э. Геоэкологические аспекты повышения безопасности эксплуатации Чебоксарской ГЭС [Текст] / Р.Э. Дашко, Н.А. Перевощикова // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. «Сергеевские чтения». Выпуск 15. – М.: РУДН, 2013. – С. 239–244.
25. Дашко, Р.Э. Геоэкология подземного пространства Санкт–Петербурга [Текст] / Р.Э. Дашко // Инфстрой. – 2003. – №6 (12). – С. 6–11. (а)
26. Дашко, Р.Э. Инженерно–геологическая оценка морен Санкт–Петербурга как прочных и устойчивых отложений – миф или реальность [Текст] / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, А.В. Шидловская // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения». Выпуск 12. – М.: РУДН, 2010. – С. 253–258.
27. Дашко, Р.Э. Микробиота в геологической среде: её роль и последствия [Текст] / Р.Э. Дашко // Материалы годичной сессии научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Том 2. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 72–77.
28. Дашко, Р.Э. Проблемы геоэкологии в геотехнике [Текст] / Р.Э. Дашко // Реконструкция городов и гидротехническое строительство. – 2003. – №7. – С. 115–128. (б)
29. Дашко, Р.Э. Роль микробиоты в инженерной геологии и геоэкологии: история вопроса и результаты экспериментальных исследований [Текст] / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, А.В. Шидловская // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения». Выпуск 6 – М.: ГЕОС, 2004. – С. 48–52.
30. Дашко, Р.Э. Учет инженерно–геологических и геоэкологических факторов при освоении и использовании подземного пространства мегаполисов (на примере Приморского района Санкт–Петербурга) [Текст] / Р.Э. Дашко, Я.А. Карпова // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения». Выпуск 15. – М.: РУДН, 2013. – С. 233–238.
31. Заварзин, Г.А. Литотрофные микроорганизмы [Текст] / Г.А. Заварзин. – М.: Наука, 1972. – 323 с.
32. Заварзин, Г.А., Введение в природоведческую микробиологию [Текст]: Учебное пособие / Г.А. Заварзин, Н.Н. Колотилова – М.: Книжный дом «Университет», 2001. – 256 с.
33. Зайдельман, Ф.Р. Процесс глееобразования и его роль в формировании почв [Текст] / Ф.Р. Зайдельман. – М.: Изд–во МГУ, 1998. – 316 с.

34. Звягинцев, Д. Г. Почва и микроорганизмы [Текст] / Д.Г. Звягинцев. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 256 с.
35. Звягинцев, Д.Г. Биология почв [Текст]: Учебник / Д.Г. Звягинцев, И.П. Бабьева, Г.М. Зенова. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 445 с.
36. Звягинцев, Д.Г. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями [Текст] / Д.Г. Звягинцев. – М.: Наука, 1973. – 176 с.
37. Иванов, П.В. Влияние активности и численности микроорганизмов на прочностные свойства песчаных грунтов Московского региона [Текст] / П.В. Иванов, Н.А. Манучарова, А.Д. Сафиуллина // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 2. – С. 158–165. (а)
38. Иванов, П.В. Загрязнение органическими веществами как фактор активизации микробиологических процессов и преобразования свойств грунтов [Текст] / П.В. Иванов, Н.А. Манучарова, Ю.В. Кутейникова, Е.С. Соломатина // Охрана окружающей среды и природопользование. – 2015. – № 1. – С. 54–75. (б)
39. Иванов, П.В. Изменение микроагрегатного состава техногенных грунтов при активизации функционального микробного комплекса [Текст] / П.В. Иванов, С.К. Николаева, Н.А. Манучарова, О.И. Горшколепов // Инженерная геология. – 2014. – № 5. – С. 50–55.
40. Иванов, П.В. Изменение состава, строения и свойств глинистых грунтов под влиянием микробиологических процессов брожения и денитрификации [Текст] / П.В. Иванов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – №4 – С. 370–375.
41. Каравайко, Г. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд [Текст] / Г.И. Каравайко, С.И. Кузнецов, А.И. Голомзик. – М.: «Наука», 1972. – 248 с.
42. Кожевин, П.А. Микробные популяции в природе [Текст] / П.А. Кожевин. – М.: МГУ, 1989. – 175 с.
43. Красноперова, Ю.Ю. Микробиология [Текст]: учеб.–метод. пособие / Ю.Ю. Красноперова, Н.А. Ильина, Н.М. Касаткина, Н.В. Бугеро. – М.: ФЛИНТА: Наука, 2011 – 144 с.
44. Круговорот углерода. Разложение клетчатки [Электронный ресурс] // Студопедия. – Режим доступа: http://studopedia.ru/2_65697_razlozhenie-kletchatki.html. (19.03.2015).
45. Кузнецов, А.М. О газовых явлениях в основании бетонных плотин [Текст] / А.М. Кузнецов // Гидротехническое строительство. – 1965. – №106. – С. 33–37.
46. Кузнецов, С.И. Введение в геологическую микробиологию [Текст] / С.И. Кузнецов, М.В. Иванов, Н.Н. Ляликова. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 238 с.
47. Лабораторные работы по грунтоведению [Текст]: Учебное пособие / Под ред.: В.Т. Трофимова, В.А.Королева. – М.: Высшая школа, 2008. – 519 с.

48. Легин, Е.К. Влияние биогенного восстановления железа в почвах на миграционное поведение радионуклидов и тяжелых металлов [Текст] / Е.К. Легин, Ю.И. Трифонов, М.Л. Хохлов, Д.Н. Суглобов, Е.Е. Легина // Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина. – 2007. – Т. XII. – С. 148–168.
49. Люминесцентная микроскопия [Электронный ресурс]// Медицинская энциклопедия. – Режим доступа: http://medical-enc.ru/11/lumen_microscopy.shtml. (05.03.2015).
50. Максимович, Н.Г. Влияние микробиологических процессов на подземные воды и грунты в основании плотины [Текст] / Н.Г. Максимович, В.Т. Хмурчик, А.Д. Деменев, П.В. Иванов, С.А. Губин // Материалы XX совещания по подземным водам востока России. – Иркутск, 2012. – С. 107–111. (б)
51. Максимович, Н.Г. Микробиологические процессы на грунтовых плотинах [Текст] / Н.Г. Максимович, В.Т. Хмурчик // Инженерная геология. – 2013. – №8. – С. 46–51.
52. Максимович, Н.Г. Техногенное минералообразование в теле плотины под влиянием микробиологических процессов [Текст] / Н.Г. Максимович, С.А. Губин, В.Т. Хмурчик, А.Д. Деменев, П.В. Иванов // Международный минералогический семинар «Минералогическая кристаллография 2012». – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2012. – С. 151–153. (а)
53. Манучарова, Н.А. Молекулярно–биологические методы в почвоведении и экологии [Текст]: учебное пособие / Н.А. Манучарова. – М.: «Университет и школа», 2014. – 68 с.
54. Манучарова, Н.А. Специфика хитинолитического микробного комплекса в почвах, инкубируемых при различных температурах [Текст] / Н.А. Манучарова, А.Н. Власенко, Е.В. Менько // Микробиология. – 2011. – Т.80, № 2. – С. 219–229.
55. Манучарова, Н.А. Температура как аутоэкологический фактор формирования хитинолитического микробного комплекса в почвах [Текст] / Н.А. Манучарова, А.Н. Власенко, А.Л. Степанов // Известия РАН. Серия Биологическая. – 2007. – №2. – С. 1–7.
56. Мессинева, М.А. Геологическая деятельность бактерий и ее влияние на геохимические процессы [Текст] / М.А. Мессинева // Тр. Ин-та микробиологии. – 1961. – Вып. 9. – С. 12–18.
57. Месяц, С.П. Активизация микробиологических процессов окисления мазутных загрязнений грунтов [Текст] / С.П. Месяц, А.Б. Шемякина // Вестник МГТУ. – 2009. – Т12, №4. – С. 742–746.
58. Методы почвенной микробиологии и биохимии [Текст] / под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ. 1991. – 303с.

59. Микробная биомасса [Электронный ресурс] / описание направления исследований на официальном сайте факультета почвоведения МГУ. – Режим доступа: <http://soil.msu.ru/biologia-issledovania/1720-microbial-biomass>. (05.03.2015).
60. Микробная сукцессия в почве, часть 1 [Электронный ресурс] // Земледелие от А до Я. – Режим доступа: <http://racc chrono.ru/pochva-i-mikroorganizmy/3579-mikrobnaya-sukcessiya-v-pochve-chast-1.html>. (05.03.2015).
61. Микроорганизмы и охрана почв [Текст] / под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 205 с.
62. Москва: геология и город [Текст] / под ред.: В.И. Осипова и О.П. Медведева. – М.: «Московские учебники и Картолитография», 1997. – 400 с.
63. Нестеренко, О.А. Нокардиоподобные и коринеподобные бактерии [Текст] / О.А. Нестеренко, Е.И. Квасников, Т.М. Ногина. – Киев: Наукова думка, 1985. – 336 с.
64. Нижарадзе, Т.Н. Количественный учет влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-механические свойства оглеенных пород [Текст]: методические указания / Нижарадзе Т.Н., Е.А. Пушнова, В.М. Кнатько, М.А. Трибулкина. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. – 25 с.
65. Новодевичий Богородице-Смоленский монастырь [Текст] // «Россия: Иллюстрированная энциклопедия» / ред.-сост. Ю. А. Никифоров. – М.: "ОЛМА Медиа Групп", "ОЛМА-ПРЕСС Образование", 2006. – С. 370–371.
66. Огородникова, Е.Н. Техногенные грунты [Текст] / Е.Н. Огородникова, С.К. Николаева. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 250 с.
67. Огородникова, Е.Н. Химический анализ грунтов [Текст] / Е.Н. Огородникова, Н.Н. Комиссарова. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 160 с.
68. Определитель бактерий Берджи [Текст]. В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. под ред. Г.А. Заварзина / Под ред.: Дж. Хоулта, Н-Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С.Уильямса. – М.: Мир, 1997. – 432с.
69. Определитель бактерий Берджи [Текст]. В 2-х т. Т. 2. Пер. с англ. под ред. Г.А. Заварзина / Под ред.: Дж. Хоулта, Н-Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С.Уильямса. – М.: Мир, 1997. – 368 с.
70. Осипов, В.И. Микроструктура глинистых пород [Текст] / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А. Румянцева / под ред. Е.М. Сергеева. – М.: «Недра», 1989. – 211 с.
71. Осипов, В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород [Текст] / В.И. Осипов. – М., Изд-во МГУ, 1979. – 232 с.
72. Отдельные группы почвенных микроорганизмов. Часть 17 [Электронный ресурс] // Все о сельском хозяйстве. – Режим доступа: <http://fordgood.ru/biologiya-pochv/1666-otdelnye-gruppy-pochvennyh-organizmov-chast-17.html>. (12.08.2014).

73. Официальный сайт московского Метрополитена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mosmetro.ru>. (09.05.2015).
74. Полянская, Л.М. Микробная сукцессия в почвах [Текст]: автореф. дис... д-ра биол. н. / Л.М. Полянская. – М. 1996. – 38с.
75. Практикум по грунтоведению [Текст] / Под ред.: В.Т. Трофимова и В.А. Королева. – Изд-во МГУ, 1993. – 392 с.
76. Пущаровский, Д.Ю. Рентгенография минералов [Текст] / Д.Ю. Пущаровский. – М.: Геоинформмарк, 2000. – 292 с.
77. Радина, В.В. Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния [Текст] / В.В. Радина // Гидротехническое строительство. – 1973. – №9. – С. 22–24.
78. Разложение грибами глюкозы, тканей, кожи и др. [Электронный ресурс] // Биофайл. Научно-информационный журнал. – Режим доступа: <http://biofile.ru/bio/1088.html>. (19.03.2015).
79. Роот, П.Э. Численность и роль микроорганизмов в грунтах [Текст] / П.Э. Роот, Г.М. Хлебникова, И.Н. Болотина, Е.А. Воробьева, Т.П. Кольчугина, С.Е. Горин // Инженерная геология. – 1982. – № 6. – С. 72–78.
80. Самарин, Е.Н. Курс лекций по методам статистической обработки инженерно-геологической информации [Текст] / Е.Н. Самарин, А.В. Бершов, И.К. Фоменко. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 263 с.
81. Сахаров, Б.А. Методика определения содержания смектитовых слоев в дисперсных диоктаэдрических К-содержащих слюдистых минералах [Текст] / Б.А. Сахаров, В.А. Дриц // Литология и полезные ископаемые. – 2015. – № 1. – С. 55.
82. Синицын, А.П. Биотехнология ферментативного превращения целлюлозы [Текст] / А.П. Синицын, А.А. Клесов, М.Л. Рабинович, А.В. Гусаков, А.М. Морозов // Итоги науки и техники. Биотехнология. – 1988. – Т.12. – С. 55–57.
83. Системы организмов и биота Земли [Электронный ресурс]// Экологическая библиотека. – Режим доступа: <http://ecology-portal.ru/publ/4-1-0-178>. (12.08.2014).
84. Справка. Проектирование и строительство тоннелей [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «Мосинжпроект». – Режим доступа: <http://мосинж.рф/page/69/122>. (09.05.2015).
85. Строение бактерии [Электронный ресурс] // Медицинский блог врача скорой помощи. – Режим доступа: <http://www.happydoctor.ru/info/485>. (12.08.2014).
86. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы [Текст] / под ред. Е.М.Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
87. Типы питания микроорганизмов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://refdb.ru/look/2846750.html>. (02.06.2015).

88. Третьякова, О. И. Избранные лекции по химии почв. Учебное пособие для магистрантов сельскохозяйственных ВУЗов [Текст] / О.И. Третьякова. – Краснодар, 2013. – 39 с.
89. Хансиварова, Н.М. Инженерно–геологические проблемы урбанизированных территорий [Текст] / Н.М. Хансиварова, В.И. Коробкин, С.И. Колесников, Р.В. Филь // Материалы Международного симпозиума «Инженерно–геологические проблемы урбанизированных территорий». – Екатеринбург: Аква–Пресс, 2001. – С.124–130.
90. Хансиварова, Н.М. Исследование микрофлоры лессовых пород г.Ростова–на–Дону [Текст] / Н.М. Хансиварова, Л.Ф. Гайдамакина // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. «Сергеевские чтения». Выпуск 2. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 56–61.
91. Чайковская, Л.А. Микробиологическое восстановление хрома (VI) бактерией *Enterobacter nimipressuralis* 32–3 [Текст] / Л.А. Чайковская, М.И. Баранская, Э.Р. Якубова // Строительство и техногенная безопасность. – 2006. – Вып. 13–14. – С. 118–120.
92. Шарауова, А.Б. Применение микробиологических методов для повышения нефтеотдачи и интенсификации нефтедобычи [Текст] / А.Б. Шарауова, Л.К. Нуршаханова, Г. Тулешева // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С. 307–309.
93. Шарков, В.И. Химия гемицеллюлоз [Текст] / В.И. Шарков, Н.И. Куйбина. – М.: «Лесная промышленность», 1972. – 440 с.
94. Шлыков, В.Г. Рентгеновские исследования грунтов [Текст] / В.Г. Шлыков. – М.: Изд–во МГУ, 1991. – 184 с.
95. Эковат: биогаз [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://эковатт.рф/biogas_fuel/. (02.09.2014).
96. Atekwana, Est.A. Biogeophysics: the Effects of Microbial Processes on Geophysical Properties of the Shallow Subsurface [Текст] / Est. A. Atekwana, D.D. Werkema, El. A. Atekwana // Applied Hydrogeophysics. NATO Science Series. – 2006. – Vol. 71. – p. 161–193.
97. Banfield, J.F. Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere [Текст] / J.F. Banfield, W.W. Barker, S.A. Welch, A. Taunton // materials of the National Academy of Sciences colloquium “Geology, Mineralogy, and Human Welfare”. – Irvine, CA, 1998. – p. 3404–3411.
98. Bearden, B.N. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol [Текст] / B.N. Bearden, L. Petersen // Plant and Soil. – 2000. – №218. – P. 173–183.
99. Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering [Электронный ресурс] / edited by: J.A. Pacheco Torgal F.Labrincha, M.V. Diamanti, C.–P. Yu, H.K. Lee. – 2015. – 437 p. Режим доступа: <http://www.springer.com/978-3-319-09286-7>. (19.03.2015).

100. Bradford, M.M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein–Dye Binding [Текст] / M.M. Bradford // Anal. Biochem. – 1976. – №72. – P. 248–254.
101. Bronick, C.J. Soil structure and management: a review [Текст] / C.J. Bronick, R. Lal // Geoderma. – 2005. – №124. – P. 3–22.
102. Burbank, M.B. Precipitation of Calcite by Indigenous Microorganisms to Strengthen Liquefiable Soils [Текст] / M.B. Burbank, T.J. Weaver, T.L. Green, B.C. Williams, R.L. Crawford // Geomicrobiology Journal. – 2011. – 28:4. – P. 301–312.
103. Cernohlavkova, J. Effects of selected environmental pollutants on soil microbial community in laboratory and field studies [Текст] / J. Cernohlavkova. – Dissertation Thesis in Environmental Chemistry. Supervisor: prof. RN Dr. Ivan Holoubek, Ph.D. Masaryk University, Faculty of Science. Brno, Czech Republic, 2009. – 130 p.
104. Cunningham, A.B. Influence of Biofilm Accumulation on Porous Media Hydrodynamics [Текст] / A.B. Cunningham, W.G. Charalakis, F. Abedeen, D. Crawford // Environmental Science and Technology. – 1991. – Vol. 25. – P. 1305–1310.
105. DeJong, J.T. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges [Текст] / J.T. DeJong, K. Soga, E. Kavazanjian, S. Burns, L.A. van Paassen, A. al Qabany et al. // Geotechnique. – 2013. – Vol. 63, №4. – P. 287–301.
106. Deneff, K. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization [Текст] / K. Deneff, J. Six // European Journal of Soil Science. – 2005. – №56. – P. 469–479.
107. Dexter, A.R. Advances in Characterization of Soil Structure [Текст] / A.R. Dexter // Soil Tillage Res. – 1988. – №11. – P. 199–238.
108. Dong, Cheol Seo. Fungal and bacterial mediated denitrification in wetlands: Influence of sediment redox condition [Текст] / Dong Cheol Seo, R.D. DeLaune // Water Research. – 2010. – Vol. 44, № 8. – P. 2441–2450.
109. Eberl, D.D. User's guide to RockJock – A program for determining quantitative mineralogy from powder X–ray diffraction data [Текст] / D.D. Eberl // U.S. Geological Survey Open–File Report. – 2003. – № 78. – 47 p.
110. Elmholt, S. Biotic and abiotic binding and bonding mechanisms in soils with long–term differences in management [Текст] / S. Elmholt, L.J. Munkholm, K. Deboz, P. Schjønning // DIAS report, Danish Institute of Agricultural Sciences. – 2000. – № 38. – P. 53–62.
111. Fiore, S. Bacteria–induced crystallization of kaolinite [Текст] / S. Fiore, S. Dumontet, F.J. Huertas, V. Pasquale // Applied Clay Science. – 2011. – № 53. – P. 566–571.
112. Furukawa, Y. Rapid precipitation of amorphous silica in experimental systems with nontronite (NAu–1) and *Shewanella oneidensis* MR–1 [Текст] / Y. Furukawa, S.E. O'Reilly // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2007. – № 71. – P. 363–377.

113. Gates, W.P. Swelling properties of microbially reduced ferruginous smectite [Текст] / W.P. Gates, H.T. Wilkinson, J.W. Stucki // *Clays and Clay Minerals*. – 1993. – Vol. 41, № 3. – P. 360–364.
114. Hartmans, S. The genus *Mycobacterium*–nonmedical [Текст] / S. Hartmans, J.A.M. De Bont // *The Prokaryotes*. Second edition. Volume 2 Springer, 2006. – P. 1214–1237.
115. Herth, W. The fluorochrome, calcofluor white, binds oriented to structural polysaccharide fibrils [Текст] / W. Herth, E. Schnepf // *Protoplasma*. – 1980. – Vol. 105, № 1–2. – P. 129–133.
116. Ivanov, P. Changes of mineral and chemical composition of soils' clay fraction result from microbial complex activation [Текст] / P. Ivanov, V. Trofimov, V. Krupskaya, N. Manucharova, S. Zakusin // *Astractbook of 7th Mid–European Clay Conference*. – Dresden, Germany. – 2014. – P. 143.
117. Jones, D. The genus *Artrobacter* [Текст] / D. Jones, R.M. Keddie // *The Prokaryotes*. Second edition. Volume 2 Springer. – 2006. – P. 1238–1299.
118. Ko1bel–Boelke, J. Microbial Communities in the Saturated Groundwater Environment II: Diversity of Bacterial Communities in a Pleistocene Sand Aquifer and their In Vitro Activities [Текст] / J. Ko1bel–Boelke, E.–M. Anders, A. Nehr Korn // *Microbial Ecology*. – 1988. – Vol. 16. – P. 31–48.
119. Kocur, M. The genus *Micrococcus* [Текст] / M. Kocur, W.E. Kloos, K.H. Schleifer // *The Prokaryotes*. Second edition. Volume 2 Springer. – 2006. – P.1300–1311.
120. Kostka, J.E. Growth of Iron(III)–Reducing Bacteria on Clay Minerals as the Sole Electron Acceptor and Comparison of Growth Yields on a Variety of Oxidized Iron Forms [Текст] / J.E. Kostka, D.D. Dalton, H. Skelton, S. Dollhopf, J.W. Stucki // *Applied and Environmental Microbiology*. 2002. – № 68(12). – P. 6256–6262.
121. Kuo, M. Preliminary Investigation into the Influence of Bacteria in Marine Sediments [Текст] / M. Kuo, M. Bolton // *1st Bio–Geo–Civil Engineering Conference*. – Delft, The Netherlands, 2008. – P. 76–81.
122. Lee, E.Y. Microbial refinement of kaolin by iron–reducing bacteria [Текст] / E.Y. Lee, K.–S. Cho, W.R. Hee // *Applied Clay Science*. – 2002. – № 22. – P. 47–53.
123. Mapelli, F. Mineral–microbe interactions: Biotechnological potential of bioweathering [Текст] / F. Mapelli, R. Marasco, A. Balloi, E. Rolli, F. Cappitelli, D. Daffonchio, S. Borin // *Journal of Biotechnology*. – 2012. – № 157. – P. 473–481.
124. *Microbial Life in Extreme Environments* [Текст] / edited by D.J. Kushner – University of Ottawa, 1978. – 521 p.
125. Mukholm, L.J. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long–term fertilization treatments [Текст] / L.J. Mukholm, P. Schjonning, K. Debo sz, H.E. Jensen, B.T. Christensen // *European Journal of Soil Science*. – 2002. – № 53. – P. 129–137.

126. Nichols, K.A. Roles of Biology, Chemistry, and Physics in Soil Macroaggregate Formation and Stabilization [Текст] / K.A. Nichols, J.J. Halvorson // The Open Agriculture Journal. – 2013. – № 7. – P. 107–117.
127. Nottingham, A.T. Soil priming by sugar and leaf–litter substrates: A link to microbial groups [Текст] / A.T. Nottingham, H. Griffiths, P.M. Chamberlain P.M, A.W. Stott, E.V.J. Tanner // Applied Soil Ecology. – 2009. № 42. – P. 183–190.
128. Perdrial, J.N. Interaction between smectite and bacteria: Implications for bentonite as backfill material in the disposal of nuclear waste [Текст] / J.N. Perdrial, L.N. Warr, N. Perdrial, M.–C. Lett, F. Elsass // Chemical Geology. – 2009. – № 264. – P. 281–294.
129. Perkins, S.W. The Influence of Biofilm on the Mechanical Behavior of Sand [Текст] / S.W. Perkins, P. Gyr, G. James // Geotechnical Testing Journal, GTJODJ. – 2000. – Vol. 23, № 3. – P. 300–312.
130. Shaw, J.C. Bacterial Fouling in a Model Core System [Текст] / J.C. Shaw, B. Bramhill, N.C. Wardlaw, J.W. Costerton // Applied Environmental Microbiology. – 1985. – Vol. 49, № 3. – P. 693–701.
131. Shirakawa, M.A. Sand bioconsolidation through the precipitation of calcium carbonate by two ureolytic bacteria [Текст] / M.A. Shirakawa, K.K. Kaminishikawahara, V.M. John, H. Kahn, M.M. Futai // Materials Letters. – 2011. – № 65. – P. 1730–1733.
132. Six, J. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [Текст] / J. Six, H. Bossuyt, S. Degryze, K. Denef // Soil & Tillage Research. – 2004. – № 79. – P. 7–31.
133. Summers, R. Bacteria churn out first ever petrol–like biofuel [Электронный ресурс] / R. Summers // Daily News, 24 April 2013. – Режим доступа: <http://www.newscientist.com/article/dn23431-bacteria-churn-out-first-ever-petrol-like-biofuel.html>. (02.09.2014).
134. Tisdall, J.M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils [Текст] / J.M. Tisdall // Plant and Soil. – 1994. – № 159. – P. 115–121.
135. Tisdall, J.M. Organic matter and water–stable aggregates in soils [Текст] / J.M. Tisdall, J.M. Oades // Journal of Soil Science. – 1982. – № 33. P. 141–163.
136. Whiffin, V.S. Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique [Текст] / V.S. Whiffin, L.A. van Paassen, M.P. Harkes // Geomicrobiology Journal. – 2007. – № 24. – P. 417–423.
137. Yaroslavtsev, A.M. Microbial Destruction of Chitin in Soils under Different Moisture Conditions [Текст] / A.M. Yaroslavtsev, N.A. Manucharova, A.L. Stepanov, D.G. Zvyagintsev, I.I. Sudnitsyn // Eurasian Soil Science. – 2009. – Vol. 42, № 7. – P. 797–806.

Фондовая

138. Отчет об инженерно–геологических изысканиях для проекта многоэтажных жилых домов со встроенными нежилыми помещениями и подземными гаражами по адресу: Московская обл., г. Долгопрудный, микрорайон по ул. Московская (дома № 20–23) [Текст]. – М.: ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2012.

139. Отчет об инженерно–геологических изысканиях для проекта наружных сетей (водосток и канализация) строящегося ТЦ «Гудзон» по адресу: г. Москва, ЮАО, Каширское ш., вл. 12 [Текст]. – М.: ООО «Карбон», 2013.

140. Синкин, А.А. Структурно–функциональная характеристика микробного сообщества намывного грунта бухты Даяоуань [Текст] / А.А. Синкин // Курсовая работа. Научный руководитель доц. Н.А. Манучарова. М., факультет Почвоведения МГУ, 2012. – 37 с.

141. Технический отчет № 52–2013 по результатам изысканий для нового строительства здания филиала МХАТ имени А.П. Чехова по адресу: г. Москва, пересечение проспекта Андропова и Нагатинской улицы. – М.: ООО «СК КРЕАЛ», 2013.

142. Технический отчет №129–2012 по результатам обследования основания и фундаментов здания Казначейских палат и Колокольни по адресу: г. Москва, Новодевичий проезд, д. 1. – М.: ООО «СК КРЕАЛ», 2012.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Каталог исследованных образцов

№	Место отбора	Индекс	Глубина отбора, м	Название по ГОСТ 25100-2011
1	г. Москва, шурф у фундамента колокольни Новодевичьего монастыря (ООО «СК КРЕАЛ», 2012)	tQ _{IV}	0,4-0,5	Песок пылеватый с прослоями суглинков и супесей, с включением битого кирпича, осколков посуды, корней растений, щебня и обломков известняка, с примесью органического вещества
2	г. Москва, площадка проектируемого строительства здания филиала МХАТ им. А. П. Чехова на пересечении пр-та Андропова с Нагатинской ул., шурф №2 (ООО «СК КРЕАЛ», 2013)	tQ _{IV}	2,0-2,2	Суглинок тугопластичный с обломками различных строительных материалов и растительными остатками
3	Площадка строительства ТЦ «Гудзон» по адресу: г. Москва, ЮАО, Каширское ш., вл. 12, скв. 1 (ООО «Карбон», 2013)	tQ _{IV}	4,0-4,1	Суглинок полутвердый с обломками кирпича и бетона
4	Первая надпойменная терраса р. Москвы на территории Звенигородской биостанции МГУ, шурф в 10 м от бровки террасы	aQ _{III}	0,4-0,6	Суглинок легкий пылеватый твердый с растительными остатками и примесью органических веществ
5	Участок строительства жилого квартала в г. Долгопрудный, Набережная улица, скв. №12 (ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2012)	fQ _{IIms}	6,0-6,2	Песок пылеватый

6	Участок строительства жилого квартала в г. Долгопрудный, Набережная улица, скв. №12 (ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2012)	$f, lg Q_{\text{dns}} - Q_{\text{rms}}$	19,5-20,0	Песок мелкий
7	Участок строительства жилого квартала в г. Долгопрудный, Набережная улица, скв. №12 (ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2012)	K_1	25,0-25,5	Песок средней крупности
8	г. Москва, площадка строительства станции метро «Окская», скв. 5120 (материалы ООО «Петромоделинг», 2013)	J_{30x}	36,8-37,5	Глина легкая пылеватая твердая
9	Село Глуховцы, Полтавская обл., Украина (коллекция кафедры Инженерной и экологической геологии)	РП	-	Глина каолиновая
10	Казахстан. Таганское месторождение, Западный карьер, горизонт 14 (материалы Покидько Б.В., МИТХТ имени М.В. Ломоносова)	РПtg	-	Глина бентонитовая
12	г. Пермь, пойменная плотина Камской ГЭС, скв. 2 (материалы ЕНИ ПГУ)	$aQ_{\text{III-IV}}$	9,3-9,6	Суглинок тяжелый пылеватый мягкопластичный с примесью органических веществ
13	г. Пермь, русловая плотина Камской ГЭС, скв. 1 (материалы ЕНИ ПГУ)	$aQ_{\text{III-IV}}$	8,0-8,3	Суглинок легкий песчанистый тугопластичный
14	г. Пермь, пойменная плотина Камской ГЭС, скв. 3 (материалы ЕНИ ПГУ)	$aQ_{\text{III-IV}}$	6,5-6,8	Суглинок легкий песчанистый мягкопластичный

Приложение 2. Результаты определения химико-минерального состава грунтов

Таблица А. Результаты анализа водной вытяжки исследуемых песков

№ образца	Грунт, индекс	Сухой остаток, %	pH	Сорг, %
1	Песок пылеватый fQ _{IIms}	0,005	5,9	0
2	Песок мелкий f,lgQ _{I dns-Q_{IIms}}	0,009	5,8	0
3	Песок средней крупности K ₁	0,020	5,5	0,1

Таблица Б. Некоторые показатели химико-минерального состава аллювиальных грунтов основания Камской ГЭС

Образец (глубина отбора, м)	Показатели		
	содержание карбонатов, %	содержание органического вещества, %	pH
Суглинок тяжелый пылеватый (9,3-9,6)	8	0,06	7,95
Суглинок легкий песчанистый (8,0-8,3)	3	0	7,91
Суглинок легкий песчанистый (6,5-6,8)	1	0	7,72

Таблица В. Некоторые показатели химико-минерального состава природных глинистых грунтов

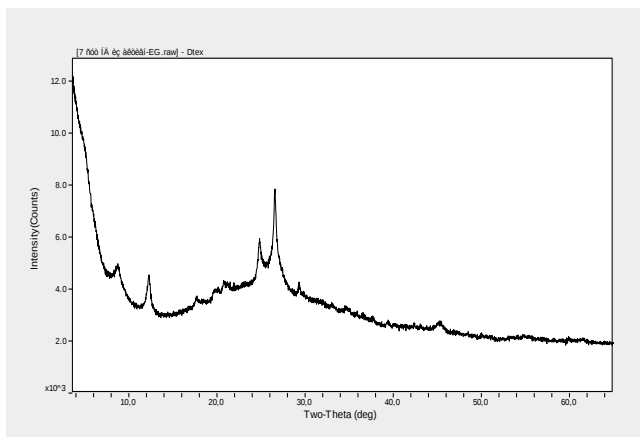
Грунт	Показатели химико-минерального состава									
	pH	Eh, мВ	сухой остаток, %	HCO ₃ ⁻ , %	Ca ²⁺ , %	Mg ²⁺ , %	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	содержание карбонатов, %	содержание органического вещества, %
Суглинок легкий пылеватый ("аллювиальный суглинок")	7,58	170	0,1	0,036	0,007	0,006	0,009	0,029	2	0,5
Глина легкая пылеватая ("юрская глина")	6,38	143	1,4	0,079	0,190	0,100	0,017	1,000	7	2,3

Таблица Г. Некоторые показатели химико-минерального состава изученных техногенных грунтов

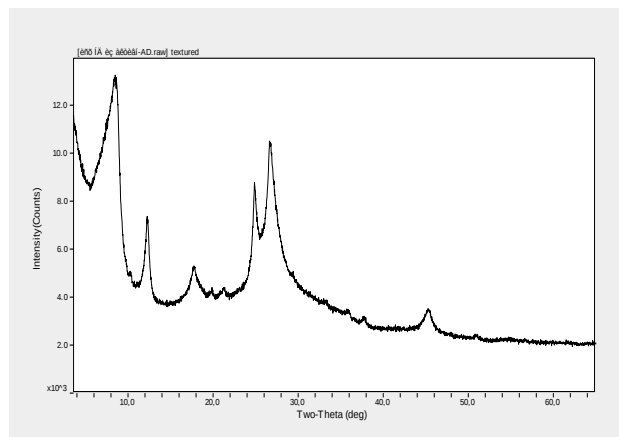
Грунт	Показатели химико-минерального состава								
	pH	Eh, мВ	сухой остаток, %	HCO ₃ ⁻ , %	Ca ²⁺ , %	Mg ²⁺ , %	органические кислоты, мг- экв/100 г	содержание карбонатов, %	содержание органического вещества, %
Песок пылеватый (Новодевичий монастырь)	7,68	180	0,3	0,02	0,005	0,002	0,05	1,8	0,6
Суглинок тугопластичный ("Коломенская")	7,90	189	0,5	0,03	0,009	0,003	-	2,4	0,4
Суглинок полутвердый ("Каширская")	7,98	184	0,7	0,02	0,009	0,002	-	2,1	0,3

Приложение 3. Дифрактограммы рентгеноструктурного анализа грунтов

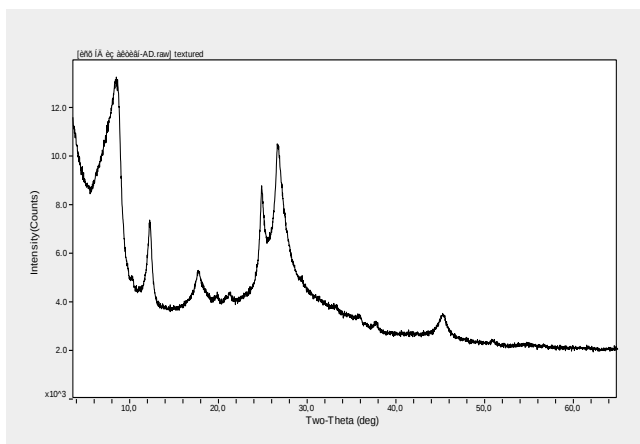
І. Техногенный пылеватый песок («Новодевичий») (глинистая фракция)



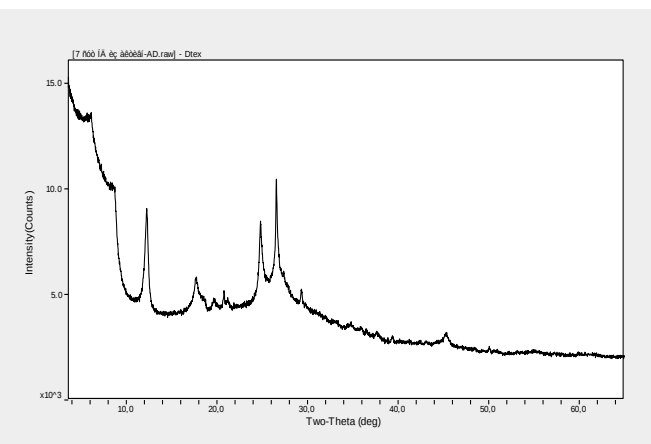
1. Исходный, воздушно-сухой (BC)



2. Исходный (насыщенный этиленгликолем ЭГ)

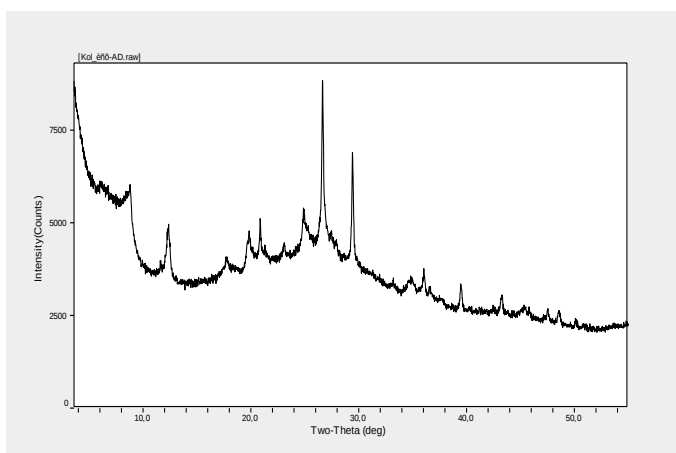


3. Через 7 суток сукцессии (BC)

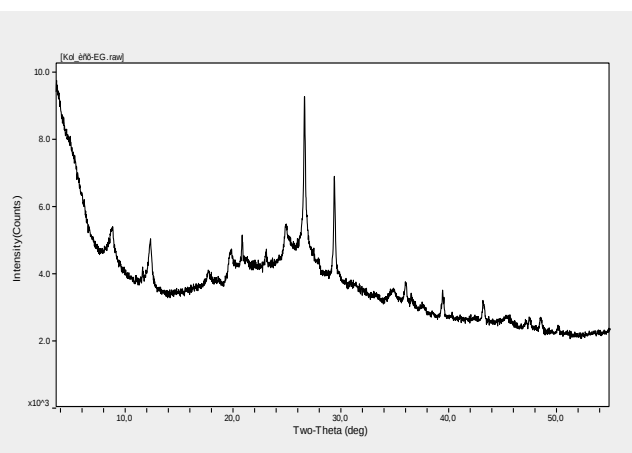


4. Через 7 суток сукцессии (ЭГ)

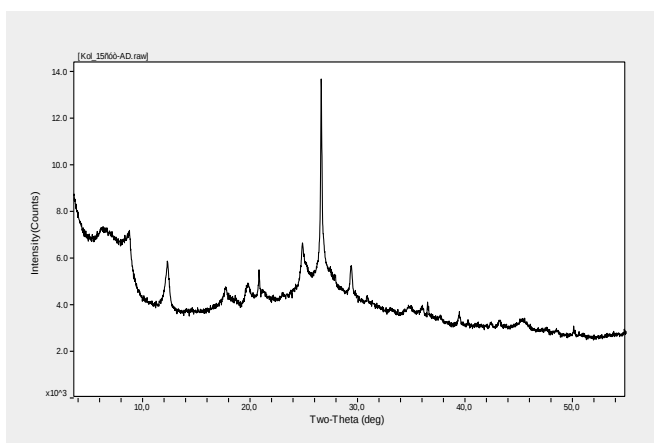
ІІ. Техногенный суглинок («Коломенская») (глинистая фракция)



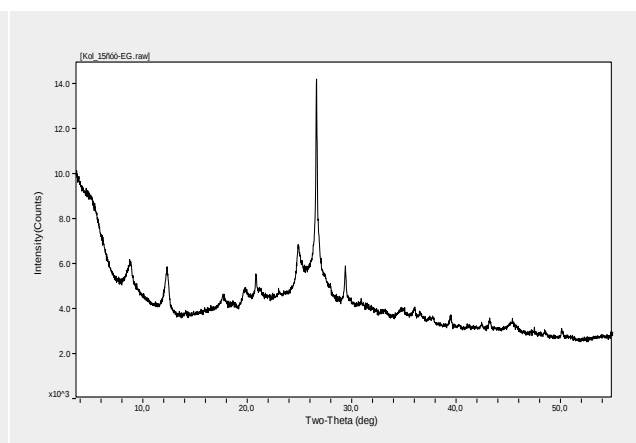
1. Исходный BC



2. Исходный (ЭГ)

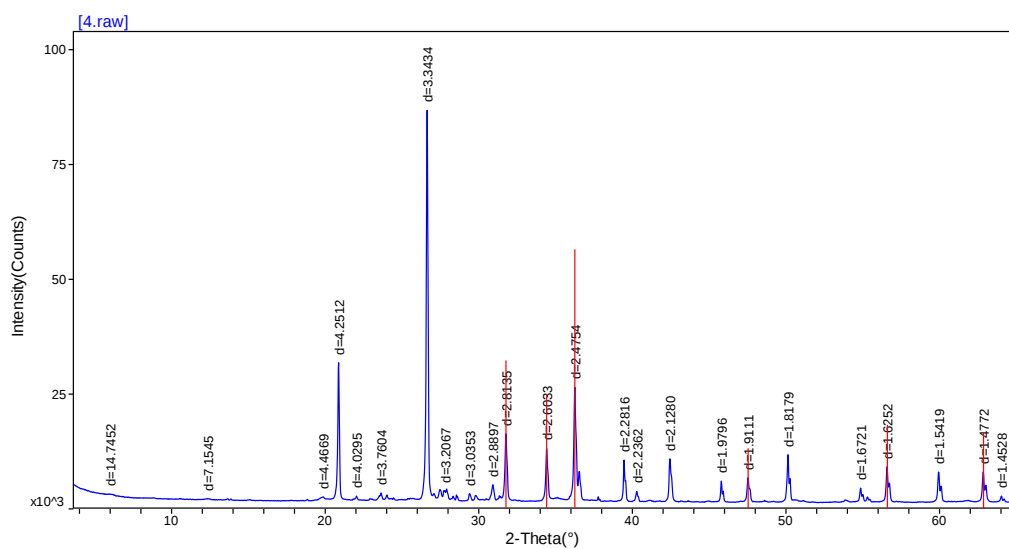


Через 7 суток сукцессии (BC)

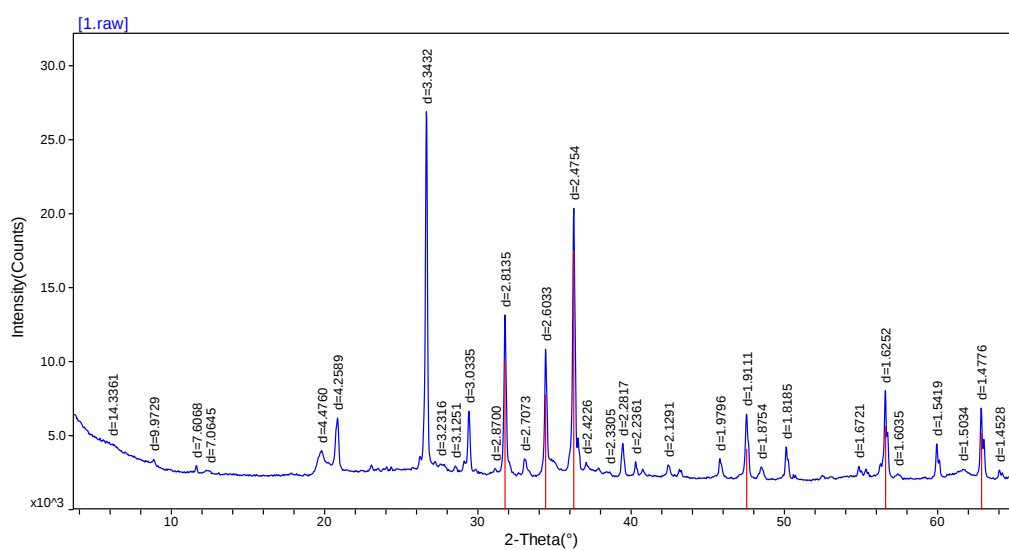


Через 7 суток сукцессии (ЭГ)

III. Природный глинистый грунт «Аллювиальный суглинок» (валовый с эталоном)

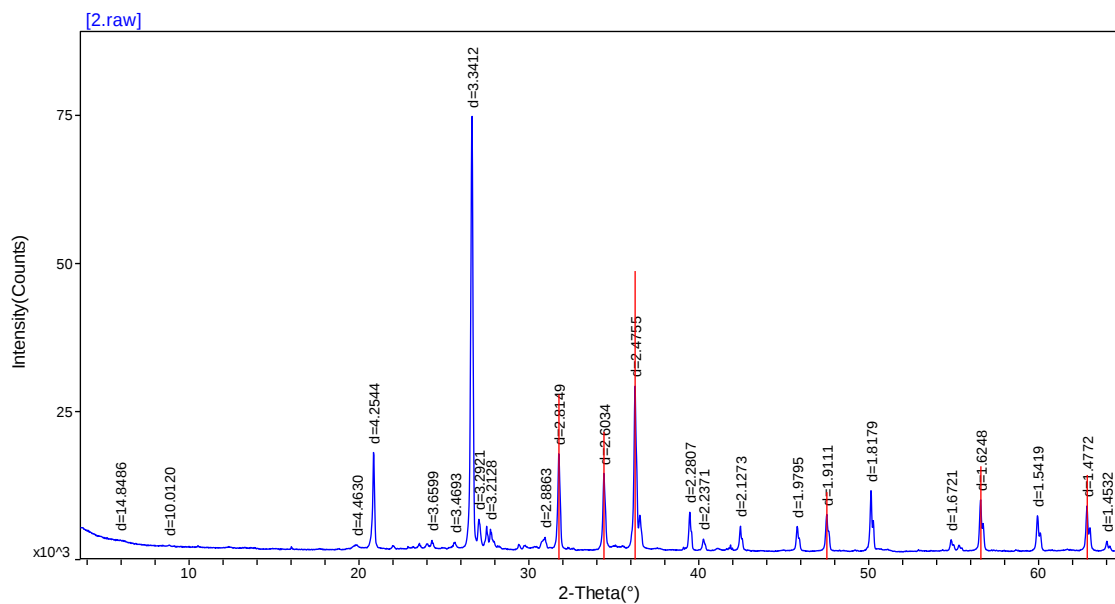


1. Исходный

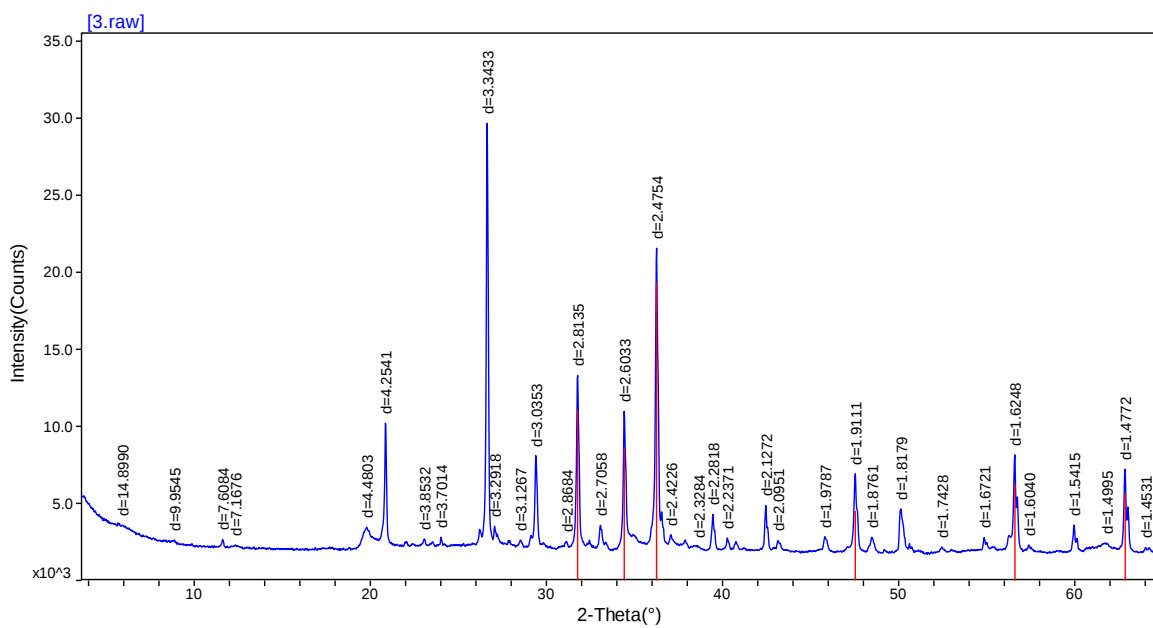


Через 7 суток сукцессии

III. Природный глинистый грунт «Юрская глина» (валовый с эталоном)

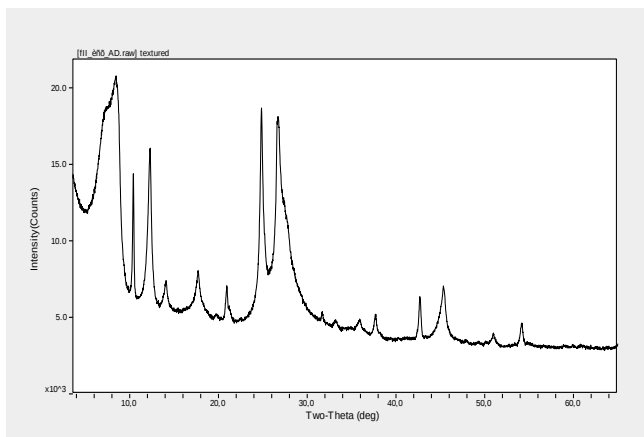


1. ИСХОДНЫЙ

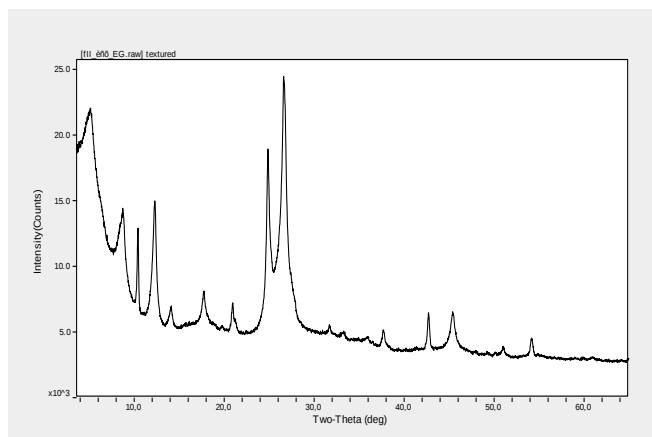


2. После 7 суток сукцессии

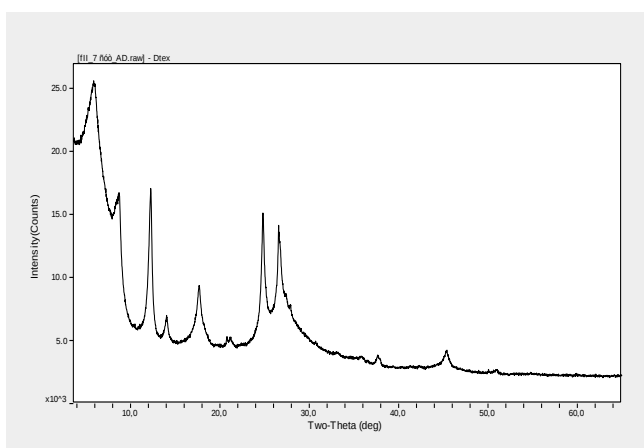
IV. Природный флювиогляциальный песок fQ_{IIms} (глинистая фракция)



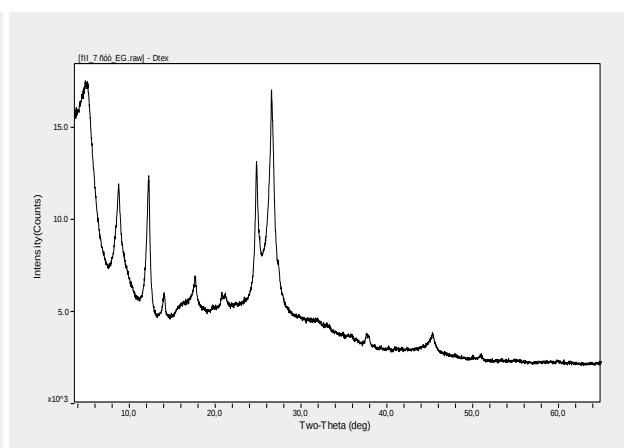
1. Исходный, (BC)



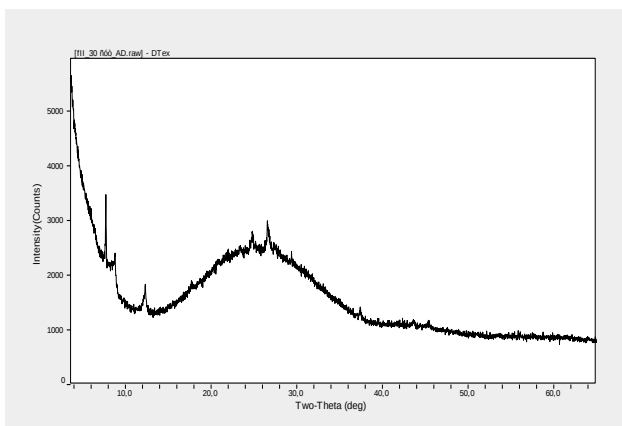
2. Исходный (ЭГ)



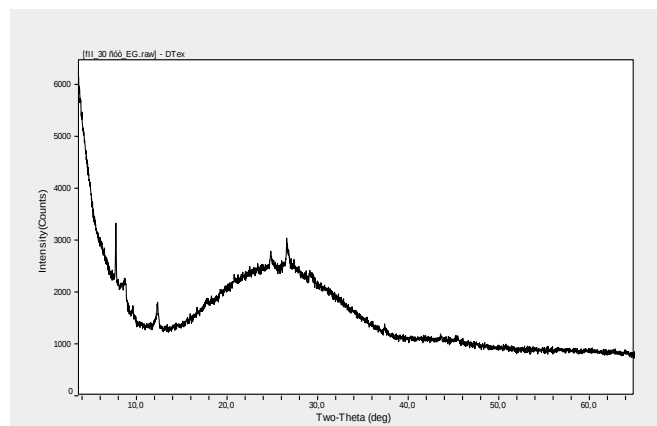
3. Через 7 суток сукцессии (BC)



4. Через 7 суток сукцессии (ЭГ)

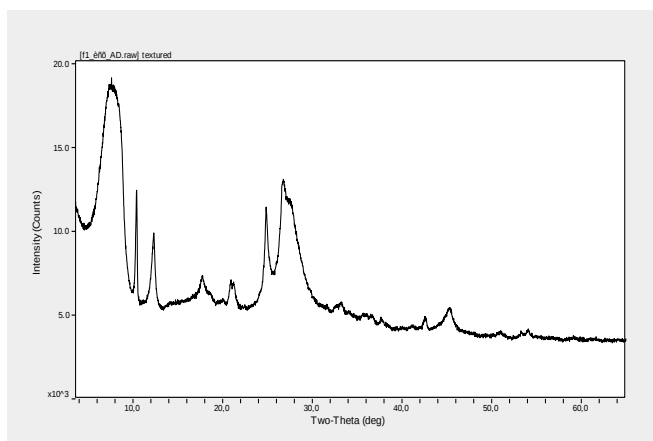


5. Через 30 суток сукцессии BC

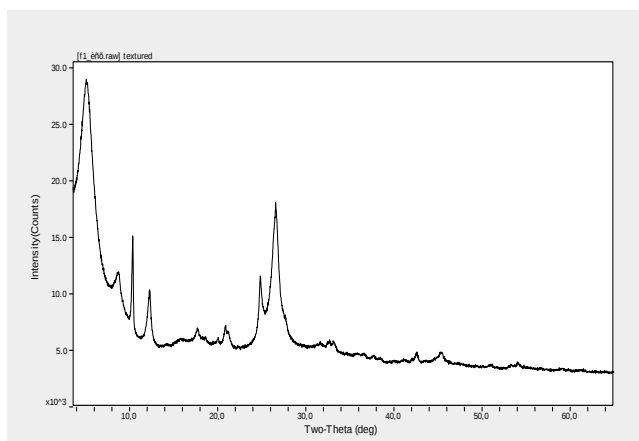


6. Через 30 суток сукцессии ЭГ

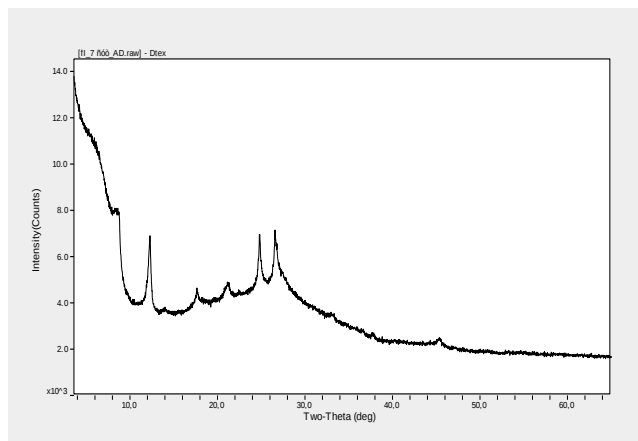
V. Природный флювиогляциальный мелкий песок (f,l_gQ₁dns-Q_{II}ms) (глинистая фракция)



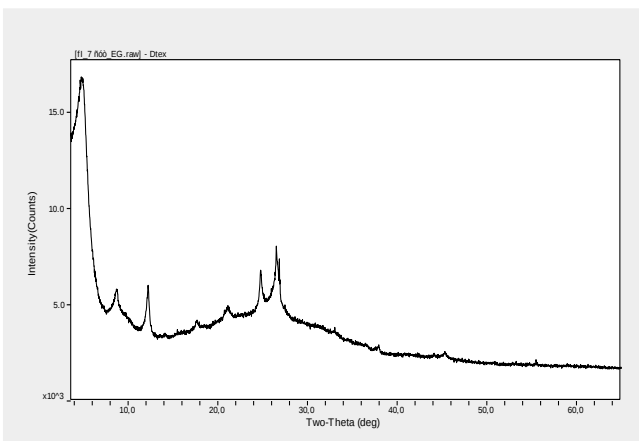
1. Исходный, (BC)



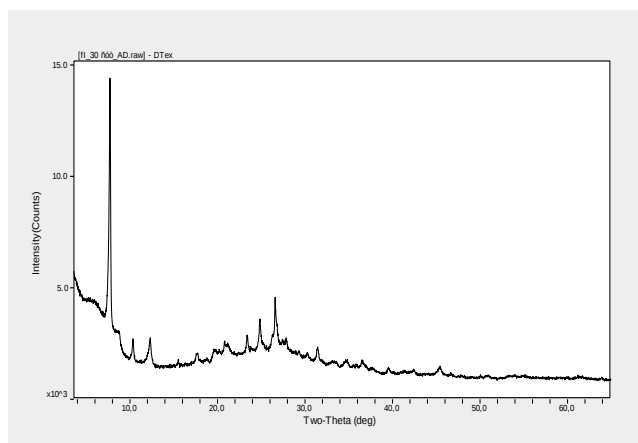
2. Исходный (ЭГ)



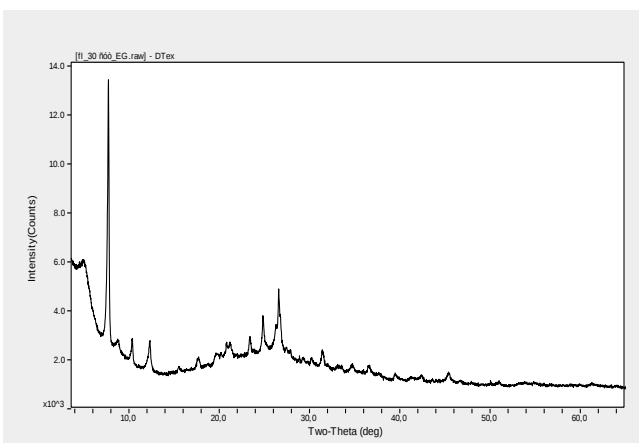
3. Через 7 суток сукцессии (BC)



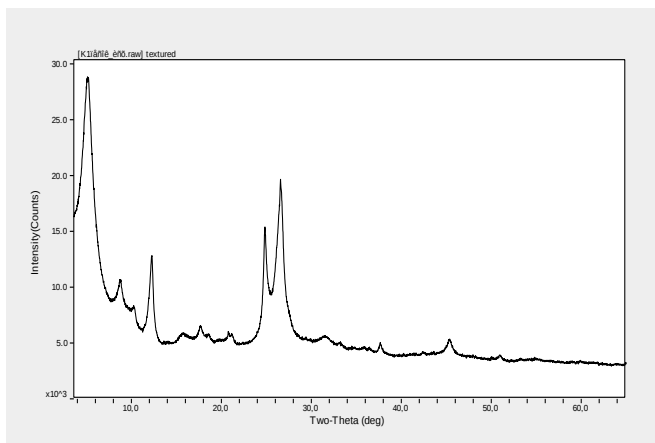
4. Через 7 суток сукцессии (ЭГ)



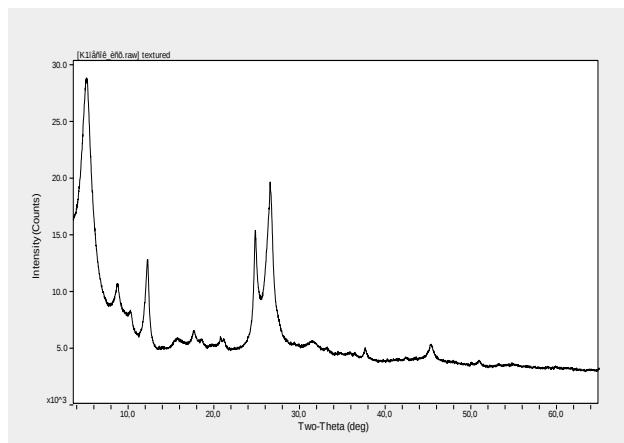
5. Через 30 суток сукцессии BC



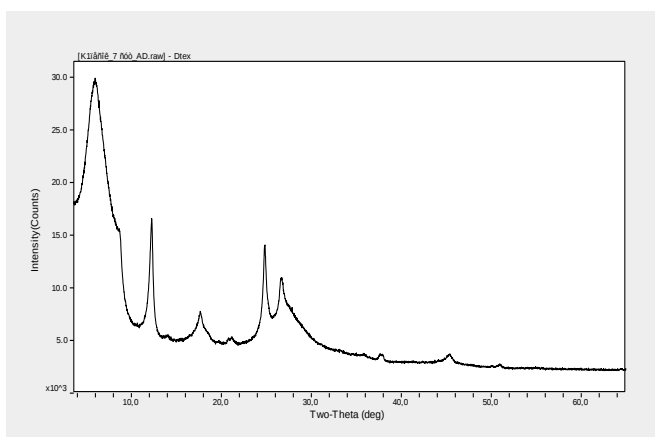
6. Через 30 суток сукцессии ЭГ

VI. Природный мелкий меловой песок К₁ (глинистая фракция)

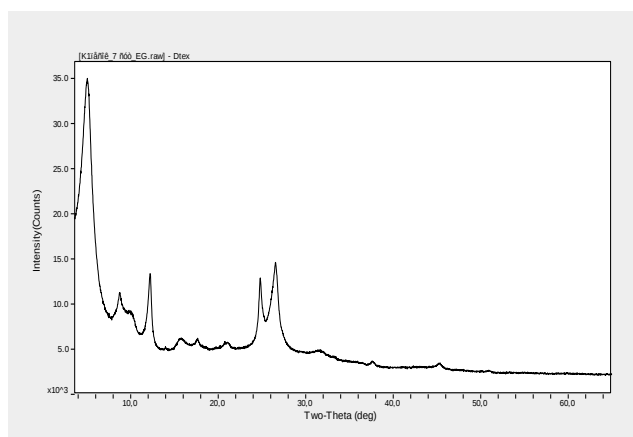
1. Исходный ВС



2. Исходный (ЭГ)

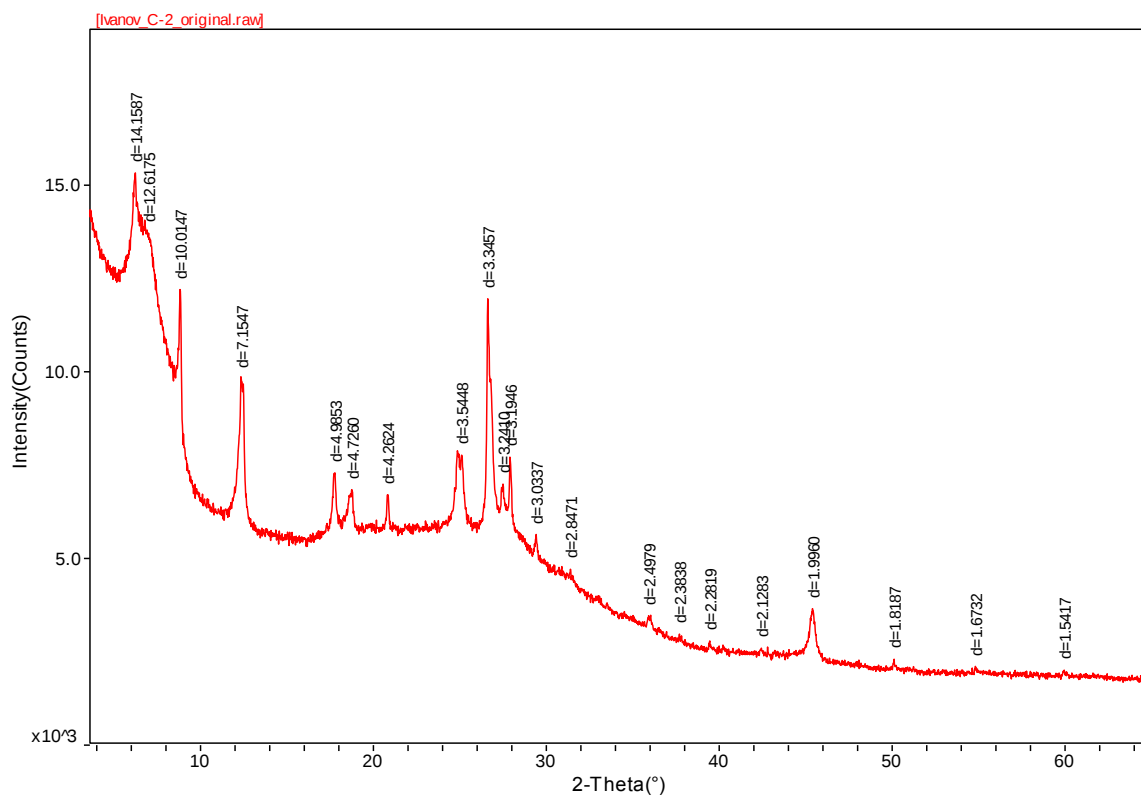


Через 7 суток сукцессии (ВС)

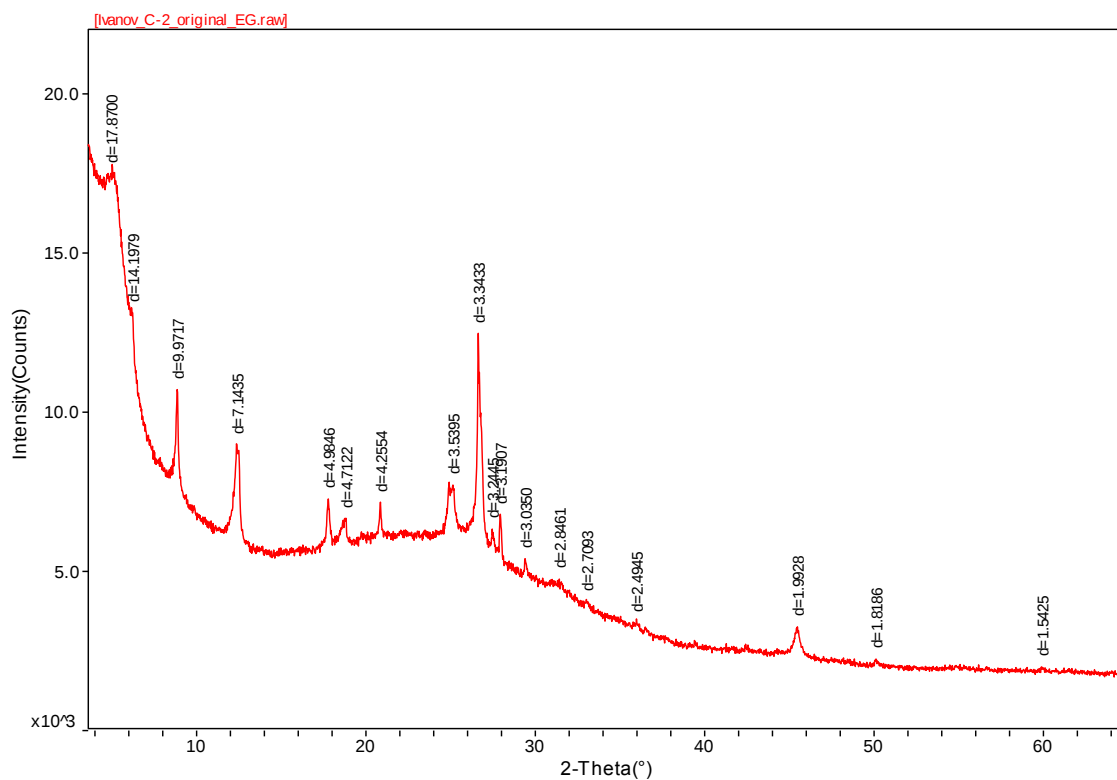


Через 7 суток сукцессии (ЭГ)

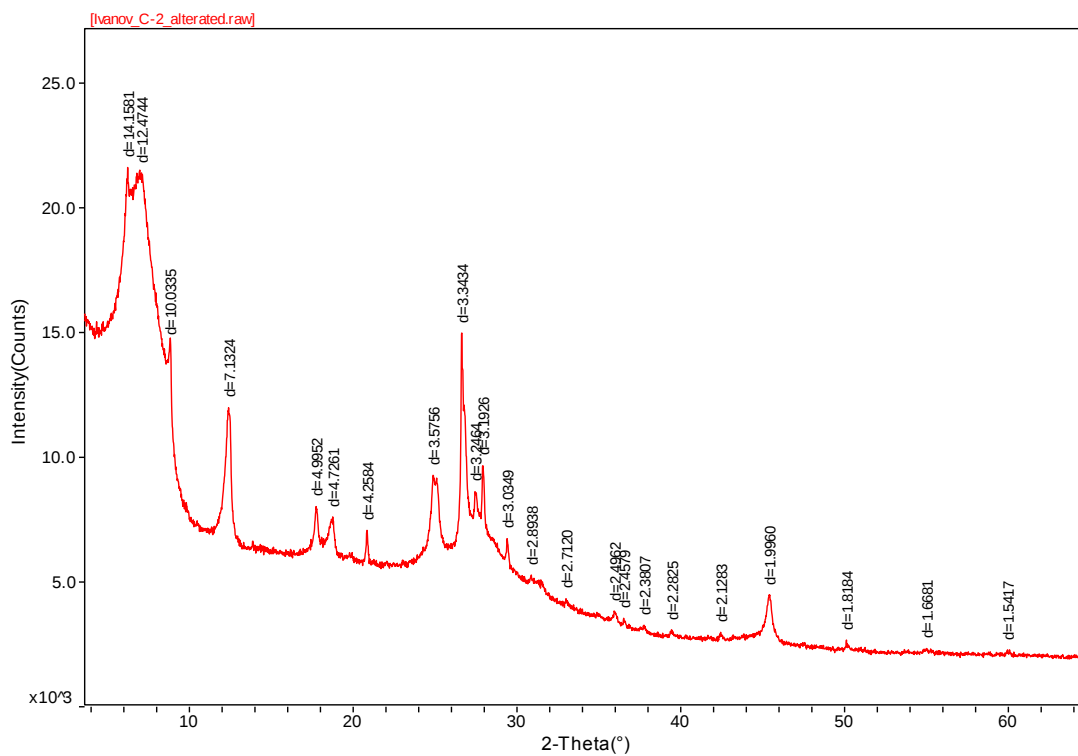
VII. Природные глинистые грунты основания Камской ГЭС



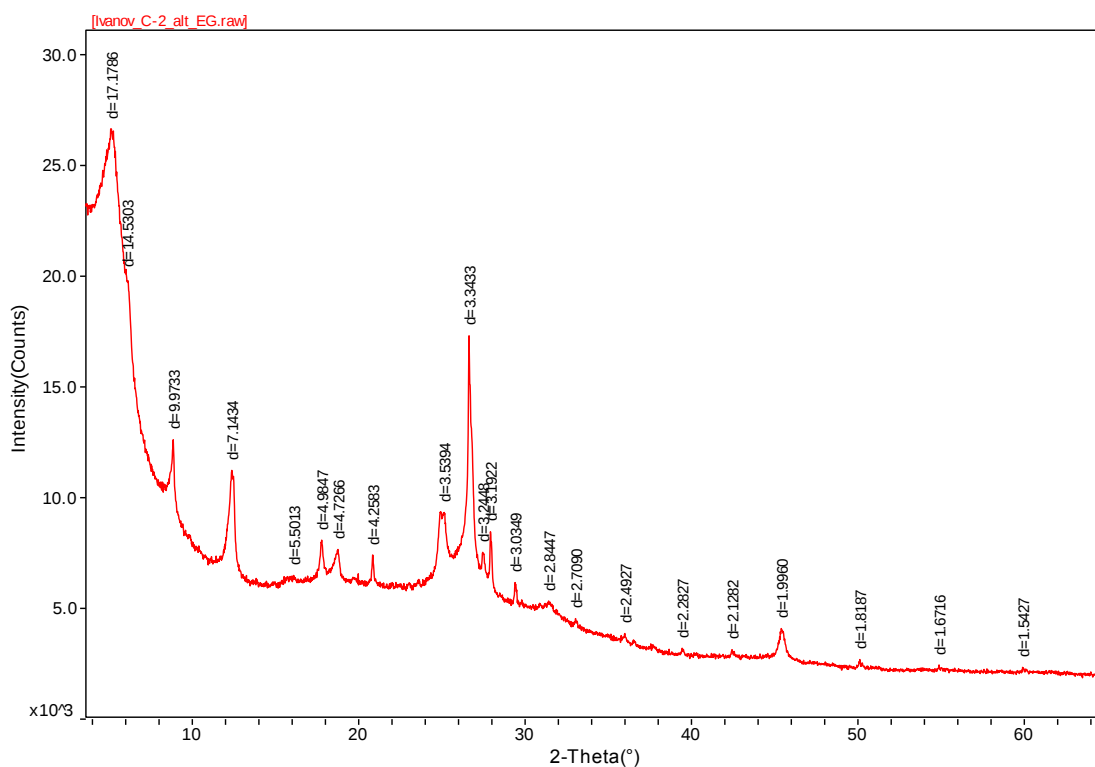
1. Суглинок тяжелый пылеватый (Образец 1) исходный (ВС)



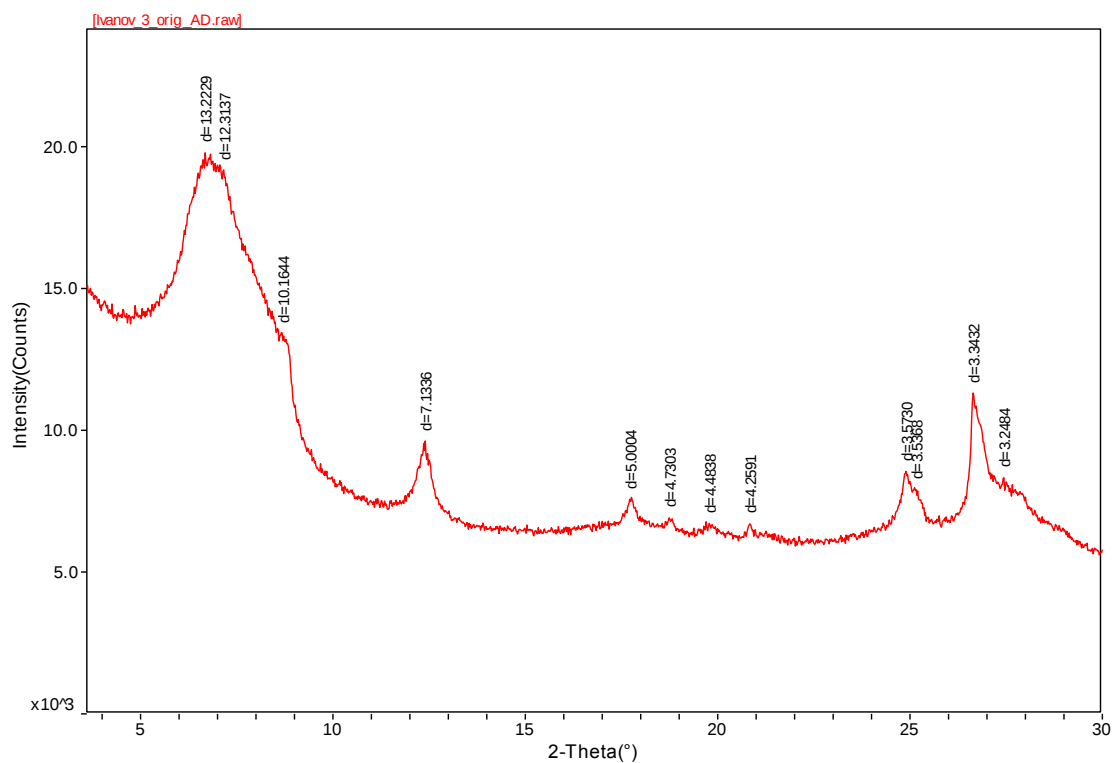
2. Суглинок тяжелый пылеватый (Образец 1) исходный (ЭГ)



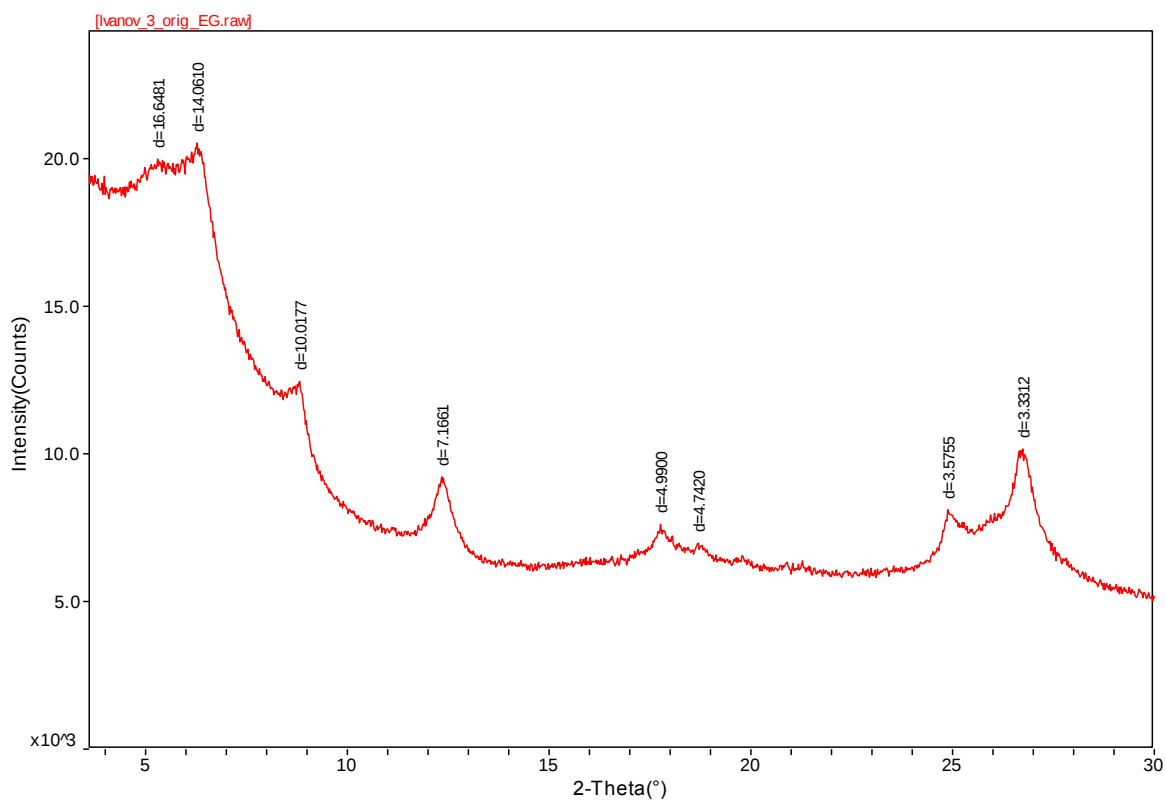
3. Суглинок тяжелый пылеватый (Образец 1) после обработки микроорганизмами (BC)



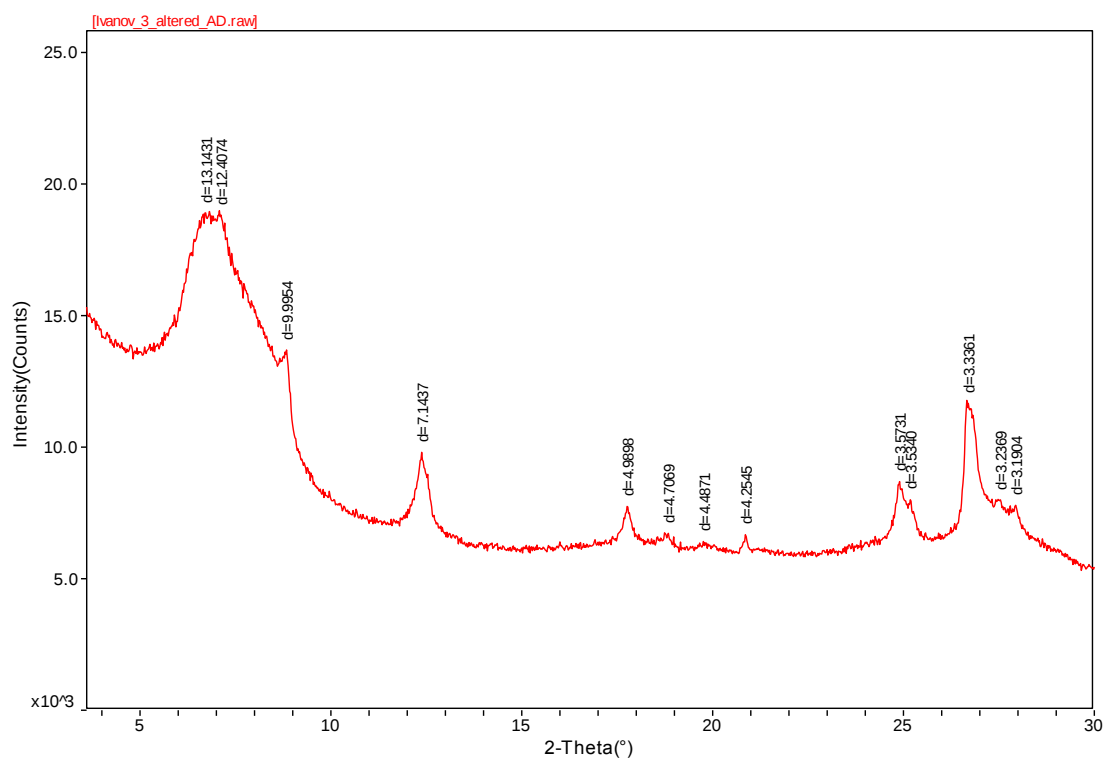
4. Суглинок тяжелый пылеватый (Образец 1) после обработки микроорганизмами (ЭГ)



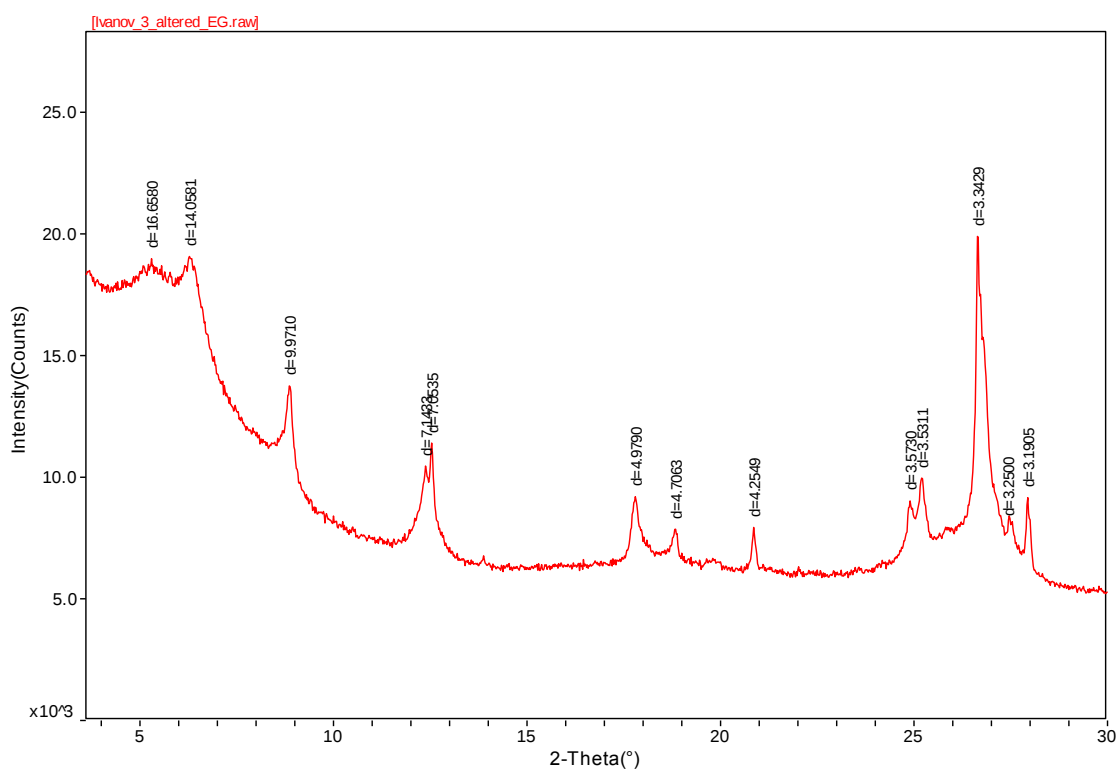
5. Суглинок легкий песчанистый (Образец 2) исходный (ВС)



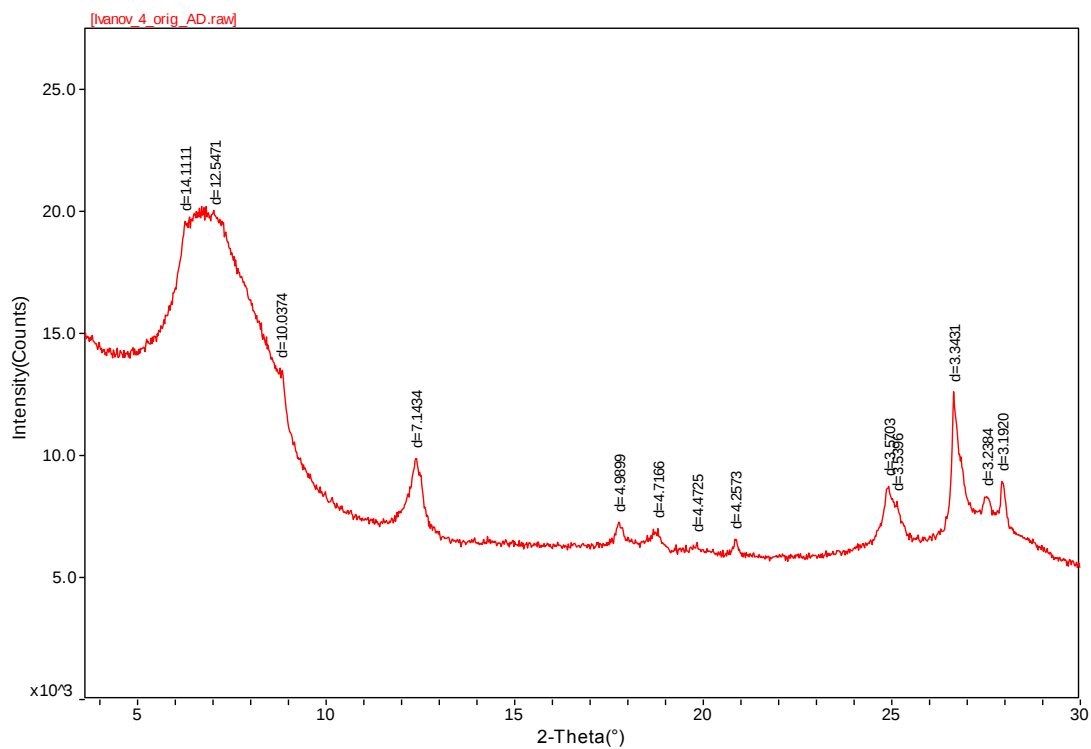
6. Суглинок легкий песчанистый (Образец 2) исходный (ЭГ)



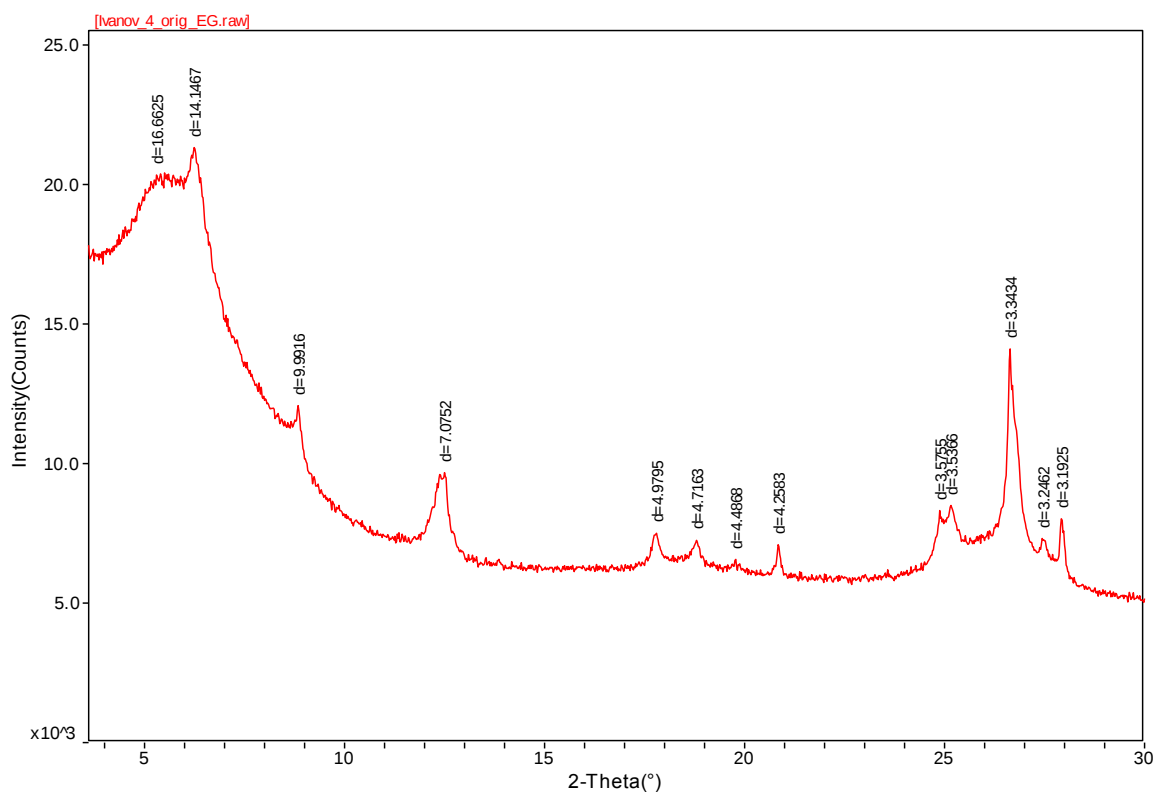
7. Суглинок легкий песчанистый (Образец 2) после обработки микроорганизмами (ВС)



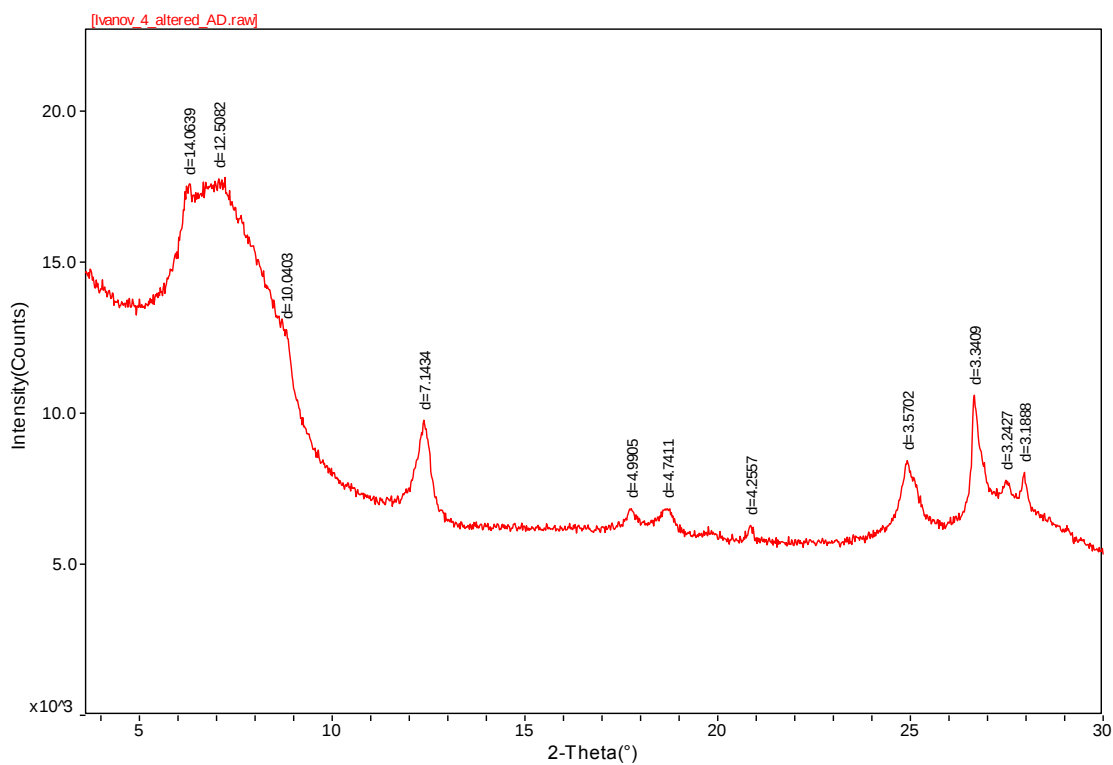
8. Суглинок легкий песчанистый (Образец 2) после обработки микроорганизмами (ЭГ)



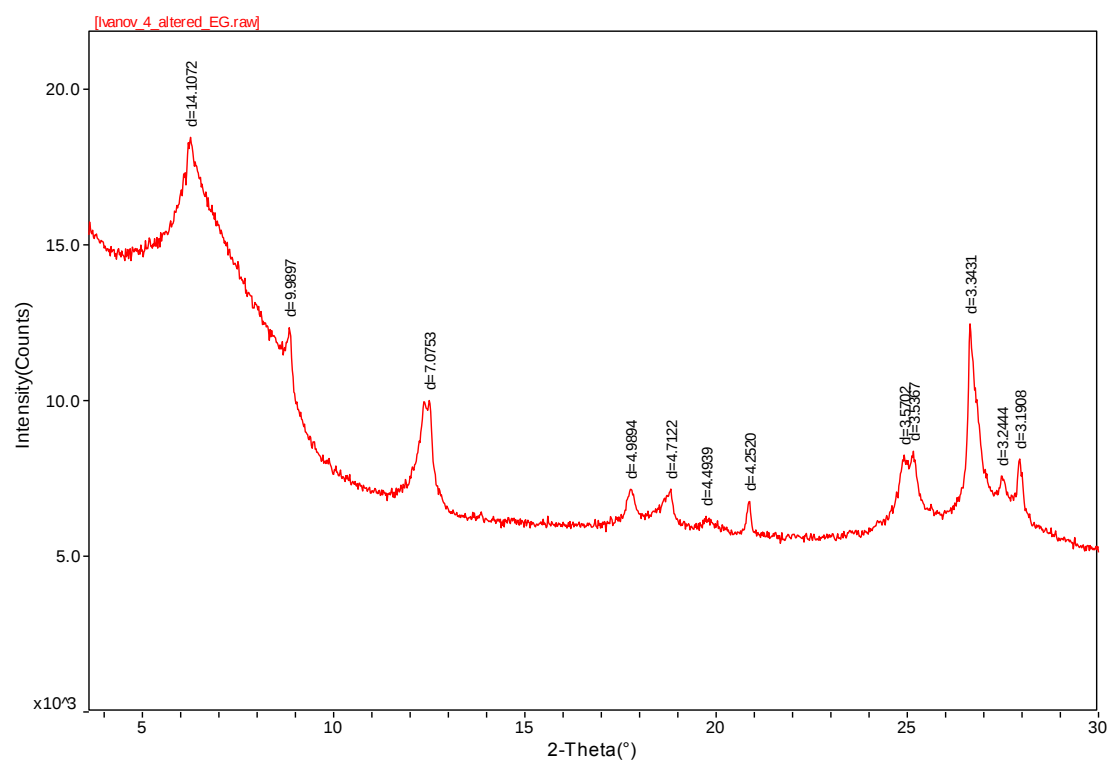
9. Суглинок легкий песчанистый (Образец 3) исходный (ВС)



10. Суглинок легкий песчанистый (Образец 3) исходный (ЭГ)

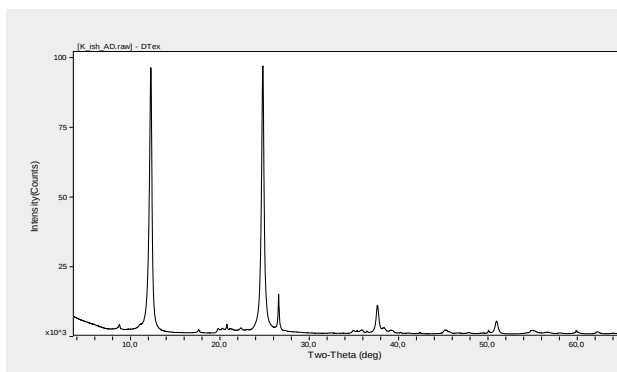


11. Суглинок легкий песчанистый (Образец 3) после обработки микроорганизмами (BC)

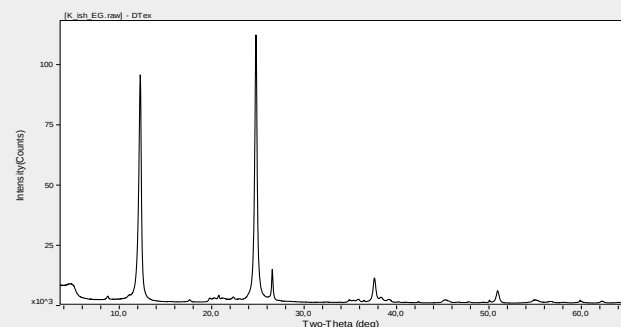


12. Суглинок легкий песчанистый (Образец 3) после обработки микроорганизмами (ЭГ)

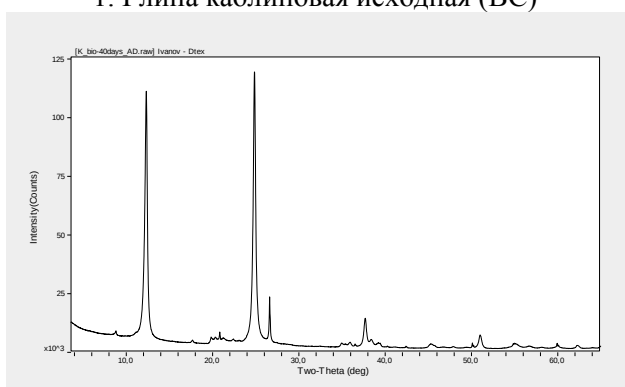
VIII. Модельные мономинеральные глинистые грунты



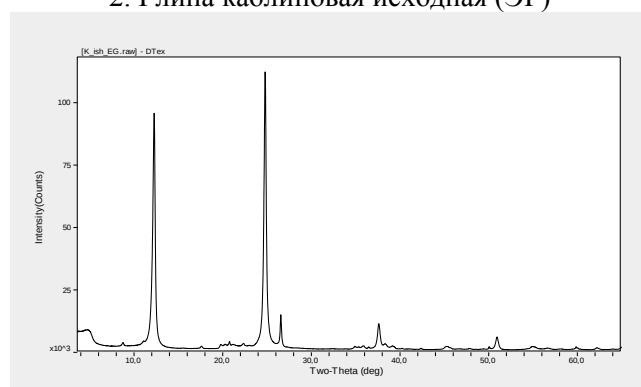
1. Глина каолиновая исходная (BC)



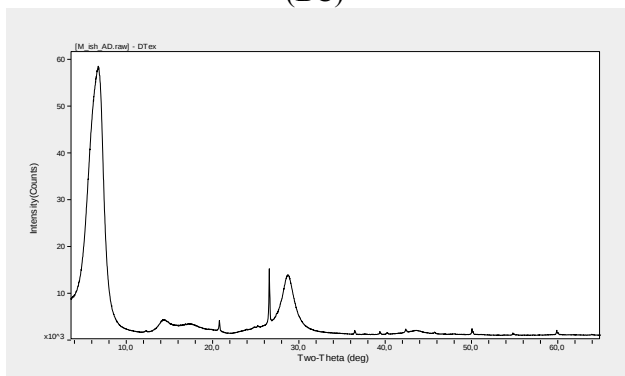
2. Глина каолиновая исходная (ЭГ)



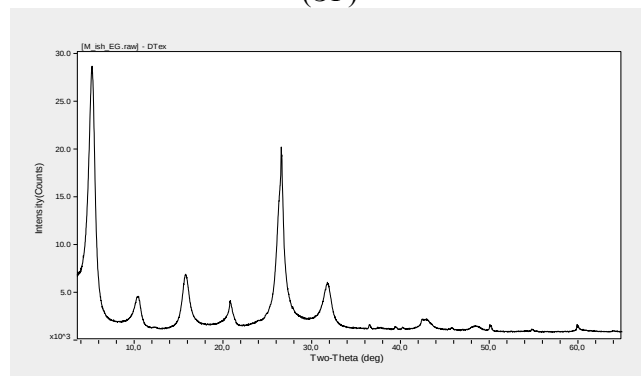
3. Глина каолиновая после 30 суток сукцессии (BC)



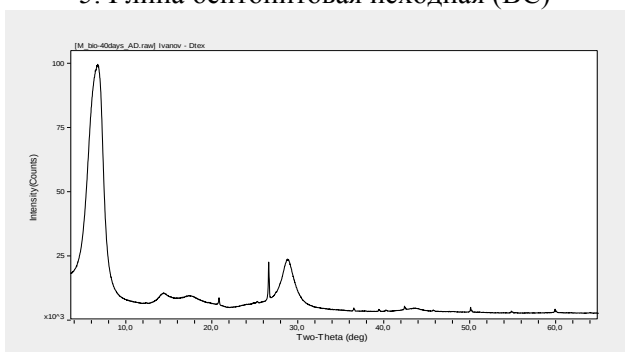
4. Глина каолиновая после 30 суток сукцессии (ЭГ)



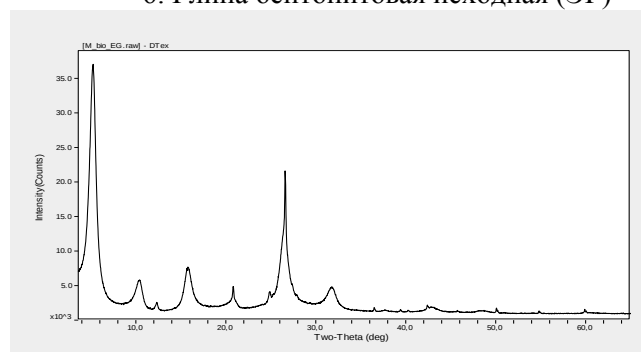
5. Глина бентонитовая исходная (BC)



6. Глина бентонитовая исходная (ЭГ)



7. Глина бентонитовая после 30 суток сукцессии (BC)



8. Глина бентонитовая после 30 суток сукцессии (ЭГ)

Приложение 4. Характеристики исходного гранулометрического и микроагрегатного состава грунтов

Таблица Д. Результаты анализа гранулометрического состава песчаных грунтов

№ об р.	Геологический индекс	Содержание частиц по фракциям (мм), %											Название грунта	d ₅₀	d ₆₀ /d ₁₀
		> 1	1- 0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	0,1- 0,05	песча- ные	0,05- 0,01	0,01- 0,005	0,005- 0,001	пылева- тые	<0,00 1			
1	fQ _{II} ms	7	9	20	27	11	74	7	9	2	18	8	песок пылеватый	0,16	44
2	f,lgQ _I dns-Q _{II} ms	0	2	14	73	8	97	3					песок мелкий	0,16	1,9
3	K ₁	2	21	35	17	3	79	7	4	2	13	8	песок средней крупности	0,33	65

Примечания: 1) название грунта дано по ГОСТ 25100-2011; 2) грансостав для образцов № 1, 3, получен с помощью ситового и пипеточного анализов; 3) d₅₀ - средний диаметр частиц; 4) d₆₀/d₁₀ - коэффициент неоднородности.

Таблица Е. Показатели гранулометрического и микроагрегатного анализа природных глинистых грунтов

Образцы	Содержание фракций (мм) %								d ₁₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₆₀ /d ₁₀
	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001				
Гранулометрический состав												
Суглинок легкий пылеватый ("аллювиальный суглинок ")	3	5	9	61	7	4	5	6	0,003	0,07	0,08	2,7
Глина легкая пылеватая ("юрская глина")	1	13	9	22	18	11	4	22	<0,001	0,03	0,06	>60
Микроагрегатный состав												
Суглинок легкий пылеватый ("аллювиальный суглинок ")	3	5	38	12	35	2	2	2	0,013	0,09	0,12	9,2
Глина легкая пылеватая ("юрская глина")	3	7	22	23	39	2	2	1	0,013	0,06	0,08	6,2

Таблица Ж. Показатели гранулометрического и микроагрегатного анализа грунтов основания Камской ГЭС

Образцы	Содержание фракций (мм), %								d ₁₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₆₀ /d ₁₀
	>0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001				
Гранулометрический состав												
Суглинок тяжелый пылеватый (9,3-9,6)	0	0	11	5	53	19	7	5	0,004	0,018	0,025	6,3
Суглинок легкий песчанистый (8,0-8,3)	1	15	27	1	21	24	5	6	0,005	0,03	0,11	22
Суглинок легкий песчанистый (6,5-6,8)	0	1	45	14	13	8	9	10	0,001	0,08	0,11	11
Микроагрегатный состав												
Суглинок тяжелый пылеватый (9,3-9,6)	0	6	17	17	37	4	14	5	0,002	0,03	0,04	20
Суглинок легкий песчанистый (8,0-8,3)	0	20	33	16	20	6	4	1	0,01	0,1	0,15	15
Суглинок легкий песчанистый (6,5-6,8)	0	4	51	21	15	6	2	1	0,01	0,11	0,14	14

Таблица И. Показатели гранулометрического и микроагрегатного состава техногенных грунтов

Образцы	Содержание фракций (мм) %								d ₁₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₆₀ /d ₁₀
	>0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001				
Гранулометрический состав												
Пылеватый песок («Новодевичий»)	11	25	23	21	3	6	4	5	0,006	0,15	0,25	41
Суглинок («Коломенская»)	15	15	14	16	11	10	10	8	0,002	0,15	0,25	125
Суглинок («Каширская»)	12	13	11	36	6	5	9	8	0,004	0,09	0,15	37
Микроагрегатный состав												
Пылеватый песок («Новодевичий»)	18	29	23	21	7	2	5	2	0,009	0,15	0,25	27
Суглинок («Коломенская»)	14	19	17	29	4	8	4	6	0,004	0,25	0,35	88
Суглинок («Каширская»)	13	17	17	28	4	7	7	7	0,005	0,1	0,15	30

Приложение 5. Некоторые показатели состава и свойств аллювиальных грунтов основания земляных плотин Камской ГЭС

Номер грунта	№ выработки	Глубина отбора проб, м	Название грунта	W _e *, д.е.	I _L * _e , д.е.	W _{sat} , д.е.	W _L , д.е.	W _p , д.е.	I _p , д.е.	I _L , д.е.	ρ, г/см ³	ρ _s , г/см ³	ρ _d , г/см ³	n, %	e, д.е.	S _r , д.е.	сод. орг. в-в, д.е.	φ, ⁰	C, кПа	E, Мпа
1	с-2	9,3-9,6	Суглинок тяжелый пылеватый мягкопластичный	0,23	0,56	0,30	0,27	0,18	0,09	1,34	1,96	2,71	1,51	44	0,80	0,79	0,06	11	15	5,1
2	с-1	8,0-8,3	Суглинок легкий песчанистый тугопластичный	0,18	0,33	0,26	0,24	0,15	0,09	1,22	2,07	2,71	1,60	39	0,65	0,74	-	17	44	2,8
3	с-3	6,5-6,8	Суглинок легкий песчанистый мягкопластичный	0,21	0,70	0,26	0,24	0,14	0,10	1,20	2,03	2,70	1,61	40	0,68	0,84	-	18	12	2,2

Примечание: * - даны показатели свойств в естественном залегании

Приложение 6. Численность и биомасса основных типов микроорганизмов в изученных грунтах

Образцы	Глубина отбора, м	Сод-е органич в-ва, %	Бактерии		Актиномицеты		Грибы		Общая бм, мг/г
			ч, $\times 10^8$ кл/г	бм, мг/г	ч, мкм/г	бм, мг/г	ч, мкм/г	бм мг/г	
Песок пылеватый tQ _{IV} ("Новодевичий")	0,4	0,6	8,4	0,170	0,5	0,003	1,5	0,045	0,218
Суглинок aQ _{III} ("аллювиальный суглинок")	0,5	0,5	7,9	0,158	0,5	0,003	1,5	0,045	0,206
Суглинок tQ _{IV} ("Коломенская")	2,0	0,7	5,5	0,110	0,9	0,004	1,0	0,030	0,144
Суглинок tQ _{IV} ("Каширская")	4,0	0,3	5,0	0,100	0,4	0,002	0,8	0,024	0,126
Песок пылеватый fQ _{IIms}	6,0	0	3,6	0,072	0	0	0,6	0,020	0,092
Песок мелкий f,lqQ _I dns-Q _{IIms}	20,0	0	2,7	0,055	0	0	0,7	0,020	0,075
Песок средней крупности K ₁	25	0,1	3,3	0,065	0	0	0,2	0,01	0,075
Глина легкая пылеватая J _{3ox} ("юрская глина")	36	2,3	3,4	0,068	0,4	0,002	0,2	0,01	0,078
Глина бентонитовая	-	-	1,5	0,031	0	0	0	0	0,031
Глина каолиновая	-	-	1,8	0,036	0,4	0,002	0	0	0,038

Примечание: ч – численность, бм – биомасса

Приложение 7. Характеристики исследуемых грунтов в ходе микробной сукцессии

Таблица К. Некоторые показатели состава и свойств песчаных грунтов в ходе микробной сукцессии

Показатели/срок	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Плотность частиц грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Коэффициент водонасыщения	Относительное содержание органического вещества, %	Потери при прокали- вании, %	Угол внутрен- него трения, град	Сцепле- ние, кПа
Техногенный песок tQ_{IV}										
до опыта	10	1,60	1,45	2,64	0,82	0,32	0,6	3,124	23	2
7 суток сукцессии	15	1,60	1,43	2,64	0,85	0,37	-	2,624	20	3
30 суток сукцессии	14	1,60	1,43	2,64	0,85	0,37	0,6	2,497	17	8
Природный пылеватый песок fQ_{IIms}										
до опыта	15	1,71	1,49	2,64	0,78	0,51	0,0	2,580	17	0
7 суток сукцессии	14	1,71	1,50	2,64	0,76	0,49	-	2,514	12	3
30 суток сукцессии	13	1,71	1,51	2,64	0,74	0,46	0,2	2,868	24	0

Природный мелкий песок f,lgQ _I dns-Q _{II} ms										
до опыта	22	1,88	1,54	2,63	0,71	0,81	0,0	0,354	33	1
7 суток сукцессии	23	1,88	1,53	2,63	0,73	0,83	-	0,352	28	9
30 суток сукцессии	22	1,88	1,54	2,63	0,71	0,81	0,3	0,394	37	7
Природный песок средней крупности K ₁										
до опыта	22	1,77	1,45	2,64	0,82	0,71	0,1	1,220	21	0
7 суток сукцессии	20	1,77	1,48	2,64	0,79	0,67	-	1,213	15	7
30 суток сукцессии	20	1,77	1,48	2,64	0,79	0,67	0,6	1,326	23	0

Таблица Л. Показатели состава и свойств суглинка тяжелого пылеватого (КамГЭС, грунт 1, скв. 2, гл. 9,3-9,6 м) до и после обработки микроорганизмами

Показатели	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Плотность частиц грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Коэффициент водонасыщения	Угол внутр трения	Сцепление, кПа	Модуль общ деф, МПа
до опыта	30	1,96	1,51	2,71	0,80	1,0	11	15	5,1
после опыта	40	1,83	1,31	2,71	1,07	1,0	10	5	3,0

Таблица М. Показатели состава и свойств суглинка легкого песчанистого (КамГЭС, грунт 2, скв. 1, гл. 8,0-8,3 м) до и после обработки микроорганизмами

Показатели	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Плотность частиц грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Коэффициент водонасыщения	Угол внутр трения	Сцепление, кПа	Модуль общ деф, МПа
до опыта	26	2,07	1,64	2,71	0,65	1,0	17	44	2,8
после опыта	30	2,02	1,55	2,71	0,74	1,0	13	16	2,2

Таблица Н. Показатели состава и свойств суглинка легкого песчанистого (КамГЭС, грунт 3, скв. 3, гл. 6,5-6,8 м) до и после обработки микроорганизмами

Показатели	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Плотность частиц грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Коэффициент водонасыщения	Угол внутр трения	Сцепление, кПа	Модуль общ деф, МПа
до опыта	26	2,03	1,61	2,70	0,68	1,0	18	12	2,2
после опыта	30	1,94	1,49	2,70	0,81	1,0	11	8	1,6

Таблица П. Показатели состава и свойств образцов на основе природных и техногенных грунтов нарушенного сложения на разных сроках сукцессии

Образцы	Песок пылеватый tQ _{IV} ("Новодевичий")							Суглинок tQ _{IV} ("Каширская")						
Время, сутки	1	4	7	10	14	21	28	1	4	7	10	14	21	28
Влажность W, %	10	10	10	11	10	9	9	12	11	11	11	11	11	11
Плотность сложения грунта ρ , г/см ³	2,07	2,08	2,08	2,09	2,1	2,06	2,05	2,25	2,28	2,28	2,32	2,26	2,34	2,25
Плотность скелета грунта ρ , г/см ³	1,88	1,89	1,89	1,88	1,91	1,89	1,88	2,01	2,05	2,05	2,09	2,04	2,11	2,03
Пористость n, %	28	28	28	28	27	28	28	23	22	24	20	22	20	23
Коэффициент пористости e, %	0,39	0,39	0,39	0,39	0,37	0,39	0,39	0,30	0,28	0,31	0,25	0,29	0,24	0,29
Степень водонасыщения K _w	0,67	0,68	0,68	0,74	0,70	0,61	0,60	1,00	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00
Временное сопротивление одноосному сжатию R _c , МПа	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	1,10	1,00	0,99	1,19	1,21	1,37	1,36

Таблица II (продолжение)

Образцы	Глина (J _{зоx})							Суглинок (aQ _{III})						
Время, сутки	1	4	7	10	14	21	28	1	4	7	10	14	21	28
Влажность W, %	19	19	19	21	22	20	20	15	11	15	12	10	11	13
Плотность сложения грунта ρ , г/см ³	1,81	1,82	1,8	1,89	1,86	1,87	1,87	1,97	1,98	1,92	1,96	1,94	1,94	1,94
Плотность скелета грунта ρ , г/см ³	1,52	1,53	1,51	1,56	1,52	1,56	1,56	1,71	1,78	1,72	1,75	1,76	1,75	1,72
Пористость n %	41	41	42	37	42	40	40	35	32	36	33	33	33	34
Коэффициент пористости e, %	0,71	0,7	0,72	0,58	0,73	0,67	0,67	0,53	0,47	0,51	0,5	0,49	0,5	0,53
Степень водонасыщения K _w	0,7	0,71	0,69	0,89	0,85	0,78	0,78	0,74	0,61	0,69	0,63	0,54	0,58	0,65
Временное сопротивление одноосному сжатию R _c , МПа	0,88	0,66	0,77	0,89	0,92	1,06	1,09	0,34	0,33	0,26	0,41	0,45	0,5	0,53