Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Колосова Дарья Леонидовна



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ВОДО- И ВОДОГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

Специальность 1.6.7. Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук, профессор
Дашко Р.Э.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 4

Глава 1 ПРИРОДА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ 10

1.1 Инженерно-геологическая и геотехническая оценка глинистых грунтов как основания и среды сооружений различного назначения 10

1.2 Генетическая природа формирования прочности и деформационной способности глинистых пород 13

1.2.1 Первичные глинистые грунты 16

1.2.2 Глинистые отложения субаквальных обстановок 18

1.2.3 Глинистые отложения субаэральных обстановок 25

1.2.4 Вулканогено-осадочные и гидротермальные типы глинистых отложений 25

1.3 Глинистые минералы и особенности их кристаллохимического строения 27

1.4 Природа формирования структурных связей глинистых грунтов 33

1.5 Природа прочности и деформационной способности глинистых грунтов 38

1.6 Природные и техногенные факторы, определяющие фазовое состояние грунтов и его преобразование 48

1.7 Выводы по главе 1 55

Глава 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРОВОЙ ВОДЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ АБИОТИЧЕСКОГО И БИОТИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА ФАЗ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ 58

2.1 Современные представления о структуре воды в объеме 58

2.2 Теоретические и научно-практические положения изменения структуры свободной воды в растворах 61

2.3 Основные положения явления ядерного магнитного резонанса 63

2.4 Изменение структуры поровой воды под воздействием активных центров твердой поверхности 71

2.5 Анализ трансформации структуры поровой воды в тонкодисперсных грунтах 77

2.6 Выводы по главе 2 95

Глава 3 ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ВОДО- И ВОДОГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ 98

3.1 Научно-практические положения теории фильтрационной консолидации 98

3.2 Научно-практические положения ревизии теории фильтрационной консолидации на основе анализа экспериментальных данных структуры поровой воды в многофазных глинистых грунтах 107
3.3 Основные положения проектирования сооружений по предельным состояниям 110
3.4 Анализ условий строительства и эксплуатации сооружений, проектируемых по II-му предельному состоянию 115
3.5 Оценка длительной устойчивости сооружений промышленной гидротехники, проектируемых по I-му предельному состоянию 132
3.6 Анализ условий эксплуатации транспортных сооружений – насыпей 150
3.7 Выводы по главе 3 156
Глава 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ НА ВОДО- И ВОДОГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ МАЛОЙ И ЧАСТИЧНО СРЕДНЕЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ 158
4.1 Общие положения нормативной документации о проектировании наземных сооружений различного назначения, возводимых на водонасыщенных тонкодисперсных грунтах 158
4.2 Роль реологических процессов в развитии осадок оснований сооружений 170
4.3 Выводы по главе 4 181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 182
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 184
ПРИЛОЖЕНИЕ А Справка об использовании результатов кандидатской диссертации . 199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Обеспечение безопасности строительства и длительной устойчивости наземных зданий и сооружений различного назначения, возводимых на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах, рассматривается как одна из сложных задач в современной практике инженерной геологии и геотехники.

Инженерно-геологический опыт проведения экспертиз и научно-практических исследований, выполненных для гражданских зданий, промышленных, гидротехнических и транспортных сооружений, архитектурно-исторических памятников свидетельствует о том, что одна из причин их перехода в ограничен-но-работоспособное и реже аварийное состояние заключается в некорректной трактовке процессов, протекающих в основании, в первую очередь при изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов.

При проектировании сооружений, возводимых на водонасыщенных песчано-глинистых грунтах, и выполнении расчетов устойчивости их оснований большое внимание уделяется параметрическому обеспечению, интерпретация которого базируется на использовании положений теории фильтрационной консолидации. Применение ее принципов предопределяет количественные значения показателей сопротивления сдвигу грунтов и модуля деформации, которые непосредственно задействованы при решении задач устойчивости сооружений и получении достоверных величин абсолютных и относительных осадок.

Для прогнозирования длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности наземных сооружений различного назначения следует рассматривать не только воздействие их давления, но и формирование нового НДС за счет преобразования физико-химических и биохимических условий подземной среды в результате ее контаминации органическими и неорганическими соединениями абиотического и биотического генезиса.

Степень разработанности темы исследования

Становление научно-практического подхода при решении задач устойчивости оснований в механике грунтов на международном уровне берет свое начало с Первой Международной конференции по механике грунтов и фундаментостроению, состоявшейся в 1936 г. в Гарвардском университете.

Комплексный подход к анализу взаимодействия единой системы «основание – сооружение» и ее устойчивости в инженерной геологии и геотехнике был заложен еще Н.В. Бобковым и развит в последующие годы в трудах Н.Н. Маслова, В.Д. Ломтадзе, Б.И. Далматова, В.М. Улицкого, А.Г. Шашкина, К.Г. Шашкина, О.А. Шулятьева, Р.А. Мангушева, В.Н. Парамонова, А.И. Осокина, Р.Ф. Шарафутдинова, Р. Катценбаха, Дж. Берланда и др.

Анализ развития деформаций водонасыщенных глинистых грунтов во времени под действием постоянного давления в условиях одномерной задачи уплотнения был предложен К. Терцаги в 1925 г. Дальнейшее развитие теории фильтрационной консолидации связано с работами А. Казагранде, М.Э. Био, В.А. Флорина, Н.А. Цытовича, З.Г. Тер-Мартиросяна, М.Ю. Абелева, Ю.К. Зарецкого, С.А. Розы, Е.И. Медкова, А.И. Ксенофонтова и др.

Значительный вклад в развитие учения о микростроении глинистых грунтов различной степени литификации внесен инженерно-геологической школой МГУ – исследованиями В.И. Осипова, В.Н. Соколова, Н.А. Румянцевой и др. под руководством Е.М. Сергеева.

До настоящего времени при развитии и совершенствовании теории фильтрационной консолидации не уделялось должного внимания трансформации структуры поровой воды в глинистых грунтах под действием различных активных центров. Исследования воды в порах глинистых грунтов в рамках инженерной геологии и грунтоведения были проведены А.Ф. Лебедевым, Е.М. Сергеевым, Р.И. Злочевской, В.А. Королевым, В.И. Квливидзе, В.С. Голубевой и др. Эти работы предполагают наличие изменения структуры свободной воды только в глинистых грунтах устойчивой консистенции. Однако Р.Э. Дашко под руководством В.И. Чижика с помощью метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) было установлено, что в водонасыщенных глинистых отложениях текучепластичной и текучей консистенции различного гранулометрического, минерального состава и при наличии поровых вод с широким диапазоном их концентрации свободная вода отсутствует.

Использование концепции многокомпонентного подземного пространства, широко применяемой в практике инженерно-геологических исследований, а также совершенствование методики ЯМР-экспериментов создают основу для развития теоретических и научно-практических подходов прогнозирования длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности наземных сооружений различного назначения с изучением не только абиотических фаз грунта, но и биотической составляющей.

Предмет, объект исследования

Объект исследования – водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты различного генезиса малой и частично средней степени литификации как многофазные системы с учетом не только абиотических, но и биотических составляющих.

Предмет исследования – обоснование ревизии процесса фильтрационной консолидации водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов при изменении НДС основания сооружения под воздействием его давления и контаминации подземной среды абиотическими и биотическими соединениями.

Цель работы – совершенствование инженерно-геологических позиций анализа и оценки многофазных тонкодисперсных грунтов как основания сооружений в условиях преобразования

и упрочнения структуры поровой воды под действием активных центров различных фаз, повышающей степень инертности поровой воды к изменению НДС.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих задач:

1. Проведение анализа формирования и изменения природы прочности и деформационной способности многофазных тонкодисперсных грунтов под воздействием природных и техногенных факторов, в том числе контаминации подземной среды.

2. Анализ характера изменения структуры поровой воды как «жидкого кристалла» под действием активных центров глинистых частиц, катионов ее диффузного слоя и микропузырьков газа на базе ранее проведенных исследований Р.Э. Дашко под руководством В.И. Чижика.

3. Применение ЯМР как современного метода экспериментальных исследований, который позволяет дать количественную оценку степени послойного структурирования поровой воды в широком диапазоне варьирования размера пор под действием активных центров различных фаз дисперсных грунтов.

4. Оценка воздействия на структуру поровой воды тонкодисперсных грунтов биогенной фазы – бактерий, микроводорослей и белков.

5. Совершенствование положений теории фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов с учетом использования экспериментальных исследований преобразования структуры поровой воды под воздействием различных фаз дисперсного грунта и ее инертности по отношению к действию давления.

6. Использование разработанных положений для корректировки положений теории фильтрационной консолидации при проектировании, строительстве и эксплуатации наземных сооружений различного назначения в условиях контаминации подземной среды.

Научная новизна работы:

1. На основе экспериментальных исследований с применением метода ЯМР установлена послойная трансформация структуры воды в поровом пространстве водонасыщенных глинистых грунтов малой и частично средней степени литификации, размер пор которых не превышает 20 мкм.

2. Экспериментально показано воздействие активных центров биогенной составляющей – бактерий, микроводорослей и продуктов их метаболизма (белков) на преобразование структуры поровой воды в дисперсных грунтах.

3. Послойное преобразование структуры поровой воды подтверждает необходимость разделения активных центров абиогенных и биогенных фаз грунта на эпитаксиальные (близкодействующие, изменяющие плотность воды в сторону ее увеличения) и поляризующие

(дальнодействующие – до 10 мкм), останавливающие трансляционное движение молекул воды с формированием ее инертности по отношению к действию давления от сооружения.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, по пунктам: 1, 2, 3, 8, 12.

Теоретическая и практическая значимость работы:

На основе анализа теоретических положений действия активных центров твердой поверхности дисперсных частиц, клеток микроорганизмов и продуктов их метаболизма, подтвержденных экспериментальными исследованиями методом ЯМР различных типов водонасыщенных дисперсных грунтов малой и частично средней степени литификации обоснована высокая степень структурированности поровой воды. Полученные закономерности диктуют необходимость ограничения применения теории фильтрационной консолидации для водонасыщенных глинистых грунтов, которая базируется на гипотезе наличия свободной воды в поровом пространстве.

Методология и методы исследования:

1. Применение концептуального подхода к изучению подземного пространства как многокомпонентной системы;

2. теоретический анализ особенностей воздействия активных центров абиотических и биотических фаз грунта – тонкодисперсных частиц и катионов их диффузных слоев, клеток микроорганизмов и продуктов их метаболизма;

3. экспериментальные методы, используемые в грунтоведении и инженерной геологии для определения гранулометрического состава и физико-механических свойств дисперсных грунтов;

4. применение методов физики и физико-химии с целью получения параметров спин-решетчатой релаксации T_1 и спектральных линий для оценки степени структурированности поровой воды дисперсных грунтов; использование микробиологических методов для выделения живых культур микроорганизмов с целью их использования в экспериментальных исследованиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Повышение безопасности строительства и эксплуатации наземных сооружений различного назначения на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах должно базироваться на анализе последних как многофазных систем, активные центры которых преобразуют структуру поровой воды и формируют ее инертность по отношению к изменению напряженно-деформированного состояния в основании.

2. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований с использованием ядерного магнитного резонанса установлено послойное структурирование поровой воды в многофазных тонкодисперсных грунтах, наиболее существенный вклад в формирование степени инертности которой вносят активные центры биогенной фазы.

3. Инженерно-геологическое прогнозирование длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности сооружений, в основании которых прослеживаются многофазные водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты, следует базировать на двух- или трехмерных задачах изменения напряженно-деформированного состояния с учетом преобразования физико-химических и биохимических условий в подземной среде.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена использованием междисциплинарного подхода при анализе абиогенного и биогенного фазового состава дисперсных грунтов, определяющего разнообразие активных центров и интенсивность их воздействия на глубокую трансформацию структуры поровой воды, результатом которой служит степень ее инертности по отношению к действию внешнего давления. Полученные выводы по результатам экспериментальных работ подтверждаются инженерно-геологическими исследованиями состояния глинистых грунтов малой и частично средней степени литификации в основании сооружений различного назначения с установлением причин их перехода в ограниченно-работоспособное и аварийное состояние при контаминации подземной среды неорганическими и органическими соединениями.

Апробация результатов диссертации проведена на 9 научно-практических мероприятиях с докладами (7 за последние три года), в том числе на 4 международных: XXVI Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2022 г.), XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), XVII Общероссийская научно-практическая конференция и выставка «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (г. Москва, 2022 г.), Годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии – научная конференция «Двадцать четвертые Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики» (г. Казань, 2023 г.), XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2023 г.), 21st International School-Conference “Magnetic resonance and its applications” (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), XXIV Всероссийское совещание по подземным водам Востока России (г. Екатеринбург, 2024 г.), Научная конференция студентов и аспирантов «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), XX Всероссийская конференция-конкурс студентов

выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования; выполнении экспериментальной части диссертационного исследования степени структурированности поровой воды в многофазных тонкодисперсных грунтах; обработке и интерпретации полученных данных и их использовании для ревизии положений теории фильтрационной консолидации и определения несущей способности оснований с целью повышения безопасности строительства и длительной устойчивости сооружений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 181 наименование. Диссертация изложена на 200 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 24 таблицы.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность и глубокую, искреннюю признательность научному руководителю д.г.-м.н., профессору Р.Э. Дашко за неоценимую поддержку, помощь и внимание на всех этапах подготовки диссертации. Автор благодарит зав. кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии к.г.-м.н., доцента Д.Л. Устюгова, преподавателей и сотрудников кафедры за обсуждение материалов диссертации и замечания к работе; д.ф.-м.н., профессора В.И. Чижика и научного сотрудника А.В. Иевлева каф. ядерно-физических методов исследования СПбГУ, к.ф.-м.н., специалиста ресурсного центра «Магнитно-резонансные методы исследования» СПбГУ А.С. Мазура за организацию и возможность проведения экспериментальных физических исследований и интерпретацию полученных результатов; д.б.н., профессора, зав. лабораторией микологии и альгологии СПбГУ Д.Ю. Власова за предоставление разнообразных штаммов микроорганизмов для проведения экспериментальных работ.

Глава 1 ПРИРОДА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ

1.1 Инженерно-геологическая и геотехническая оценка глинистых грунтов как основания и среды сооружений различного назначения

В настоящее время инженерно-геологическая и геотехническая оценка глинистых грунтов базируется на их рассмотрении как тонкодисперсных многофазных систем, содержащих глинистые, пылеватые и песчаные фракции и обладающих связностью, пластичностью и специфическими физико-химическими свойствами, в условиях варьирования их физического состояния, во многом определяющего прочность и деформационную способность [28, 35, 68, 81].

Однако технологии строительства в особо сложных инженерно-геологических условиях при освоении и использовании подземного пространства, а также технологии применения новых строительных материалов развиваются значительно быстрее, чем учение о грунтах и горных породах, рассматриваемых как основание и среда для сооружений различного назначения. Традиционные подходы к оценке глинистых отложений, разработанные еще в 30-х годах XX в. и широко используемые в настоящее время, во многом исходят из положений почвоведения. В рамках этой науки во главе угла стоит изучение физического состояния грунтов (почв) и экспериментально-расчетное определение таких показателей, как плотность, влажность, пористость и консистенция. Последняя оценивается через характерные значения влажностей: на пределе загнивания и увядания корневой системы, которые в почвоведении имеют физический смысл. Первый из показателей, предложенный А. Аттербергом, в инженерной геологии трактуется как верхний предел пластичности W_L глинистых грунтов, а второй – нижний предел пластичности W_P. Названные параметры W_L и W_P в инженерной геологии не имеют физического смысла. Соответственно, оценка консистенции грунтов, основанная на сравнении естественной влажности W с W_L и W_P, не отражает реального поведения и состояния глинистых грунтов как основания или среды сооружений в условиях изменения их напряженно-деформированного состояния (НДС). Вместе с тем в теории и практике материаловедения дисперсных систем консистентность определяется степенью подвижности частиц при механическом воздействии, изменении НДС. Степень подвижности грунта должна определяться при постоянной влажности в условиях сохранения естественного сложения и постепенного разрушения структурных связей различной природы и прочности между частицами и их агрегатами. Однако согласно ГОСТ 5180 показатель консистенции тонкодисперсных разностей определяется на образцах нарушенного сложения [26].

В настоящее время водо- и водогазонасыщенные тонкодисперсные грунты анализируются как многофазные среды в присутствии твердой, жидкой, газообразной и биотической составляющих [28, 81]. Наиболее значимой является твердая фаза, ее генезис и длительность

природного и техногенного воздействия на грунт, определяющих ее преобразование во времени. Вполне понятно, что грунт будет называться глинистым в присутствии определенного содержания тонкодисперсной фракции, представленной в первую очередь глинистыми минералами – слоистыми алюмосиликатами, размер которых составляет < 2-5 мкм. Бóльшие значения (< 5 мкм) характерны для глинистых минералов с жесткой кристаллической решеткой, а меньшие (< 2 мкм) – с подвижной. Такая фракция диктует характерные свойства глинистых грунтов, а именно их гидрофильность, поглотительную способность (адсорбция, абсорбция), а также физико-химический ионный обмен, связанный со строением глинистой частицы в водной среде и формированием ее диффузного слоя. К числу процессов, которые к настоящему времени недостаточно изучены, может быть отнесено набухание тонкодисперсных отложений в условиях НДС и обводнения толщи грунтов водами с широким диапазоном минерализации и микробной пораженности. Эти процессы анализировались длительное время на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II [35, 47]. Вместе с тем, в современной нормативной документации отсутствует классификация глинистых грунтов по содержанию глинистой фракции [25]. Следует понимать, что твердая составляющая грунтов может иметь не только абиотическое, но и биотическое происхождение. При определении грунтов необходимо учитывать составляющую, представленную микроорганизмами – бактериями, актиномицетами, микромицетами, микроводорослями.

Классификационным показателем служит число пластичности I_P, на основе которого грунты разделяются на супеси, суглинки и глины, которые в первую очередь должны характеризоваться гранулометрическим составом [25]. Следует отметить, что гранулометрический состав глинистых грунтов имеет более важное значение, поскольку соотношение трех основных фракций определяет особенности формирования и изменения физико-механических свойств грунтов в условиях естественного залегания в процессе прогрессивного и регрессивного литогенеза, а также техногенеза под действием многоцелевой деятельности человека. В 30-х годах прошлого века В.В. Охотиным была предложена трехчленная классификация песчано-глинистых грунтов, которая получила широкое применение в практике ее использования при решении инженерно-геологических и геотехнических задач. В дальнейшем в настоящей работе наименования глинистых грунтов будут приводиться согласно классификации В.В. Охотина. Следует обратить внимание, что разделение грунтов по В.В. Охотину коррелирует с распределением грунтов на группы по показателю I_P только для глинистых грунтов низкой и средней степени физико-химической активности, которая, как известно, определяет поглотительную способность отложений, набухание и физико-химический обмен и зависит преимущественно от минерального состава фракции. Если глинистая фракция

представлена минералами групп каолинита и гидрослюды, то между I_P и содержанием глинистой фракции M_c наблюдается соответствие. В присутствии глинистых минералов группы монтмориллонита такая корреляция отсутствует. В таких случаях даже содержание активной фракции < 10% обеспечивает значение I_P, характерное для глин. Несоответствие между гранулометрическим составом и состоянием грунтов по величине I_P может быть вызвано также и наличием микроорганизмов, прежде всего микроводорослей, имеющих раковины из биогенного аморфного кремнезема, который резко повышает гидрофильность отложений. Диатомовые водоросли планктонных и бентосных форм широко распространены в субаквальных отложениях морского и пресноводного генезиса в различных климатических зонах и при варьировании минерализации воды. Кроме того, на высокую гидрофильность дисперсных грунтов влияет присутствие хорошо разложившейся органики.

В практике инженерно-геологических исследований для оценки порового пространства используются главным образом показатели абсолютной величины пористости и относительной – коэффициент пористости, чаще применяемый при оценке деформационной способности грунтов. Не отрицая их значимости и достоверности, следует обратить внимание на необходимость изучения абсолютных размеров пор, их формы, сообщаемости в зависимости от генетического типа глинистых грунтов, их возраста (степени литификации), гранулометрического и минерального состава (особенно тонкодисперсной части), содержания органического вещества, биотической составляющей. Такие характеристики имеют важнейшее значение при оценке состояния структуры поровой воды в грунтах, которая диктует степень ее подвижности и инертности по отношению к действию давлений от сооружений и к изменению НДС в зависимости от характера распределения напряжений.

Следует особо отметить, что в последней четверти XX в. под руководством Е.М. Сергеева инженерами-геологами и грунтоведами Московского государственного университета и Варшавского университета В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым, Б. Грабовской-Ольшевской, Н.А. Румянцевой и др. с высокой степенью точности были выполнены уникальные исследования морфологии порового пространства глинистых грунтов (преимущественно в разрезе Русской плиты) с использованием растровой электронной микроскопии – от четвертичных до нижнекембрийских глин Северо-Запада [80, 81]. Выпущенный альбом фотографий микростроения имеет большое практическое значение для оценки деформационной способности и прочности глинистых грунтов, поскольку морфология порового пространства определяет структуру поровой воды, а также размеров пузырьков малорастворимой газовой фазы.

Анализируя значение малоизученной фазы газовой составляющей, необходимо обратить внимание на ее изучение со следующих позиций:

1. Растворимость газов в подземной среде: основные газы делятся на хорошо растворимые (диоксид углерода CO_2, кислород O_2), растворимые (сероводород H_2S, аммиак NH_3) и малорастворимые (метан CH_4, молекулярный водород H_2 и азот N_2). Согласно исследованиям, в глинистых грунтах, содержащих микроорганизмы, происходит формирование CH_4, H_2 и N_2. Образование растворимых газов находит свое отражение в минерализации поровых вод и величине кислотно-щелочного показателя pH.

2. Размер газовой фазы: газ приурочен к поровому пространству, поэтому абсолютный размер пор и степень газонасыщения определяют радиус газового пузырька. Принимая во внимание, что размер поры в среднем не превышает 10-12 мкм, а при степени водонасыщения $S_r = 0{,}8$ на газовую составляющую приходится 20%, радиус пузырьков составляет < 2-4 мкм. Газы такого маленького диаметра, учитывая их высокое поверхностное натяжение, относятся к несжимаемым, и они приравниваются к твердой фазе.

3. Генезис газов – биохимический, глубинный и каталитический. При наличии богатого анаэробного микробиоценоза генерация газов происходит за счет биохимических процессов.

При оценке состояния грунтов в условиях их многофазности при наличии микроорганизмов, не имеющих раковин, необходимо принимать во внимание многослойные бактериальные пленки, формирующиеся на дисперсных частицах и состоящие из живых и мертвых клеток микроорганизмов, а также продуктов их метаболизма. Наличие таких таксонов в силу их малых размеров <2-5 мкм предопределяет повышение гидрофильности отложений и влияет на размер и форму порового пространства.

1.2 Генетическая природа формирования прочности и деформационной способности глинистых пород

Формирование, развитие и существование различных глинистых образований в земной коре связаны с несколькими процессами глобального цикла: химическое выветривание, денудация, седиментация, диагенез и катагенез. Фундаментальные исследования в области литологии о процессах образования всего многообразия осадочных пород, включая глинистые грунты, принадлежат Н.М. Страхову, Н.Б. Вассоевичу, М.С. Швецову, Д.В. Наливкину, Л.Б. Рухину, Л.В. Пустовалову, и др., при этом в инженерной геологии необходимо отметить труды И.В. Попова, Е.М. Сергеева, В.Д. Ломтадзе, В.И. Осипова, В.Т. Трофимова, В.А. Королева, Н.Я. Денисова, И.Г. Коробановой, Г.А. Голодковской и др.

Согласно исследованиям различных авторов, в среднем 4-6% всей земной коры сложено различными генетическими типами глинистых пород, а их доля достигает 50-60% от объема всех осадочных отложений [61, 63, 89, 124]. Под стадиями литификации глинистых грунтов принято понимать последовательное протекание процессов диагенеза (преобразования осадка в грунт) и дальнейшего катагенеза. Корректный анализ степени литификации глинистых грунтов и их

перехода в метаморфизованные разности (аргиллиты, глинистые сланцы, филлиты и др.) за счет действия регионального метаморфизма необходимо проводить с учетом глубины их развития, которая определяется спецификой геодинамической обстановки в различных регионах.

Формирование глинистых грунтов в процессе их литификации необходимо рассматривать только в пределах платформенного этапа развития регионов. Зона относительно стабильных геодинамических обстановок характеризуется существенной глубиной распространения глинистых грунтов. Для территории России таким регионом выступает Восточно-Европейская платформа, в частности Северо-Западная часть России – северная оконечность Московской моноклинали (рисунок 1.1).

Глинистые грунты различного состава, состояния и свойств распространены по всей мощности осадочного чехла. Они включают глины различного возраста – от верхнего венда (V_2), которые перекрыты глинами палеозоя (PZ), в том числе нижнего кембрия ($Є_1$), среднего и верхнего девона (D_{2-3}) и нижнего-верхнего карбона (C_{1-3}), формируя регионально выдержанные пласты глинистых грунтов преимущественно морского генезиса. Следует отметить, что глинистые отложения верхнего венда с увеличением глубины залегания, погружаясь под мощный осадочный чехол, претерпевают закономерные изменения за счет действия регионального метаморфизма, что прослеживается уже в геолого-литологическом строении на стыке Ленинградской и Новгородской областей, где на глубине свыше 500 м от поверхности земли распространены аргиллитоподобные глины, переходящие в аргиллиты [68]. Разрез осадочного чехла венчает комплекс четвертичных (Q) отложений, представленный широким спектром глинистых грунтов ледникового, межледникового, поздне- и послеледникового и другого генезиса. Следует отметить, что особенностью строения осадочного чехла данной территории выступает моноклинальное залегание отложений, что определяет закономерность выклинивания и выход на поверхность (чаще под отложениями четвертичной системы) более молодых горных пород в юго-восточном направлении.

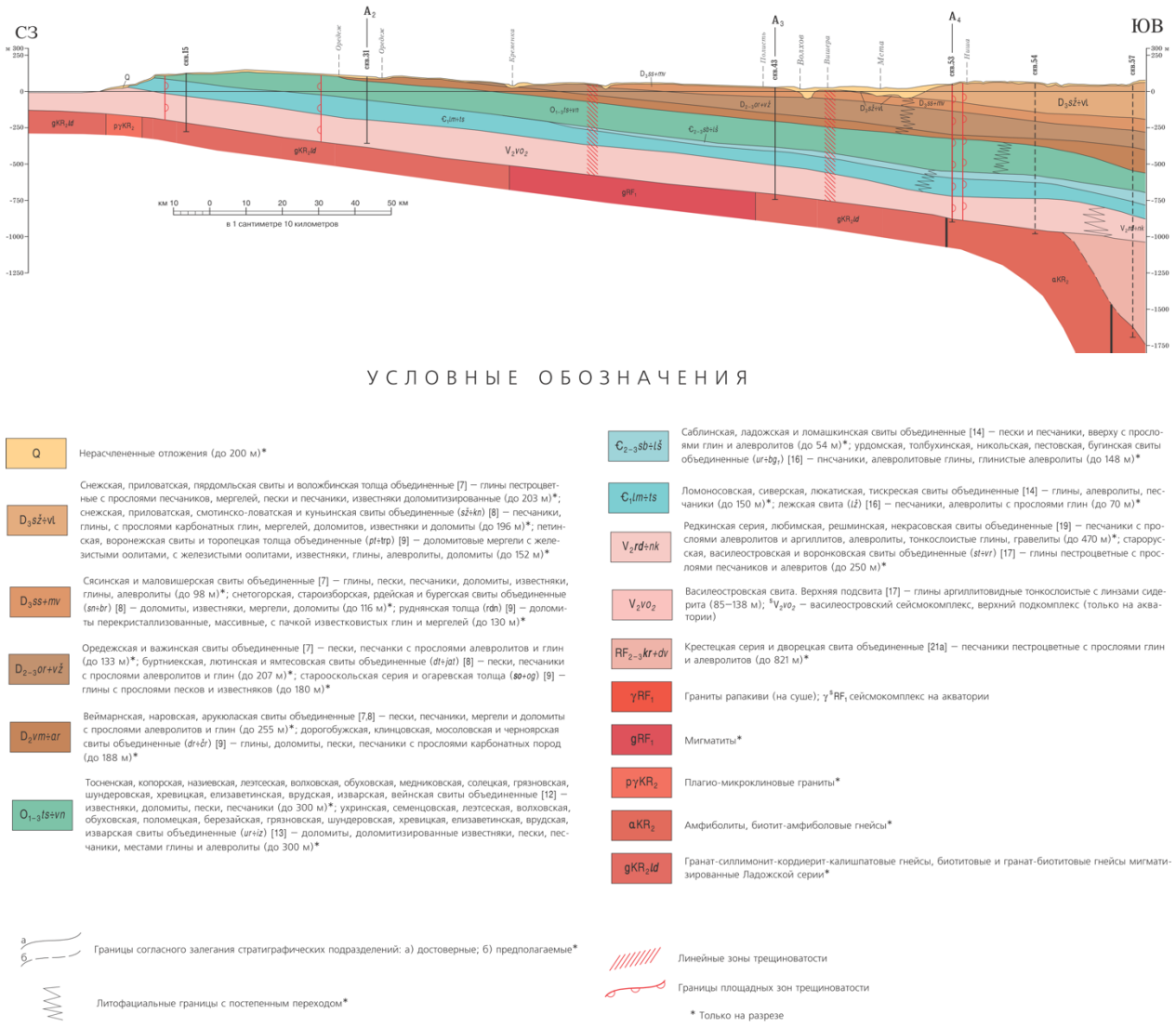


Рисунок 1.1 – Схематический геологический разрез Северо-Запада России[1]

По мере приближения территорий к более активным геодинамическим обстановкам за счет возрастающей тектонической активности отсутствует возможность сохранения глинистых пород на названных выше глубинах. Анализ состояния юрских отложений в пределах геологического разреза Предуральского прогиба показывает, что на отметках ~300 м от поверхности земли прослеживаются разности плотных аргиллитоподобных глин, местами переходящих в аргиллиты [1]. Такие отложения выступают как продуктивная толща переслаивания на Кашпирском месторождении (Самарская область) горючих сланцев.

Для регионов с геодинамически-активной обстановкой характерно практически полное отсутствие глинистых грунтов старше неоген-четвертичного возраста, что определяется активной тектонической деятельностью. Так, в геологическом строении Уральского региона юрские отложения приурочены к крупным депрессионным структурам. Для этих отложений

[1] Геологическая карта дочетвертичных образований. 1:1 000 000. Листы 0-35 (Псков), О-36 (Санкт-Петербург)

характерна угленосность, причем бурые угли встречаются уже на глубинах менее 200-300 м [3]. Известно, что формирование бурого угля наблюдается в условиях повышенных температур и давлений. Такие факторы исключают возможность сохранения глин на сопоставимых глубинах.

Известно, что основное формирование и преобразование состава глинистых минералов протекает на стадии диагенеза. Характер таких процессов во многом определяется составом глинистого материала, поступающего в водный бассейн. В связи с этим встает вопрос: какие горные породы служат первичным источником глинистых отложений?

1.2.1 Первичные глинистые грунты

Одним из типов «первичных» глинистых отложений служат химические коры выветривания – элювиальные грунты, образующиеся в результате длительного преобразования магматических, метаморфических, реже осадочных горных пород под действием ряда факторов при определенных значениях показателей кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий. Формирование мощных кор химического выветривания горных пород при высокой скорости химических преобразований минералов наблюдается в первую очередь при следующих условиях:

1. Тропический и субтропический климат с высокими температурами и интенсивным уровнем выпадения осадков, что определяет бурное развитие растительности и, соответственно, поступление большого количества органического вещества.

2. Состав подземных вод в таких климатических условиях характеризуется как активный, обогащенный органикой, содержание которой возрастает с глубиной, часто с pH, близким к кислому и окислительно-восстановительным потенциалом $Eh < 0$ мВ. Существенную роль начинают играть микробиологические процессы в сочетании с интенсивным протеканием физических, химических и физико-химических процессов.

3. Высокая проницаемость исходных пород на значительные глубины, которая формируется за счет активной тектонической деятельности, приводящей к высокой степени дезинтеграции пород и их водопроницаемости. Большое значение при этом имеют раскрытие и промытие трещин.

Следует отметить, что преобразованию в первую очередь подвержены силикаты, в том числе хлориты, полевые шпаты, слюды, пироксены, амфиболы с образованием слоистых алюмосиликатов – глинистых минералов.

Для любых разрезов элювиальных отложений характерна в различной степени выраженная зональность, отражающаяся в определенной последовательной смене «материнских» пород вверх по разрезу, в сторону становления их все более измененными. Согласно классификации литологических типов профилей выветривания выделяются следующие виды кор химического выветривания [116, 149]:

1) латеритные профили, формирующиеся в окислительной зоне (Eh > 0 мВ) при pH < 6,5, для которых характерно образование глинистых минералов группы каолинита с обогащением разреза свободными окислами, гидроокислами железа (III), которые образуют такие минералы как лимонит, гетит и др.; реже формируются оксиды и гидроксиды алюминия и титана;

2) латеритно-сапролитовые профили – переходный тип коры химического выветривания;

3) сапролитовый профиль, развивающийся в условиях восстановительной – без доступа кислорода (Eh < 0 мВ) щелочной и нейтральной среды с образованием минералов группы монтмориллонита (смектита) и гидрослюд при обогащении разреза восстановленными формами железа (II), при этом более редко встречающимися минеральными ассоциациями: сидерит, пирит, марказит.

Ниже представлены примеры развития кор химического выветривания, сформированных в различные геологические эпохи и в различных регионах мира.

Известно, что геологический разрез Уральского региона характеризуется гипергенными, часто никеленосными, древними корами химического выветривания, сформированными на ультраосновных породах. Мощная элювиальная толща мезо-кайнозойского возраста в основном залегает на серпентинитах [14, 53]. Элювиальные отложения Урала относятся в основном к латеритно-сапролитовому и латеритному типу профилей. Согласно обобщенному расчленению Уральских химических кор выветривания на зоны, выделяют следующие подразделения, начиная с кровли элювия [100]: а) зона оксидов и гидроксидов железа; б) зона формирования нонтронитовых глин; в) зона выщелоченных «серпентинитов», которые на самом деле уже представляют собой глинистые грунты; г) зона трещиноватых серпентинитов. Стоит отметить, что высокая степень трещиноватости материнских горных пород сохраняется и в развитых корах выветривания.

Примером образования современных кор химического выветривания, относящихся к латеритному и латеритно-сапролитовому типам профилей, служат районы Кубы [36]. Формирование кор химического выветривания происходит по серпентизированным породам основного и ультраосновного состава в основном по габбро, перидотитам и дунитам. К современным корам выветривания также относятся неогеновые коры выветривания сапролитного профиля Черноморского побережья Кавказа, развитые по палеогеновой флишевой толще, при длительном действии континентального этапа развития.

К допалеозойским корам химического выветривания (PR_2) (без образования глинистых минералов) приурочено формирование богатых железных руд Яковлевского месторождения. Материнскими породами, подверженными в рассматриваемом случае процессам химического выветривания, служили в основном магнетит железнослюдковые кварциты (AR-PR) [10].

Необходимо еще раз подчеркнуть, что коры химического выветривания образуются при обязательном участии богатого микробиоценоза, определяющего повышенную скорость протекания биохимических и химических процессов деструкции материнских пород. Верхняя часть разреза обогащена аэробными и факультативными группами микроорганизмов, сапролитная часть – анаэробными.

Роль в основном гетеротрофных микроорганизмов, в выветривании горных пород начала изучаться еще в XX веке, что было освещено в работах В.Л. Омелянского, Ю.А. Равич-Щебро, Н.А. Красильникова и др. К работам, рассматривающим распространение автотрофных микроорганизмов, относятся исследования В.О. Таусона, Н.А. Красильникова, Б.В. Громова и др. Экспериментальные исследования Ю.Ю. Бугельского подтвердили резкое возрастание интенсивности разрушения ультрабазитовых горных пород и продуктов их выветривания под воздействием бактериальных культур тионовых и нитрифицирующих бактерий, т.е. присутствие активной микробиоты выступает как катализатор образования кор выветривания. Подчеркивается также, что данные микроорганизмы способствуют формированию никеленосных минеральных соединений. Современные исследования подтверждают, что деятельность микроорганизмов ускоряет процессы химического выветривания.

Согласно генетическим классификациям глинистых грунтов, выделяют несколько типов и подтипов глинистых отложений, дифференцируемых по условиям их формирования в субаэральных и субаквальных обстановках [68, 99]. Стоит отметить, что рассмотренные выше коры химического выветривания образуются в субаэральной обстановке на континентальном этапе развития территории, но при обязательном действии подземных вод, состав которых определяется в первую очередь климатическим фактором и деятельностью микроорганизмов.

1.2.2 Глинистые отложения субаквальных обстановок

Глинистые осадки субаквального происхождения связаны с размывом, переносом, седиментацией и формированием на первом этапе донных отложений океанических, морских, лагунных обстановках, пресноводных и соленых озерах при различных климатических условиях [105]. К такому типу осадков также необходимо отнести отложения рек [68]. Следует отметить, что среди различных типов седиментогенеза наиболее изученным является субаквальный – морской и океанический, определяющий формирование осадочных горных пород значительной мощности при широком выдержанном площадном распространении благодаря относительно стабильным условиям осадконакопления в морской среде. Соответственно, грунты такого образования наиболее распространены среди всех генетических типов глинистых отложений осадочного чехла по всему миру. Формирование глинистых грунтов в морских условиях происходит чаще всего за счет накопления глинистого материала, первичным источником которого служат глинистые коры выветривания как современные, так и

древние. Стоит отметить, что процесс диагенеза субаквальных обстановок протекает при обязательном участии микроорганизмов: привнесенных форм: в том числе с материалом кор химического выветривания, и аборигенных, характерных той или иной водной среде.

Специфика седиментационных процессов в различных гидрохимических условиях – соленых (океанических, морских, лагунных) и пресноводных (преимущественно озерных) обстановках, определяет такие особенности как гранулометрический и микроагрегатный состав отложений, преобразование глинистых минералов (при различных кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условиях) и их ассоциаций, накопление органических компонентов абиогенного и биогенного генезиса и др. Морские и океанические глинистые отложения характеризуются региональным распространением, тогда как озерные и лагунные – локальным с высокой степенью изменчивости их по площади, что объясняется различиями в масштабах седиментационных бассейнов и динамике осадконакопления [89, 97].

Особенности осадконакопления в морских условиях определяются минерализацией водной среды и ее химическим составом. Морская вода характеризуется достаточно постоянным компонентным составом, где основные анионы и катионы расположены в следующем порядке убывания доли содержания [106]:

$$\text{хлориды } (Cl^-) > \text{сульфаты } (SO_4^{2-})$$

$$\text{натрий } (Na^+) > \text{магний } (Mg^{2+}) > \text{кальций } (Ca^{2+}) > \text{калий } (K^+)$$

Средняя минерализация Мирового океана составляет 35 г/дм^3. Среди перечисленных выше катионов наименьшими размерами обладают Ca^{2+} и Mg^{2+}, что определяет их наиболее активное участие при химическом выпадении взвешенного в воде вещества при седиментогенезе осадка.

Названные катионы (Ca^{2+} и Mg^{2+}), благодаря своим малым размерам, обладают высокой агрегирующей способностью, что описывается правилом Шульце-Харди: коагулирующая способность электролита возрастает с увеличением заряда иона-коагулятора. Минерализация водной среды определяет коагуляцию частиц, при этом данный процесс сопровождается уменьшением поверхностной энергии системы с потерей седиментационной устойчивости. Повышение минерализации водной среды приводит к усилению агрегирующего эффекта. В теплых морских бассейнах снижение вязкости воды способствует более быстрому осаждению дисперсных частиц с образованием более крупных агрегатов. При высокой вязкости системы слои воды замедляют процесс седиментогенеза.

Осаждение дисперсного материала на дно водоема сопровождается захватом молекул воды внутрь пространства агрегированного осадка. Благодаря описанному процессу наблюдается формирование высокопористых однородных отложений с высокой природной влажностью без видимой слоистости [19, 168]. Толща таких илов, как правило, характеризуется отсутствием

ориентации тонкодисперсных частиц, которое локально может сменяться неясно слоистой и тонкослоистой текстурой. Тонкодисперсный материал распределяется по поверхности более крупных частиц, а также на контактах пылеватых, образуя «мостики», которые соединяют частицы между собой, формируя ажурное пористое строение, причем следует отметить поэтапное формирование агрегатов, начиная с коллоидных частиц (обладают наиболее высокой поверхностной энергией) вплоть до более крупных фракций [80, 80]. Межагрегатные и межчастичные поры таких отложений – преимущественно открытые, имеют изометричную форму и характеризуются размерами в диапазоне от долей микрометра до первых 5 мкм. Более подрбно описание морфологии порового пространства представлено в разделе 1.5.

Условия формирования тонкодисперсных отложений и нахождение в среде осадконакопления и в поровом растворе тех или иных ионов определяют состав поглощенного ионного комплекса глинистых грунтов. Формирование такого комплекса осуществляется силами электростатического притяжения с образованием двойного электрического слоя (ДЭС), внутренняя часть которого состоит из заряженной поверхности минерала, а внешняя – из ионов в диффузном слое [80]. Соответственно, для глинистых отложений морского генезиса характерны следующие поглощенные катионы – Na^{+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}.

Наряду с морскими отложениями, большую роль при оценке глинистых грунтов как основания сооружений большое значение играют е толщи меньшего масштаба распространения. К ним относятся такие отложения, как речные (аллювиальные), озерные (включая озерно-ледниковые), делювиальные и лагунные грунты, состав и физико-механические свойства которых изменчивы по площади и по глубине разреза.

Существует два ключевых типа аллювиальных отложений: пойменные и русловые. Действие потока реки в периоды межени определяет формирование руслового аллювия. Он сложен преимущественно песчано-галечным материалом с неоднородным гранулометрическим составом [68]. В пределах платформенных областей часто образуются застойные участки речных систем с водолюбивой растительностью, что приводит к повышению количества органического вещества, накапливающегося в пойменных разностях аллювия. Формирование пойменного аллювия при периодическом затоплении во время паводков в таком случае характеризуется повышенным содержанием тонкодисперсной фракции.

Озерные глинистые отложения также обладают разнообразием состава и свойств, которые определяются комплексом природных факторов. На формирование этих отложений оказывают непосредственное влияние климатические условия региона, размеры и глубина озера, особенности рельефа и гидрологический режим [68].

В условиях гумидного климата озерные бассейны чаще пресноводны и характеризуются накоплением глинистых отложений, обогащенных органическим материалом. Благоприятными

местами для образования сапропелей выступают водоемы с застойным режимом. Зарастание таких водоемов приводит к формированию торфяников (содержат по массе ≥ 50% органического вещества) и/или сапропелей, которые относятся к биогенным грунтам. Абиотическая часть представлена гуматами и фульватами. Минеральная часть сапропеля состоит преимущественно из тонкодисперсных и пылеватых частиц. Биотическая составляющая включает в себя разнообразные формы микро- и макроорганизмов, которые участвуют в процессе разложения органики, в том числе микроводоросли, включая диатомовые, бактерии различных физиологических групп, актиномицеты, микромицеты, остатки планктона и бентоса.

Часть таких организмов выступает как источник поступления различных веществ в осадки, в особенности кремнезема, среди которых выделяют диатомовые водоросли, кремниевые губки, а также радиоляриевый планктон. Необходимо подчеркнуть, что распространение диатомовых водорослей типично и широко повсеместно – в водах с различной соленостью и температурой они выступают наиболее разнообразной группой микроводорослей [98]. Хемогенное выпадение кремнезема, по мнению ряда исследователей, в отличие от биогенного, играет подчиненную роль в большинстве бассейнов или отсутствует вовсе в силу недостаточного насыщения гидросферы SiO_2 [97]. Диатомовые водоросли прослеживаются и в песчано-глинистых грунтах четвертичного возраста Санкт-Петербурга. Так, например, они выявлены в литориновых отложениях, залегающих на низких отметках, а также в микулинских отложениях. Поскольку их присутствие носит повсеместный характер, следовательно, и другие отложения различного генезиса могут быть обогащены этими формами микроорганизмов.

Панцири диатомовых водорослей состоят из аморфного кремнезема, который имеет высокую степень гидрофильности. На определенной стадии жизни диатомовые выделяют накопленный кремнезем и сбрасывают свои створки, что вызывает цементацию частиц донных отложений. Цементация дисперсных осадков кремнеземом наблюдается, в первую очередь через контакты глинистых частиц, образуя «мостики» и создавая достаточно ажурное пористое сложение с жесткими контактами.

Ярким примером формирования таких контактов в глинистых грунтах еще на стадии ила являются широко распространенные иольдиевые глины, встречающиеся в Скандинавии, Северной Америке и северных районах Карелии [64]. Такие молодые послеледниковые отложения, сформировавшиеся в специфических условиях морских бассейнов с различной соленостью, вызывают ряд трудностей при строительстве и эксплуатации различных сооружений, в особенности, подверженных динамическим нагрузкам.

Характерной особенностью процесса их накопления являлись резко восстановительные условия, что подтверждается присутствием минералов с закисными формами железа и специфической окраской отложений. Возникновение таких жестких связей на начальных стадиях

диагенеза привело к изменению характера протекания процессов преобразования грунтов в ходе геологического времени, в результате чего данные отложения сохранили высокую влажность, близкую к пределу текучести ($W_e \approx 90$ % и более). При разрушении цементационных связей, играющих роль своеобразного «каркаса», иольдиевые глины переходят в состояние тяжелой жидкости. Высокие значения показателя чувствительности S_r иольдиевых глин наглядно иллюстрируют данное положение. Этот параметр часто превышает 30 и в отдельных случаях достигает значений в несколько сотен единиц [102, 123, 168].

Следует отметить, что размер опаловых панцирей диатомовых как правило находится в пределах первых единиц мкм, что определяет увеличение содержания тонкодисперсной фракции в дисперсных отложениях (рисунок 1.2).

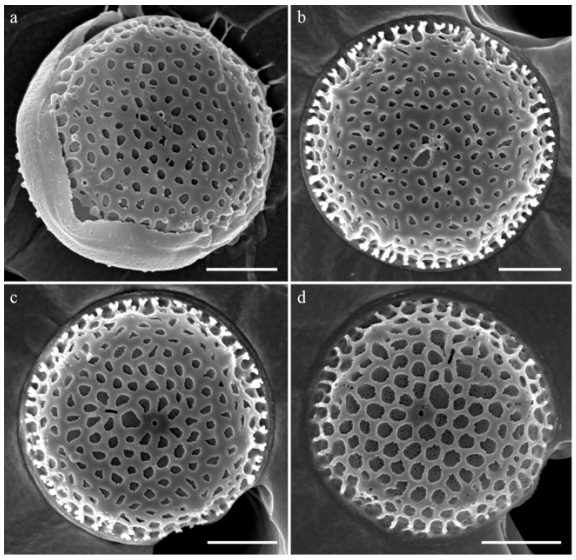


Рисунок 1.2 – Микроскопическое изображение диатомеи *Thalassiosira proschkinae* (масштабная линейка – 1 мкм) [163]

Озеро Имандра (Кольский полуостров), имеющее тектоническое (рифтовое) происхождение, относится к числу водоемов с формированием сапропелевых отложений. Сапропелевые илы, слагающие разрез донных осадков водоема, обладают влажностью порядка 100%. Такой показатель определяется сразу несколькими причинами: высокой дисперсностью минеральной компоненты, присутствием высокогидрофильных кремнистых панцирей диатомовых водорослей, а также цементацией дисперсных частиц выделяемым микроводорослями свободным кремнеземом. Подобные диатомовые тонкодисперсные отложения залегают в основании пионерных дамб хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит». Под руководством Р.Э. Дашко проводился комплекс исследований, направленных на анализ, оценку и обеспечение длительной устойчивости такого гидротехнического промышленного сооружения. В ходе проведения работ было установлено, что пионерная дамба хвостохранилища деформируется за счет протекания процесса отдавливания сапропелей с формированием

значительного вала, зафиксированного методами подводной съемки. Деформирование пионерной дамбы наблюдалось с первых лет эксплуатации сооружения.

Озеро Савельево (Ярославская область), имеющее ледниковый, послеледниковый генезис, представляет собой объект промышленной добычи сапропелевых осадков, характеризующихся высокой влажностью. Высокая гидрофильность этих отложений определяется значительным содержанием диатомовых водорослей, что подтверждено анализом, выявившим присутствие около 23 видов пресноводных диатомовых [40]. Проведенные генно-молекулярные исследования (метагеномный анализ 16S рРНК) показали активную роль деятельности микроорганизмов в формировании отложений подобного типа [40]. Микробиологический состав сапропелей характеризуется преобладанием анаэробных бактериальных форм, среди которых особо выделяют аммонифицирующие, сульфат- и железовосстанавливающие группы. Такое микробное сообщество отражает восстановительные условия среды, в которых протекали процессы формирования сапропелевых отложений и преобразования органического вещества.

К грунтам, формирующимся в субаквальных обстановках, могут быть отнесены и ледниковые отложения, поскольку значительная часть процессов их образования и трансформации происходила в водной среде. Моренные отложения имеют наибольшее распространение среди четвертичных отложений на территории северной и центральной частей Европейской части России до территории Днепровско-Донецкой впадины. В различные эпохи оледенений ледниковые покровы оказывали воздействие на мощные толщи различных осадочных отложений, а также на породы Балтийского и Украинского щитов, вызывая процесс их трансформации [58, 90]. Такое воздействие определило зональный состав моренных отложений: для северной Европейской части России наиболее характерны песчаные-супесчаные моренные разности, тогда как в центральных развиты преимущественно суглинистые, при этом наиболее тонкодисперсны – морены Республики Беларусь [58].

Согласно теории глыбового скольжения, изменение условий движения ледника формирует дополнительные напряжения, приводящие к глыбовому скольжению по ложу. Усиление скалывающих напряжений на контакте с ложем способствует образованию разрывов (трещиноватости) в теле льда, по которым вертикально поступает эродированный материал (от валунов в нижней части ледника до тонкодисперсных частиц – в верхней) и происходит его глубокое изменение в процессе транспортировки [58]. Согласно гляциологическим исследованиям на горных ледниках, отложение морен происходило в процессе таяния ледника, который сопровождался образованием грязевого озера с высокой концентрацией частиц различного гранулометрического состава в условиях, при которых низкая минерализация талых вод не способствовала агрегированию глинистых частиц [58]. После вытаивания из льда моренный материал подвергался самоуплотнению, определяемым, в первую очередь, его

неоднородным гранулометрическим составом: наибольшая плотность достигалась при составе, близком к составу оптимальных смесей. Длительное сохранение льдов в толще морены приводило к образованию более слабых прослоев с высокой влажностью.

Бассейны с пресной водой способствуют образованию пространственно ориентированного микростроения осадков, что связано с отсутствием или низким содержанием растворенных ионов, играющих роль агрегирующих соединений, что приводит к образованию устойчивой суспензии [35, 81]. Различная скорость осаждения песчаных, пылеватых и глинистых частиц обеспечивает дифференциацию осадочного материала по гранулометрическому составу, что приводит к образованию слоистых текстур. Коллоидный раствор при этом формируется непосредственно над слоем осевшего материала. Для глинистых отложений, формирующихся в условиях пресноводных бассейнов, характерен ионный комплекс, в составе которого преобладают катионы Ca^{2+}, Na^{+}, Mg^{2+}.

Своеобразный тип правильной горизонтальной тонкой слоистости наиболее ярко выражен в озерно-ледниковых отложениях (varved clays, banded clays) – в сезонных (varve) осадках. Данный тип грунтов, обладающий ленточной текстурой, имеет широкое распространение в северных районах полушария (в областях материковых оледенений), в том числе и среди четвертичных грунтов Ленинградской области [54]. Чередование песчано-пылеватых (более мощных светлых) и темных глинистых прослоев определяет их специфику и отражает общие закономерности процессов осадконакопления. Механизм образования ленточных отложений тесно связан с гидрологическим режимом пресных приледниковых озер. Выносимая талыми водами ледниковая взвесь, поступая в водоем, проходит этап седиментационного разделения. В условиях низкой минерализации вод формируются слоистые структуры с разделением частиц по размеру: в весенне-летний период осаждается быстрее более грубый материал (песок, пыль), тогда как тонкодисперсные глинистые частицы и коллоидная фракция остаются во взвешенном состоянии. Седиментация тонкой взвеси наблюдается в зимний сезон в спокойной обстановке под мощным ледяным покровом.

Высокая степень ориентированности глинистого материала вследствие пресноводного осадконакопления определяется взаимодействием отдельных глинистых частиц и их агрегатов, в основном за счет торцевых (сколовых) частей и базисных поверхностей. Их поровое пространство достаточно однородно и формируется за счет пор щелевидной и клиновидной форм, вытянутых по напластованию. В поперечнике такая пора не превышает 2 мкм, а в длину – до 20 мкм [80, 81]. Поры открыты по напластованию и закрыты в направлении, перпендикулярном слоистости.

Необходимо подчеркнуть, что для пресноводных осадков процессы цементации и, соответственно, образования жесткости практически не характерны по сравнению с бассейнами

с повышенным содержанием солей. Концентрация поровых растворов в таких отложениях остается низкой на всех стадиях седиментогенеза, что при такой гидрохимической обстановке ограничивает возможности цементации частиц за счет солей в поровых растворах. Даже при некотором повышении минерализации вод выпадение растворимых компонентов (в частности, карбонатов) в виде цементирующих веществ практически полностью исключено. Теоретически возможным выступает выпадение соединений железа (Fe^{3+}), но их недостаточно для создания достаточного количества цементирующего вещества.

Для анализа и оценки свойств водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов, включая их водо- и газопроницаемость, необходимо изучение особенностей их порового пространства, которые определяются особенностями процессов седиментации, диагенеза осадка и катагенеза грунтов.

1.2.3 Глинистые отложения субаэральных обстановок

Согласно работам В.Д. Ломтадзе строго субаэральными грунтами выступают только эоловые песчаные, частично глинистые лёссовые породы. Лёссы и лёссовидные грунты широко распространены на территории юга и востока России, западной Монголии, Китая и др. [67, 110]. В настоящее время существует не одна модель формирования лёссового покрова. Эоловая теория формирования лёссов, связанная с аккумулятивной деятельностью ветра, наиболее признанная геологами по всему миру, описана и развивалась Ф. Рихтгофеном, В.А. Обручевым, П.А. Тутковским и др. Существуют пролювиальная, элювиально-делювиальная, аллювиальная и др. модели образования лёссовых отложений. Автором почвенной теории выступает Л.С. Берг [5]. Лёссовые грунты обладают рядом специфических характерных признаков, а именно: 1) макропористость и столбчатая отдельность и, как следствие, высокая пористость и рыхлое строение, при этом макропоры в виде трубочек и канальцев видны невооруженным взглядом; 2) варьирование цвета от желтовато-серого до бурого; 3) преобладание в гранулометрическом составе пылеватых частиц; 4) склонность к высокому содержанию солей, часто карбонатных и сульфатных; 5) водонеустойчивость, выражающаяся в подверженности к размыванию, размоканию и просадкам при увлажнении [68].

Лессы и лессовидные грунты формируются в аридном климате в условиях мощной зоны аэрации, следовательно, к ним не могут быть применены анализ и оценка тонкодисперсных грунтов как водо- и водогазонасыщенных сред.

1.2.4 Вулканогено-осадочные и гидротермальные типы глинистых отложений

Кроме наиболее распространенных субаэральных и субаквальных глинистых грунтов могут быть выделены «особые» группы генезиса локально развитых глин – вулканогенно-осадочные и гидротермальные. Образование такого типа глинистых грунтов происходит в

активных геодинамических обстановках (континентальных окраинах и краевых частях платформ в эпоху активного вулканизма).

Вулканогенно-осадочные глинистые грунты формируются в процессе подводного преобразования вулканических пеплов и другого пирокластического материала в условиях прибрежных частей морей, в заливах, лагунах, озерах и т.п. [99]. Наиболее благоприятными обстановками осадконакопления глин такого генезиса выступают удаленные от вулканов участки, где воздушный поток обеспечивает перенос наиболее мелких и легких частиц пеплового материала, который осаждается в морских бассейнах, озерах и др. Стоит отметить, что в случае соответствия кислотно-щелочных условий (pH) морским водам (7,5-8,5) наблюдается формирование грунтов с преобладанием смектитового состава, в то время как слабокислая обстановка определяет образование каолинитовых разностей. Вулканогенно-осадочный генезис глинистых отложений подтверждается исследованиями шлифов, в которых диагностируются все стадии преобразования аморфного кремнезема, неустойчивого к щелочным условиям, начиная от редких чешуек до полностью монтмориллонитизированного грунта, в шлифах также прослеживаются реликты вулканического стекла, по которым развивается смектит, и кристобалит – продукт разложения вулканического стекла, образованный в условиях избытка кремнезема [4]. Вулканогенно-осадочные бентонитовые залежи, распространённые в Средиземноморском регионе (Греция, Турция) и на территории России (Респ. Хакасия, о. Сахалин), формировались при преобразовании различных по составу пепловых материалов. Так, например, российские залежи сформировались путем переноса, осаждения и последующего преобразования вулканических пеплов риолитового, дацитового составов [4].

Гидротермальные глинистые отложения формируются в результате преобразования горных пород при их взаимодействии с высокотемпературным парогазовым флюидом и термальными водами в условиях наличия глубоких разломов [99, 91, 148]. Формирование монтмориллонита наиболее благоприятно в гидротермальных системах с умеренными температурами при pH = 8-10. Так, примером служат гидротермальные глины, образованные в районе Паужетского термального поля. Закономерность формирования ассоциаций глинистых минералов группы каолинита и смектита в зависимости от кислотно-щелочных условий остается такой же, как и для вулканогенно-осадочных грунтов. Состав обменных катионов и поровых вод гидротермальных глин определяется составом и условиями циркуляции термальных вод, поступающих в зону разгрузки парогидротерм.

Другим примером образования гидротермальных глинистых грунтов служит трубка Архангельская (им. М.В. Ломоносова), которая характеризуется активным процессом сапонитизации – образованием минералов группы смектита в толще кимберлитовых пород. Наиболее вероятный механизм формирования тонкодисперсной фракции имеет гидротермальное

происхождение: первоначально гидротермальные процессы определили серпентизацию кимберлитов, а последующее воздействие гипергенных условий привело к образованию глинистых минералов, включая магнезиальный сапонит [113].

1.3 Глинистые минералы и особенности их кристаллохимического строения

При анализе водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов как оснований и среды сооружений различного назначения ключевое значение приобретает оценка активных центров их твердой фазы, в первую очередь глинистых минералов. Значительный вклад в развитие структурной минералогии глинистых материалов внесли работы ряда исследователей, таких как Р. Грима, Л. Паулинга, Б.Б. Звягина, Ж. Милло, О.М. Мдивнишвили и др.

Пороговым значением, определяющим грунты как глинистые, выступает содержание уже 3% глинистой фракции, представленной различными группами глинистых минералов[2]. Глинистые минералы представляют собой слоистые алюмосиликаты, классифицируемые на несколько основных групп: каолинита, гидрослюды, монтмориллонита (смектита), вермикулита, хлорита и смешаннослойных образований [27, 76, 80]. Каждая из этих групп отличается особенностями кристаллохимического строения и физико-химическими параметрами.

Известно, что глинистые минералы имеют наименьший размер из всего ряда дисперсных частиц и обладают диаметром от 1-2 мкм и менее для наиболее активных глинистых минералов группы монтмориллонита и до 5 мкм (алюмосиликаты с жесткой кристаллической решеткой группы каолинита). Даже небольшое количество глинистых частиц определяет формирование основных свойств таких грунтов – пластичность, гидрофильность, возможность набухания, наличие сорбционных свойств и др. Морфология частиц представлена разнообразием форм от пластинчатых и чешуйчатых до игольчатых и нанотрубчатых, характерных для галлуазита (группа каолинита), который в своем составе имеет кристаллизационную воду.

Кристаллическая структура слоистых алюмосиликатов формируется из двух основных полиэдров: кремнекислородных тетраэдров и октаэдрических комплексов оксидов или гидроксидов и алюминия, железа или магния. Такие структурные элементы соединяются через общие вершины кислородных или гидроксильных групп, формируя при этом протяженные трехмерные сетки гексагонального типа (ячейка или кольцо) (рисунок 1.3).

[2] Согласно трехчленной классификации глинистых грунтов В.В. Охотина

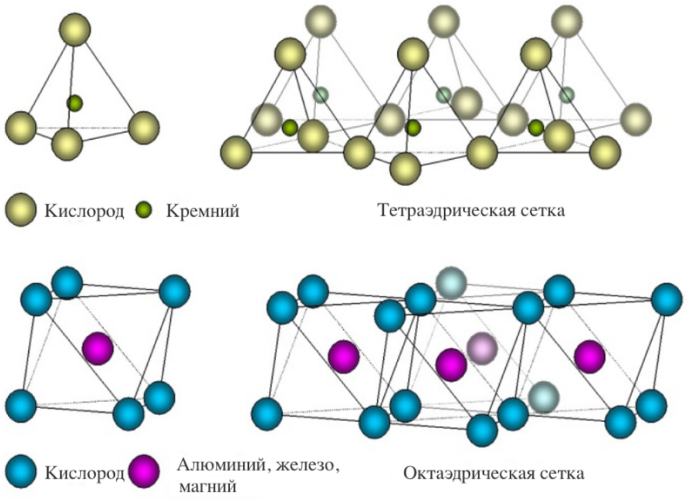


Рисунок 1.3 – Особенности структурного строения глинистых минералов [27]

Центральное положение между четырьмя атомами кислорода O^{2-} в тетраэдрах занимают ионы кремния Si^{4+}. Базальную плоскость формируют три из них, тогда как в качестве вершины тетраэдра ориентирован четвертый (апикальный). Катионы различной валентности (Al^{3+}, $Fe^{2+/3+}$, Mg^{2+}), окруженные шестью кислородными или гидроксильными OH^- ионами, занимают центральную часть октаэдрических структур [27, 80].

Степень заполнения возможных октаэдрических позиций определяет различие глинистых минералов. Выделяют существование диоктаэдрических структур (гиббситовый слой) с трехвалентными ионами (Al^{3+}, Fe^{3+}) с частичным (примерно на 2/3) заполнением позиций и триоктаэдрических разновидностей (брукситовый слой) с полным заполнением тех же позиций двухвалентными ионами (Fe^{2+}, Mg^{2+}).

Кристаллическая структура глинистых минералов подвергается изоморфным замещениям, которые могут быть как изовалентными (стехиометрическими), так и гетеровалентными (нестехиометрическими) [80]. При гетеровалентном замещении обычно фиксируется замена исходных катионов на ионы, обладающие более низкой валентностью.

Нарушение электронейтральности кристаллической решетки выступает как результат нестехиометрического типа изоморфизма, что приводит к возникновению избыточного отрицательного заряда в разных зонах структурного слоя. При замещении Si^{4+} накопление заряда происходит в области тетраэдрических сеток, а замена катионов Al^{3+}, $Fe^{2+/3+}$, Mg^{2+} - в октаэдрических. Следовательно, компенсация образовавшегося заряда осуществляется за счет накопления катионов-компенсаторов заряда как на внешних поверхностях кристаллов, так и внутри межслоевого пространства.

Структурная организация глинистых минералов формируется в результате взаимодействия тетраэдрических и октаэдрических сеток, что позволяет выделить несколько основных типов кристаллических решеток – структуры типа 1:1, где один тетраэдрический слой

сочетается с одним октаэдрическим. В минералах типа 2:1 наблюдается организация, при которой октаэдрический слой оказывается заключенным между двумя тетраэдрическими. Группа хлорита образует структурный слой 2:1:1. Выделяют также смешанослойные образования, в которых совмещается чередование различных типов слоев.

Вполне понятно, что мономинеральных глин в природных условиях не существует. Ниже приведено описание основных групп отдельных минералов для установления связи между кристаллическим строением конкретного минерала и его вкладом в свойства грунта.

Группа *каолинита* без изоморфных замещений представлена минералами с таким пакетом, который состоит из одного слоя алюмокислородных-гидроксильных октаэдров и одного слоя кремнекислородных тетраэдров (1:1) [27, 76, 80].

Через достаточно прочное межслоевое взаимодействие структурные пакеты глинистых минералов объединяются в жесткую кристаллическую решетку. При этом атомы кислорода тетраэдрических слоев и гидроксильные группы октаэдров формируют систему молекулярных и водородных связей, энергия которых больше энергии гидратации межслоевого пространства. Подобное неравенство выступает как препятствие для проникновения молекул воды и катионов внутрь межпакетного пространства. В результате внутрикристаллическое набухание глинистых частиц полностью отсутствует (рисунок 1.4).

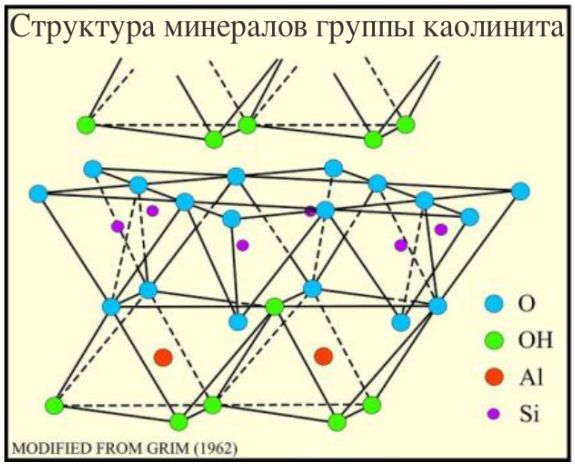


Рисунок 1.4 – Особенности структур глинистых минералов группы каолинита [27]

Глинистые минералы группы *гидрослюды* занимают промежуточное положение по их активности между каолинитом и монтмориллонитом, обладая при этом повышенной устойчивостью в широком диапазоне природных условий. Такие минералы характеризуются структурой типа 2:1; в ней изоморфное замещение Si^{4+} на Al^{3+} в тетраэдрических позициях (достигающее 25% в хорошо раскристаллизованных формах) вызывет образование отрицательного заряда [27, 76, 80]. Его компенсация осуществляется преимущественно ионами калия (K^{+}). В железистых разновидностях возможно также частичное замещение K^{+} на ионы Ca^{2+},

Mg^{2+} и $Fe^{2+/3+}$. Молекулы воды способны проникать в межслоевое пространство наравне с ионами, однако для таких минералов внутрикристаллическое набухание незначительно.

Глинистые минералы группы *монтмориллонита (смектита)* обладают структурой типа 2:1, сформированной октаэдрическим слоем, расположенным между двумя тетраэдрическими [27, 76, 80]. Характер и особенности изоморфных замещений определяют различие между минералами: за счет замещения Si^{4+} на Al^{3+} бейделит формирует заряд в зоне тетраэдрических сеток, в то время как нонтронит и сапонит приобретают заряд в октаэдрическом слое путем замещения Al^{3+} на Fe^{2+} и Mg^{2+} соответственно.

При этом межпакетные связи в смектитах отличаются слабой энергией. Следовательно, подвижное межслоевое пространство свободно вмещает молекулы воды, различные катионы-компенсаторы (Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}) и некоторые органические соединения (рисунок 1.5), что способствует развитию активного внутрикристаллического набухания.

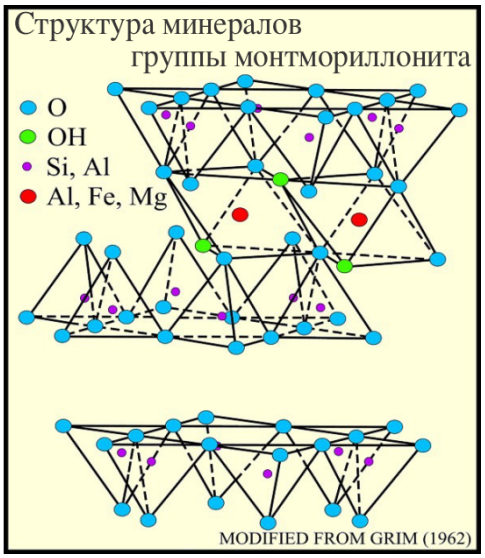


Рисунок 1.5 – Структурные особенности глинистых минералов группы монтмориллонита (смектита) [27]

Локализация заряда в октаэдрических сетках определяет отсутствие у смектита предела подвижности кристаллической решетки, что отличает его от схожих глинистых минералов группы *вермикулита* [27, 76, 80].

Рассмотренные особенности кристаллохимического строения глинистых минералов отражают их идеализированную структуру, однако в реальных условиях все кристаллические решетки практически всегда обладают структурными несовершенствами разных порядков.

Структурные дефекты кристаллических веществ систематизируют по их пространственной организации – по количеству измерений, в которых простираются качественные несовершенства идеального строения, выделяя четыре основных класса [8, 85]:

1. Точечные (нульмерные) дефекты включают вакансии в узлах решетки, межузельные и точечные примеси (атомы, ионы, молекулы). Такие несовершенства обладают наибольшей внутренней энергией;

2. Линейные (одномерные) дефекты представлены дислокациями различных типов со скоплением посторонних примесей и цепочками точечных дефектов;

3. Двумерные дефекты охватывают границы между несколько разориентированными блоками, дефекты упаковки и, в том числе внешние поверхности кристаллов. Последние подразделяются на сингулярные (гладкие), несингулярные (шероховатые) и вицинальные (ступенчатые) поверхности;

4. Объемные (трехмерные) дефекты включают включения инородных фаз, объемные скопления точечных дефектов и зоны, формирующие пространственную неоднородность свойств.

Структурные дефекты и неоднородности кристаллической решетки, обладая избыточной энергией, формируют энергетически неоднородные активные центры, развитые на металлических и неметаллических поверхностях, наиболее полно описанные в работах Г.И. Дистлера. Такие центры имеют определяющее значение в поверхностных явлениях, в том числе в процессах кристаллизации, осуществляя дальнодействующее влияние через граничные слои по поляризационному механизму, эффективность которого определяется расстоянием от поверхности.

Экспериментальные исследования показывают, что на поверхности кристаллов существуют различные типы локальных активных центров, которые различаются своей энергией. Центры первого типа – *эпитаксиальные* – обладают способностью к изменению структуры жидкой компоненты в сторону ее упрочнения, тогда как центры второго типа – *поляризующие* – инициируют кристаллизацию, но не способны изменять структуру поровой жидкости [52, 133].

В таких работах были установлены характерные параметры дальности действия этих центров, которые зависят как от природы, так и от размеров активных центров. Стоит отметить, что площадь, занимаемая активными центрами, намного радиуса сферы, образованного их влиянием. Эпитаксиальные центры обладают структурирующим влиянием на расстояниях порядка от 1300-1500 Å до 2000 Å [52]. В то время как центры второго типа характеризуются много большими радиусами влияния – вплоть до 10 мкм (рисунок 1.6).

Значительные радиусы действия поверхностных активных центров и их ориентационные эффекты свидетельствуют о том, что эти явления приурочены не только к точечным дефектам, но и к сложным трехмерным дефектным агрегатам. Дальнодействие активных центров определяется сложной суперпозицией электростатических и молекулярных сил.

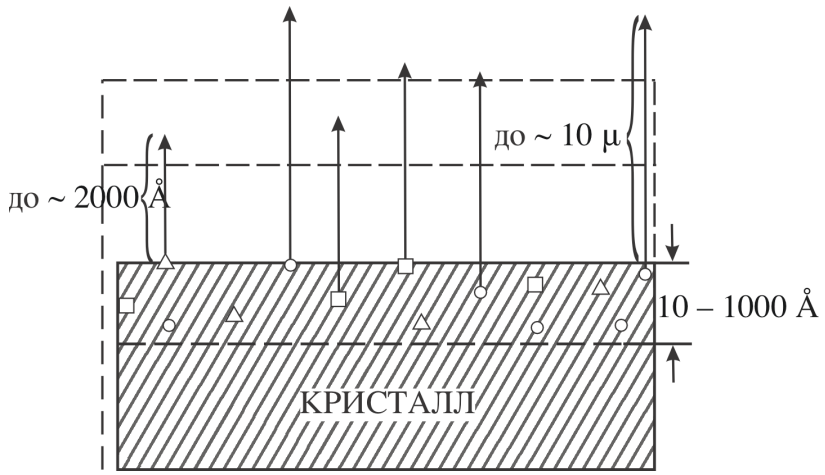


Рисунок 1.6 – Схема дальнодействия поверхности реального кристалла: А – активные центры, обладающие структурирующим влиянием; Б – активные центры без структурирующего влияния [52]

Как показано на рисунке 1.15, активные центры локализованы в приповерхностном слое, включающем как поверхностные, так и объемные дефекты. Толщина активного слоя зависит от параметров твердого тела и природы структурных дефектов и может проникать вглубь кристаллической решетки вплоть до 1000 Å.

Глинистые частицы отличаются наиболее подходящими параметрами для формирования системы многочисленных активных центров с наибольшим их радиусом влияния среди всех твердых минеральных компонентов дисперсных грунтов, что определяется их развитым и сложным кристаллохимическим строением, высокой дисперсностью и концентрацией структурных дефектов.

В исследованиях О.М. Мдивнишвили разработана классификация активных центров глинистых минералов, учитывающая их структурные особенности [73]. На основании экспериментальных данных О.М. Мдивнишвили выделил два основных типа активных центров на глинистых частицах: 1) электронноакцепторные центры – возникают за счёт протонизированных гидроксильных групп и электронноненасыщенных атомов на границе пакетных слоёв; 2) электроннодонорские центры – определяются изоморфизмом кристаллов глин и ненасыщенными связями на их ребрах.

Стоит отметить, что наибольшее количество и активность поверхностных центров характерна для минералов группы монтмориллонита, постепенно снижаясь при переходе к минералам группы каолинита.

Такие активные центры распределены по всей поверхности глинистых частиц, затрагивая как базальные плоскости, так и торцевые поверхности (рисунок 1.7).

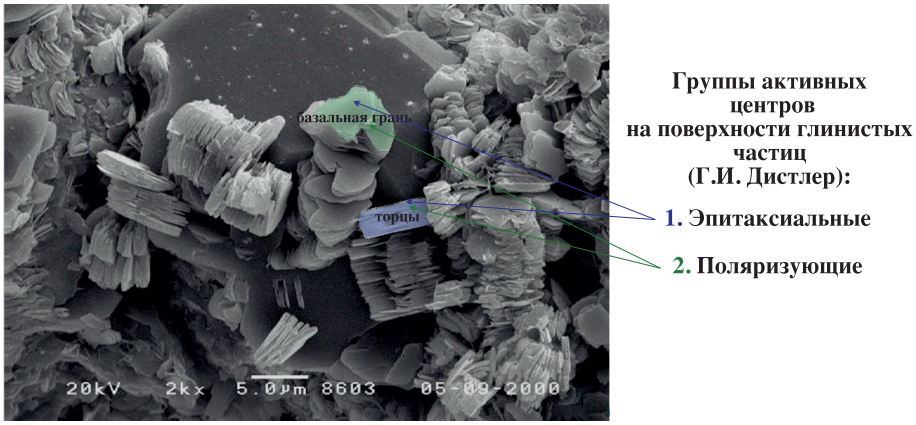


Рисунок 1.7 – Система активных центров на поверхности глинистых частиц (СЭМ-изображение каолинита на зерне кварца, полученное Omni Laboratories Inc., с дополнениями автора)

1.4 Природа формирования структурных связей глинистых грунтов

Принципиальное значение при комплексной оценке водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов имеет учет структурных связей, чему в зарубежных исследованиях часто не уделяется должного внимания. Следует также еще раз упомянуть классификацию грунтов по их консистенции, показатель которой определяется для образцов нарушенного сложения, при разрушении структурных связей, предопределяющих основные свойства глин и их поведение при изменении НДС, протекания физико-химических процессов и др.

Анализ природы и характера взаимодействия между глинистыми частицами и их агрегатами служит основой для анализа формирования физико-механических и водных свойств тонкодисперсных грунтов, а также прогноза их поведения под действием давления от сооружений. В результате энергетического взаимодействия между частицами различной дисперсности генерируются структурные связи, отличающиеся сложной и разнообразной природой формирования.

Характер, тип и особенности структурных связей глинистого грунта определяются историей их формирования в геологическом прошлом, а также существованием в настоящее время, при тесном взаимодействии со стадией литификации и современным техногенным влиянием и длительностью его воздействия в условиях инженерного освоения территории и использования подземного пространства.

Значительный вклад в понимание природы структурных связей внесли исследования В.И. Осипова, В.Н. Соколова под руководством Е.М. Сергеева и работы В.Д. Ломтадзе. Теоретической основой для изучения структурных связей послужили труды в области физикохимии и коллоидной химии, выполненные П.А. Ребиндером, Б.В. Дерягиным, С.В. Нерпиным и др. Интересно отметить, что работы П.А. Ребиндера легли в основу представлений о процессах кристаллизации и формировании прочности строительных

материалов с контролируемыми свойствами – цементов [87]. Специфика грунтов, в отличие от таких систем, заключается в их природном формировании и преобразовании под действием природных и техногенных факторов во времени. Однако в результате таких исследований были сформулированы основные представления о природе структурных связей, формирование которых происходит под действием комплекса физических, физико-химических и химических процессов, определяющих прочность контактов между частицами и их агрегатами в глинистых грунтах [87]. В настоящее время принято понимать, что всем глинистым грунтам присущ комплекс структурных связей различной физической природы, определяемых степенью литификации глин: магнитные, кулоновские (дипольные), молекулярные, ионно-электростатические и химические (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Природа и характер структурных связей [35, 68, 80, 82]

Стадия литогенеза	Степень литификации глинистых грунтов	Тип глинистых грунтов	Преобладающая физическая природа структурных связей	Прочность единичного контакта, Н
Диагенез (ранний и поздний)	Предельно малая	Глинистый ил в текучем и скрыто-текучем состоянии	Молекулярные Магнитные	$10^{-3} – 10^{-2}$ 10^{-9}
Катагенез	Малая	Глина в скрыто-текучем, скрыто-вязко-пластичном или пластичном состоянии	Молекулярные Магнитные Появление ионно-электростатических	$10^{-3} – 10^{-2}$ $10^{-2} – 10^{-4}$
	Средняя	Глина уплотненная в явно или скрыто-пластическом состоянии	Ионно-электростатические Сохранение молекулярных Появление химических	$10^{-2} – 10^{-4}$ до 10^{-3} до 10^{-1}
	Высокая	Глина в полутвердом или твердом состоянии	Ионно-электростатические Химические Молекулярные	$10^{-2} – 10^{-4}$ до 10^{-3} $10^{-3} – 10^{-2}$
Стадия регионального метаморфизма	Предельно высокая	Глина в твердом состоянии	Ионно-электростатические Химические	$10^{-2} – 10^{-4}$ до 10^{-7}

Примечание: В особых случаях в глинистых грунтах малой степени литификации могут формироваться структурные связи химической (цементационной) природы, определяющие дальнейшее развитие пород

Формирование структурных связей берет свое начало с раннего и в большей степени позднего диагенеза, в ходе которых осадок превращается в грунты, обладающие связностью, при этом помимо сложных взаимодействий физической, физико-химической и химической природы особую роль играют биохимические преобразования.

На стадии диагенеза формирование структурных связей происходит за счет действия молекулярных (ван-дер-ваальсовских), кулоновских и магнитных сил.

Существование магнитных связей объясняется наличием на поверхности некоторых тонкодисперсных частиц тонких ферромагнитных пленок, что было установлено

Ю.Б. Осиповым [83]. Однако роль магнитных сил в формировании структурных свойств тонкодисперсных грунтов незначительна.

При наличии заряда глинистых частиц на стадии диагенеза основное значение имеют кулоновские (дипольные) силы, которые способствуют первоначальному формированию агрегатов частиц и, соответственно, стабилизации осадка.

Существенное влияние оказывают молекулярные (ван-дер-ваальсовские) связи дальнего действия, характерные только для тел микроскопического размера. Такие силы во многом определяют формирование связного осадка на ранних этапах его развития, тем самым обеспечивая их начальную прочность и микростроение.

Энергия молекулярного взаимодействия U двух плоскопараллельных частиц определяется согласно выражению [50]:

$$U = -\frac{A}{12\pi h^2} \tag{1.1}$$

где A – константа Гамакера, учитывающая интенсивность взаимодействия частиц и свойств разделяющей их среды;

h – расстояние между частицами.

По мере уплотнения и литификации глинистых отложений ван-дер-ваальсовские взаимодействия постепенно дополняются и перекрываются более прочными типами структурных связей – ионно-электростатическими и химическими, формирование которых наблюдается в процессе протекания катагенеза – самой длительной стадии формирования глинистых грунтов [80, 82, 114]. Такой процесс определяет их уплотнение и преобразование в пластичные и твердые разности под действием повышенных температур при совместном действии гравитационного давления, а также тектонических напряжений. Катагенез характеризуется необратимыми трансформациями морфологии порового пространства грунтов, частично минеральных ассоциаций, включая состоящие из глинистых, преобразованием физико-механических, водных свойств и др.

Роль ионно-электростатических сил в глинистых грунтах исследована В.И. Осиповым [80, 82]. Силы такой природы возникают за счет электростатического притяжения между отрицательно заряженными глинистыми частицами при находящихся между ними катионов. Данный тип связей наиболее интенсивно проявляется при сближении частиц на расстояния менее 20-30 Å. Важно отметить, что при таких небольших расстояниях интенсивность ионно-электростатического взаимодействия превышает энергию молекулярных (ван-дер-ваальсовых) сил.

Природа катионов определяет прочность ионно-электростатических связей. Так, крупные ионы с большим радиусом и низкой валентностью (например, K^+) образуют относительно слабые

связи. Напротив, малые по размеру ионы с высокой валентностью ионы (Al^{3+}, Fe^{3+}) обеспечивают более прочные взаимодействия частиц в грунтах средней и высокой степени литификации.

Близкодействующие (на расстоянии до 3,5 Å) структурные связи химической природы проявляются на последних стадиях литификации при действии высоких давлений. Данный тип связей выступает как наиболее прочный, аналогично силам внутри кристаллов [80, 82]. Для их образования требуется прямой контакт между глинистыми частицами. Выделяется три основных типа химических структурных связей: ковалентные, ионные и металлические.

Трансформация связей по их способности к восстановлению после разрушения наблюдается также по мере увеличения степени литификации и последовательной смены типов межчастичных взаимодействий от дальнодействующих (магнитных, кулоновских и молекулярных) к близкодействующим (ионно-электростатическим и химическим). В свою очередь, частичной способностью к восстановлению обладают ионно-электростатические взаимодействия. Химические связи характеризуются как необратимо разрушающиеся.

Согласно концепции П.А. Ребиндера, формирование различных типов контактов между частицами (коагуляционные, точечные и фазовые) определяет существующие различия в радиусе действия структурных связей [87]. Их образование и последовательная смена обладают общей закономерностью преобразования глинистых грунтов в ходе диагенеза и катагенеза. На начальных стадиях преобладают коагуляционные контакты, по мере литификации отложений происходит постепенный переход к точечным, а затем к фазовым контактам.

Отдельно необходимо остановиться на таком процессе, как «цементация» глинистых отложений за счет формирования жестких структурных связей еще на стадии диагенеза, что способно изменять естественный ход преобразования осадка при действии гравитационных сил, в том числе за счет его дегидратации. При избыточном содержании цементирующего вещества формирование структурных связей, описанных выше (молекулярных, ионно-электростатических), может быть скомпенсировано жесткими. В таком случае может наблюдаться изменение в характере процесса преобразования и дегидратации осадка. Сохраняется их высокая пористость за счет «ажурного» строения с жестким, но хрупким каркасом. Таким образом, между физическими параметрами (пористость, влажность) и механическими свойствами пород возникает несоответствие, что определяет важность применения особого подхода к таким грунтам в рамках проведения инженерно-геологических и геотехнических исследований.

Как следует из анализа условий осадконакопления, рассмотренных ранее, глинистые породы характеризуются различными типами цементации, среди которых наиболее распространены кремнистый и карбонатный цементы. В качестве цементирующих веществ могут также выступать соединения железа и, реже, соли различной растворимости.

Жесткие структурные связи, сформированные на стадии ила, характерны для иольдиевых глин, описание которых было приведено выше.

Молодые палеогеновые кремнисто-глинистые грунты, которые прослеживаются в разрезе восточного склона Урала, характеризуются динамической неустойчивостью, что определяется их специфическим составом и структурой. Такие глины отличаются наличием жестких кремнистых структурных связей, которые препятствовали их уплотнению в процессе протекания литогенеза. Для отложений характерна относительно низкая естественная плотность ρ_e = 1,55-1,60 г/см^3 и высокая пористость (55-60%), что определяется присутствием в их составе опала, формирующего кремнистый каркас. Плотность минеральной части ρ_s таких глин составляет примерно 2,50 г/см^3 [3, 101].

Особый интерес представляют жесткие структурные связи, формируемые различными соединениями железа Fe^{3+}: оксидами, гидроксидами, а также фульватами и гуматами при наличии в грунтах органической компоненты. Образование данного типа связей происходит преимущественно в условиях гипергенеза при наличии аэробной обстановки в приповерхностной зоне глинистых отложений, что предопределяет окисление соединений железа двухвалентных форм в трехвалентные. Анализе озерно-ледниковых и моренных отложений наглядно позволяет проследить такие закономерности. Развитие прочных структурных связей озерно-ледниковых отложений сдерживается их относительно молодым возрастом и залеганием в относительно спокойной тектонической обстановке Ленинградской области. Ориентированное слоистое микростроение дополнительно ограничивает процесс их дегидратации, что затрудняет отток воды из грунта. При этом при выходе таких отложений на дневную поверхность наблюдается активизация процессов цикла периодического подсыхания и увлажнения, промерзания и оттаивания, ровно как и окислительных преобразований толщи в верхней части разреза. Весомую роль при этом играют процессы, приводящие к переходу закисных соединений Fe^{2+} в окисные и гидроксидные формы Fe^{3+} в условиях наличия кислорода. Это влечет за собой агрегирование глинистого грунта, снижение показателей его влажности и формирование цементационных связей, способствующих упрочнению грунтов верхней части разреза [42]. Процессы ожелезнения проявляются в виде характерных желтоватых, бурых и охристых пятен и разводов в глинистых грунтах.

Аналогичные закономерности могут быть прослежены при анализе моренных отложений, залегающих в приповерхностных частях, в зоне аэрации, где фиксируется присутствие в грунтах соединений гидроксидов железа ($Fe(OH)_3 \cdot nH_2O$). Морены аэробной обстановки характеризуются пониженными значениями естественной влажности (W_e = 8–14 %) с формированием их твердого или полутвердого состояния при высокой прочности и наличием трещиноватости [43].

Наименее изученным аспектом остается роль органической составляющей в образовании структурных связей, наблюдаемых при взаимодействии глинистых частиц с органическими соединениями. Органическая составляющая формирует гибкие структурные связи путем образования на поверхности глинистых минералов органопленок с вступлением в реакцию с ионами обменного комплекса, что определяет в первую очередь повышение связности тонкодисперсных отложений [35]. Такой процесс характеризуется химической природой органических молекул, которые могут представлять собой разветвленные, неразветвленные, циклические соединения с различной длиной углеродной цепи.

Формирование структурных связей за счет органокомплекса прослеживается с помощью распространенных на территории северо-запада России нижнекембрийских синих глин. Эти отложения, как уже указывалось ранее, формировались в условиях теплого моря с преобладанием восстановительной обстановки. В таких условиях происходило интенсивное накопление органического вещества, содержание которого в глинах достигает 4% (до 1% из которых приходится на битуминозную органику). Органическая составляющая сорбировалась на поверхности глинистых частиц и сформировала органические экранирующие пленки, которые снизили их физико-химическую активность. Несмотря на то, что содержание тонкодисперсной фракции, представленной высокощелочными глинистыми минералами, составляет более 35 %, емкость обмена (физико-химическое поглощение) таких глин не превышает 12, реже достигает 14 мг-экв/100 г [29].

Примером влияния органического вещества на образование структурных связей служат послеледниковые литориновые озерно-морские отложения, формировавшиеся в условиях последовательной смены морского на озерный режим. Характерной особенностью этих отложений служит наличие хорошо разложившегося органического вещества, что часто определяет их состояние и свойства [33]. Увеличение содержания органического вещества и его сорбции на тонкодисперсных частицах приводит к повышению гидрофильности грунтов и, соответственно, увеличению их влажности, при этом наблюдается относительное постоянство общей прочности отложений с некоторой флуктуацией при прочих равных условиях за счет формирования дополнительных органических структурных связей [33].

1.5 Природа прочности и деформационной способности глинистых грунтов

Исследование физического состояния и физико-механических свойств глинистых грунтов требует комплексного подхода, в том числе основанного на определении степени их литификации.

В зависимости от степени литификации, которая часто определяет прежде всего плотность сложения грунтов, их физическое состояние, тип, прочность и характер структурных связей, а

также текстурно-структурные особенности и т.п., могут быть применены две модели, описывающие глинистые отложения в условиях их естественного залегания:

1. Тонкопористая модель – для слаболитифицированных грунтов малой и частично средней степени литификации.

2. Трещиновато-блочная модель – адекватна для анализа грунтов частично средней и высокой степени литификации;

Важно подчеркнуть, что между такими моделями не существует четкой границы – они взаимодополняют друг друга. В трещиновато-блочных средах каждый структурный блок сохраняет свойства среды с тонкой пористостью, в то время как в тонкопористых грунтах может быть выделена микротрещиноватость, требующая применения специальных методов исследования [31, 32, 60, 69]. Один из таких методов – проведение наливов с красящим веществом (эозином), которое не сорбируется блоками пород, что позволяет визуализировать пути трассирования инфильтрующихся вод в толще микротрещиноватых грунтов [35].

Анализ тонкопористой среды применим к водо- и водогазонасыщенным тонкодисперсным грунтам малой и частично средней степени литификации, к которым относятся, прежде всего, отложения приповерхностного залегания четвертичного возраста, исключая моренные образования, в районах с гумидным климатом. В районах с аридным типом климатических условий к грунтам данного типа будут отнесены отложения подтопленных территорий. Фундаментальной теорией, применяемой к таким грунтам, принято считать теорию фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов, описанную К. Терцаги еще в 1925 г., в основе которой лежит решение задачи одномерного уплотнения глинистого слоя под действием давления. Принцип использования фильтрационной консолидации получил широкое распространение в практике инженерной геологии, геотехники, механики грунтов и других смежных дисциплин в странах всего мира.

Существует широкая практика применения данного подхода исследователями различных стран при анализе устойчивости сооружений различного назначения, в том числе в России, странах Скандинавии (Норвегии, Швеции, Дании), Европы, Канады, а также в ряде штатов США, в Азии, Мексике и др. [144].

Положения фильтрационной консолидации широко используются в практике расчетов не только оснований сооружений, но также при оценке устойчивости склонов и откосов, сложенных слабыми глинистыми грунтами в условиях их разгрузки. Анализ устойчивости часто основан на параметрах, полученных в ходе лабораторных трехосных и сдвиговых испытаний по методикам консолидировано-дренированной (КД) и консолидировано-недренированной (КН) схем [118, 136, 137, 145, 151, 169, 177].

Безопасность строительства и эксплуатации сооружений различного назначения во многом определяется корректностью выполненных инженерно-геологических исследований и в первую очередь достоверностью определения показателей физико-механических свойств грунтов, закладываемых в расчет при оценке и обеспечении устойчивости наземных зданий и сооружений различного назначения, а также прогнозированием тех процессов, которые развиваются при взаимодействии грунтов с сооружениями в зависимости от технологии их функционирования.

Как уже отмечалось ранее, природа прочности глинистых грунтов сложна и многообразна, находится в прямой зависимости как от геологической истории развития территории, так и от современных условий их существования. Соответственно, наиболее полная картина факторов, определяющих прочность водонасыщенных глинистых грунтов, может быть представлена путем анализа их генезиса, литогенеза и последующего техногенеза при инженерно-хозяйственном освоении территории. Условия протекания литогенеза играют роль в формировании комплекса факторов, влияющих на прочность, включая минеральный и гранулометрический состав, структурно-текстурные особенности, состав обменных катионов, наличие и виды органического вещества различного генезиса, в том числе состав и численность микроорганизмов, а также продуктов их метаболизма. Литификация глинистых грунтов, зависящая во многом от тектонической активности региона, определяет соотношение различных типов структурных связей, характер и степень трещиноватости. При анализе прочности глинистых грунтов немаловажное значение будет иметь наличие цементирующего вещества, образующего жесткие структурные связи.

Наиболее полно влияние структурных связей на прочность глинистых грунтов раскрыто в работах В.И. Осипова [80, 82]. Согласно данным экспериментальных исследований наименьшей прочностью обладают тонкодисперсные отложения с преобладанием молекулярных сил и кулоновских взаимодействий. Для таких глинистых грунтов с преобладанием слабых равнопрочных структурных связей характерны наименьшие значения прочности.

Более сложный характер деформирования наблюдается при сочетании молекулярных структурных связей с ионно-электростатическими и химическими. В этом случае отмечается наличие хрупких деформаций за счет необратимого разрушения прочных, жестких структурных связей, а остаточная прочность при сохранении молекулярных связей составляет лишь часть от пиковой.

При исследовании водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов малой – частично средней степени литификации необходимы знания об их пустотности, выраженной прежде всего межагрегатной и внутриагрегатной пористостью.

Вопросы формирования микросложения глинистых грунтов были описаны в работах К. Терцаги, А. Казагранде, Т.К. Тана, В.М. Гольдшмидта, Т. Лэмба, И. Розенквиста и др. В таких работах также были установлены различия между моделями морских и пресноводных глинистых отложений в ненарушенном состоянии, выявлены закономерности трансформации минеральных взаимодействий при нарушении сложения глин. Вопросы формирования многообразия микроструктур глинистых грунтов подняты в работах Л. Бардена, К. Коллинса, Е.М. Сергеева, Б. Грабовской-Ольшевской, В.И. Осипова, В.Н. Соколова и др. Работы последних авторов посвящены типизации микроструктур глинистых грунтов согласно морфометрическим и геометрическим особенностям порового пространства, при этом их неоспоримое достоинство заключается в исследованиях глинистых грунтов с сохранением их естественного сложения, а также с учетом структурных связей и структурно-текстурных особенностей [80, 81].

Такие исследования показывают наличие тесной взаимосвязи между особенностями микросложения глинистых грунтов, условиями их формирования и степенью литификации, о чем было сказано еще ранее в разделе 1.2. Работы позволяют проанализировать изменчивость морфологии порового пространства по мере увеличения степени литификации. Согласно работам школы инженерной геологии МГУ, проведенным под руководством Е.М. Сергеева, для слаболитифицированных глинистых грунтов, рассматриваемых как тонкопористая среда, характерны следующие типы их микросложения [80, 81]:

1. Ячеистое, отличающееся преобладанием чаще изометричных межмикроагрегатных пор с размерами 2-12 мкм. Такая форма обеспечивает относительно высокую степень открытости и сообщаемости пустот. Диаметр межультрамикроагрегатных пор снижается до 0,3 мкм, и они представлены изолированными пустотами;

2. Скелетный (зернистый) тип порового пространства, для которого типично сочетание изометричных межзернистых пор с анизометричными клиновидными или щелевидными межультрамикроагрегатными порами, что снижает сообщаемость порового пространства;

Необходимо отметить, что по мере увеличения степени литификации до частично средней наблюдается изменение их микросложения. Изменяется форма пор: от преимущественно изометричной происходит переход к щелевидным, вытянутым и плоским формам (в матричных и ламинарных разностях, рисунки 1.8 и 1.9). Одновременно с трансформацией формы происходит снижение диаметров пор, а также уменьшение степени их сообщаемости, приобретающей выраженную анизотропию, прежде всего вкрест параллельной ориентации частиц.

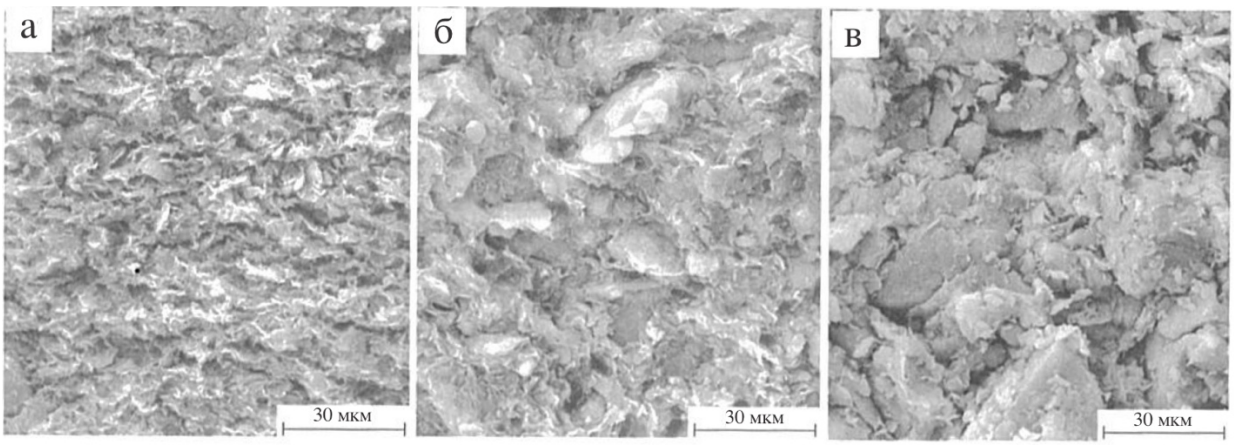


Рисунок 1.8 – Микросложение: а) морской глины (Q_{III}); б) аллювиальной глины (Q_{III}); в) моренного суглинка (Q_{II}) [80]

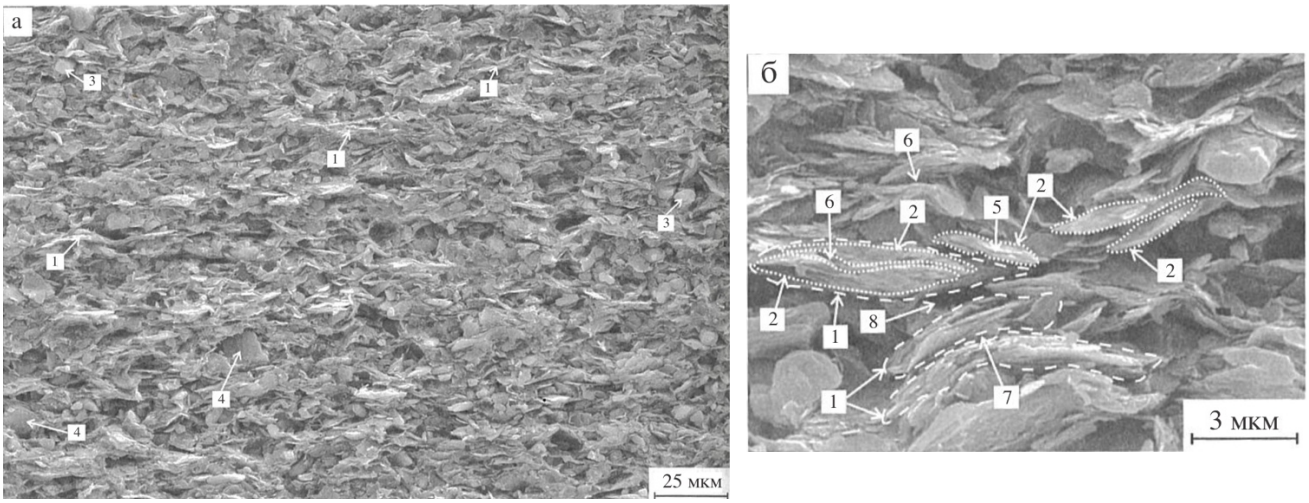


Рисунок 1.9 – Ориентированное ламинарное микросложение: а) фотомонтаж РЭМ-изображений глинистого прослоя ленточной глины lgQ_{III}; б) фрагмент ламинарной микроструктуры; 1 – тонкие микроагрегаты и 2 – листообразные ультрамикроагрегаты глинистых частиц; 3 – кварцевая пыль; 4 – полевошпатовые пылеватые зерна; 5 – межчастичные ультрамикропоры щелевидной формы; 6 – межультрамикроагрегатные тонкие микропоры анизометричной формы; 7 и 8 – мелкие и крупные межмикроагрегатные микропоры анизометричной формы [80]

Таким образом, глинистые грунты малой и частично средней степени литификации обладают тонкой пористостью с сочетанием пор различного размера, формы и степени сообщаемости.

Особенности строения средне- и высоколитифицированных глин требуют их рассмотрения как трещиновато-блочной среды [31, 32, 69]. В таких грунтах необходимо рассматривать как их микростроение, характерное для отдельного блока, так и макростроение, определяемое системами трещин [103]. Последнее прослеживается при визуальном изучении глин в карьерах и подтверждается данными геофизических исследований.

Формирование трещиноватости в глинистых породах происходит под воздействием тектонических и нетектонических факторов. Теоретической основой для развития понятия о трещиноватых средах послужили работы основоположника механики разрушения, отклонения от механики сплошной среды – А.А. Гриффитса, который подчеркивал в своих работах отличие в характеристиках прочности сплошного тела и реальных материалов, содержащих структурные дефекты. Разработанная им концепция хрупкого разрушения среды основана на энергетическом критерии, при превышении которого предполагается неустойчивое распространение «главной» трещины [84, 138].

Последующие исследования привели к развитию теории Гриффитса, результатом чего стало создание модифицированной концепции Дж. Ирвина – Э. Орована, описывающей механизмы квазихрупкого (упруго-пластического) разрушения. Данная теория учитывает формирование зоны нелинейных деформаций вблизи вершины трещины. Согласно данной концепции, в некоторых материалах наблюдается характерное распределение деформаций: у вершины трещины образуется локальная зона пластических деформаций, в то время как основная масса материала сохраняет свойства упругого деформирования [84, 138]. Такой механизм служит основой понимания развития трещин в глинистых грунтах.

Вероятность распространения трещин в глинистых грунтах снижается при увеличении их естественной влажности выше влажности липкости, которая определяет процесс самозалечивания трещин [28, 35]. В основе этого процесса лежит явление липкости, что выступает как результат комплекса физико-химических процессов, включающих взаимодействие твердых частиц грунта через обладающую «клеящим» свойством прослойку воды. В высокодисперсных монтмориллонитовых и гидрослюдистых глинах такое явление наблюдается при прочих равных условиях в присутствии в их составе обменных катионов одновалентных ионов [28].

Средняя и высокая степень литификации характерна в большей степени для коренных глин, в том числе для отложений, залегающих в пределах разреза Северо-Западного региона России.

Коренные глинистые грунты дочетвертичного возраста Европейской части России – вендские (V_2), нижнекембрийские ($Є_1$), девонские (D_{2-3}) и каменноугольные (C_{1-3}) – как уже было сказано ранее, имеют морской генезис.

В геологическом разрезе северо-запада России каменноугольные отложения представляют собой самые молодые глинистые дочетвертичные образования. В прошлом столетии такие породы представляли собой особый интерес, связанный с бокситовыми залежами, приуроченными к этим породам. Их формирование отражает трансформацию коры выветривания от сиаллитовых (состоящих преимущественно из водных алюмосиликатов) к

аллитовым разностям (с доминированием гидроксидов алюминия) и непосредственно бокситам [7, 15]. Характерной чертой каменноугольного периода являлось развитие бурной растительности, что нашло свое отражение в свойствах формировавшихся в то время глинистых отложений. Высокое содержание органического вещества придает каменноугольным глинам характерные темные тона окраски до почти черных, встречаются также и пестроцветные разности. Такие глины часто пластичны и обладают жирностью на ощупь [78].

Каменноугольные глины относятся к отложениям средней степени литификации. К этой же группе разностей принадлежат также юрские глины. Их микростроение показано на рисунке 1.10.

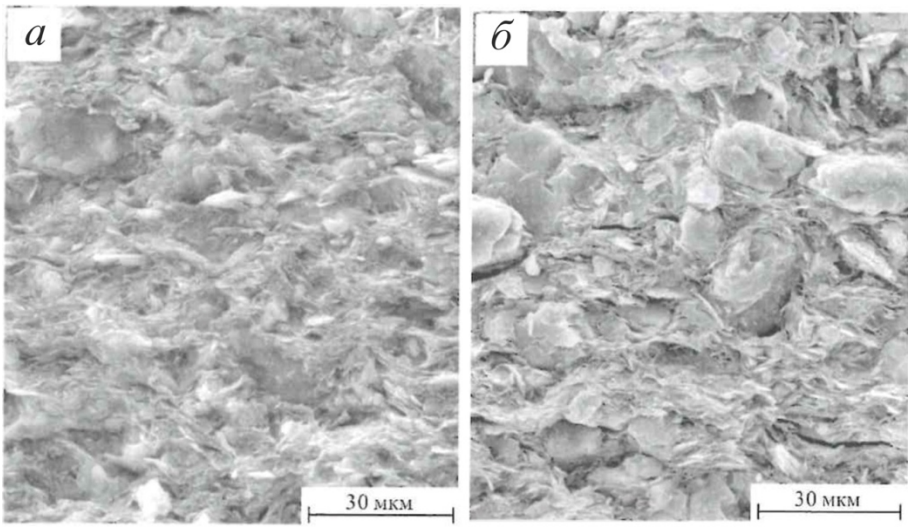


Рисунок 1.10 – Микростроение образцов: а) юрской глины (J_3); б) каменноугольной глины (C_1) [80]

Девонский период характеризовался как этап морской трансгрессии, в который мелководное море с системой заливов стало областью накопления толщ переслаивающихся песчаников, глин и их локально засоленных разностей. Источником материала для формирования глинистых отложений среднего и верхнего девона (D_{2-3}), вероятно, послужили размываемые породы вендского и кембрийского возраста, а также остаточные латеритные коры выветривания Балтийского щита. Девонская толща переслаивания глин и песчаников была впервые использована в качестве основания Нижне-Свирской ГЭС по рекомендации Г.О. Графтио [13].

Нижнекембрийские глины сиверской свиты связаны как в большей степени – с размывом вендских отложений, так и сохранившихся фрагментов латеритных кор выветривания Балтийского щита. Формирование голубых илов (гемипелагических отложений) происходило в спокойной обстановке седиментации без донных течений на глубине примерно 250 м (рисунок 1.11) с благоприятными климатическими условиями при активной органической жизни.

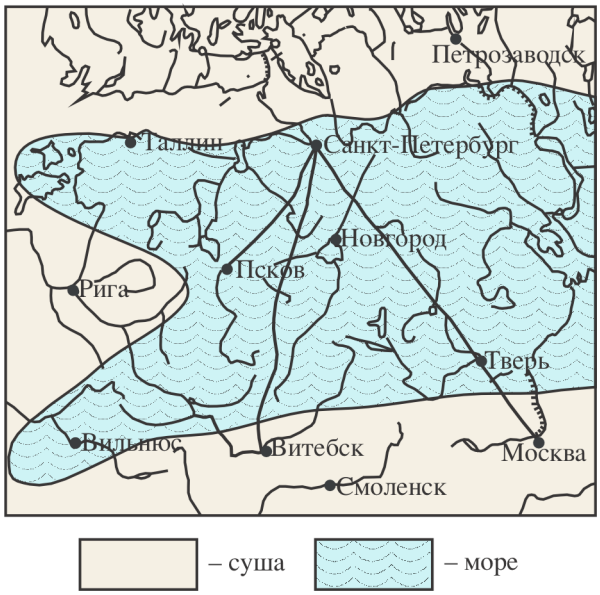


Рисунок 1.11 – Схема границы распространения моря раннего кембрия [59]

В условиях глубоковосстановительной и щелочной среды морского бассейна, где шло формирование нижнекембрийских синих глин, определило полное преобразование каолинитовых минералов в низко- и высокоактивные формы гидрослюды при отсутствии каолинита. Монтмориллонит в данных отложениях обнаруживается редко и фиксируется лишь в нижней и средней частях разреза. Анаэробные условия, сформированные за счет высокого содержания органики, способствовали генерации сероводорода (H_2S) сульфатредуцирующими бактериями, которые относятся к древним формам бактерий. Это также определило образование сульфидных минералов – пирита и тонкодисперсного мельниковита [2]. Для этих отложений характерен голубовато-зеленовато-серый оттенок, который связан с восстановительной обстановкой и цветом соединений восстановленных форм железа Fe^{2+}.

Нижнекембрийские синие глины относятся к высоколитифицированным отложениям. Их микростроение отдельного блока представлено на рисунке 1.12, а макростроение, которое отражает систему трещин, на рисунке 1.13.

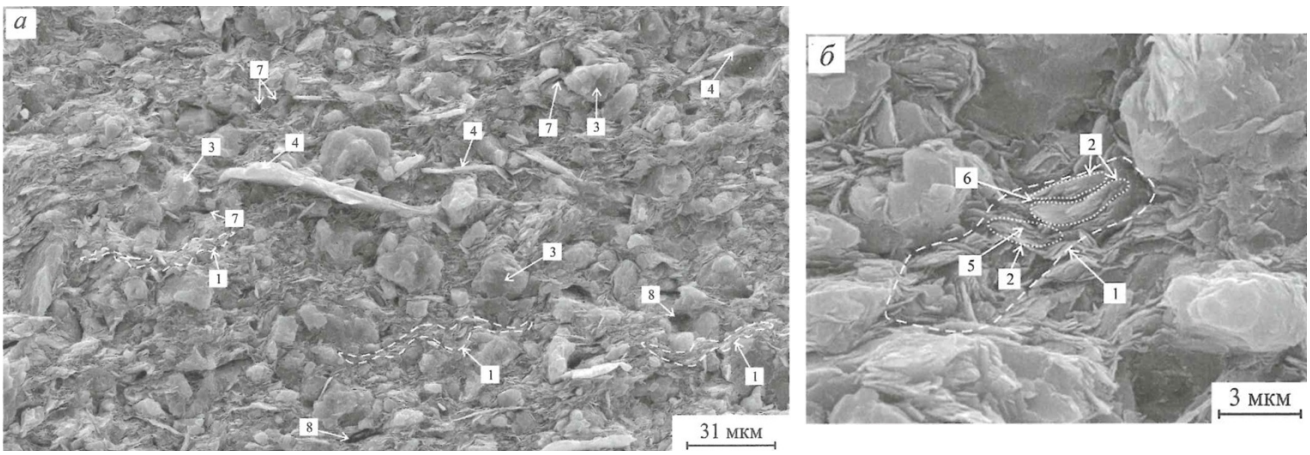


Рисунок 1.12 – Микростроение образца нижнекембрийской глины ($Є_1sv$): а) фотомонтаж РЭМ-изображений; б) фрагмент микростроения; 1 – анизометричные микроагрегаты, ориентированные по напластованию; 2 – ультрамикроагрегаты пластинчатой и листообразной формы; 3 – включения пылеватых частиц; 4 – частицы хлорита; 5 – межчастичные ультрамикропоры щелевидной формы; 6 – межультрамикроагрегатные тонкие микропоры щелевидной формы; 7 – мелкие межмикроагрегатные поры анизометричной вытянутой формы; 8 – крупные межмикроагрегатные и межмикроагрегатно-зернистные микропоры изометричной или немного вытянутой формы [80]

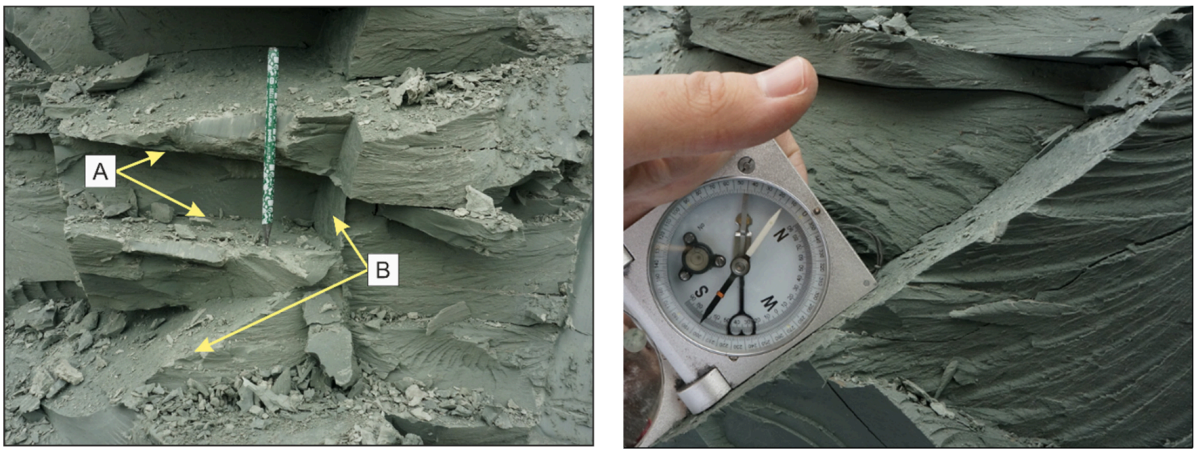


Рисунок 1.13 – Литогенетические (А – на левом фото) и тектонические (В – на левом и правом фото) трещины в нижнекембрийских синих глинах в бортах карьера Красный бор (фото Г.А. Лохматикова, [69])

Высокая степень литификации с трещиновато-блочным строением также характерна для верхнекотлинских «ляминаритовых» глин верхнего венда. Микростроение образца таких глин показано на рисунке 1.14.

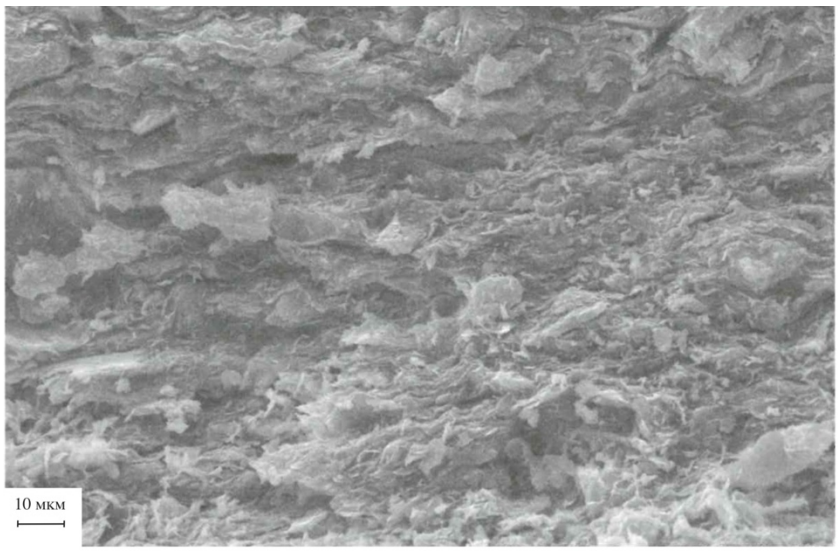


Рисунок 1.14 – Микростроение образца глин верхнего венда (V_2) [80]

Геологическая история формирования верхнекотлинских глин связана с размывом древних кор химического выветривания, развитых преимущественно на породах Балтийского щита, и последующим сносом материала в теплый вендский мелководный морской бассейн [9, 86] (рисунок 1.15). Такие коры выветривания, характеризующиеся латеритным профилем, определили преимущественно каолинит-гидрослюдистый состав глин венда. На стадии диагенетических процессов, протекавших в близких к нейтральным кислотно-щелочных условиях, шло преобразование каолинита в гидрослюды, что происходило при обязательном участии микроорганизмов.

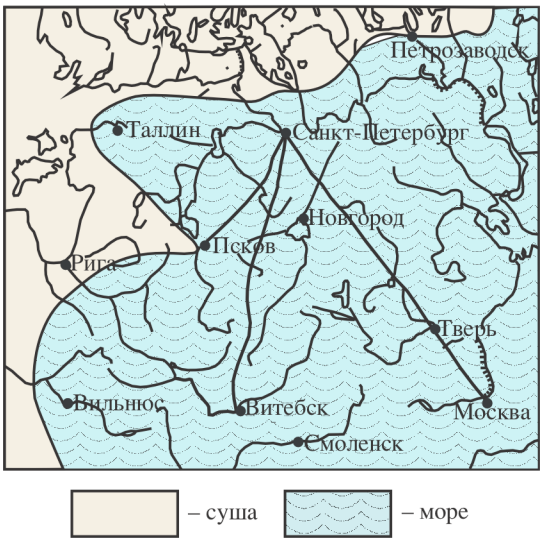


Рисунок 1.15 – Схема границы распространения моря венда (котлинский век): 1 – море, 2 – суша [59]

Глинистые толщи, выведенные на дневную поверхность в дочетвертичное время, характеризуются континентальным этапом развития с протеканием регрессивного литогенеза, который продолжался на протяжении верхнего палеозоя (за исключением глин D_{2-3} и C_{1-3}), мезозоя и кайнозоя вплоть до наступления ледникового периода. Такой этап приводит к

формированию зон разуплотнения в верхних частях глинистых пород и их гидратации, что практически не учитывается при решении инженерно-геологических задач. Наличие зонального строения прослеживается в разрезе коренных нижнекембрийских глин сиверской свиты ($Є_1sv$) и глин верхнего венда (V_2) в пределах Ленинградской области севернее Балтийско-Ладожского глинта. В зонах выхода на поверхность глин $Є_1sv$ под четвертичными отложениями они характеризуются полутвердой, местами тугопластичной консистенцией, тогда как в районах их залегания под локально-распространенными отложениями песчаников тискреской свиты ($Є_1ts$) консистенция глин сменяется на твердую (например, Волховский р-н, с. Старая Ладога). Согласно проведенным исследованиям Р.Э. Дашко, развитие зоны регрессивного литогенеза и дополнительной гидратации в нижнекембрийских синих глинах прослеживается в среднем на 20 м, а в верхнекотлинских глинах достигает 40-50 м, при этом такая глубина определяется величиной их давления набухания [35, 46].

Следует отметить, что при проектировании, строительстве и обеспечении длительной эксплуатации сооружений необходимо учитывать возможность преобразования глин высокой степени литификации в слабые разности, но при обязательном сохранении трещиноватости. Такая трансформация может происходить под действием следующих факторов:

1. Заболачивание территории, чаще протекающее как природный процесс;

2. Техногенные воздействия – утечки канализационных стоков по существующим трещинам в глинах.

1.6 Природные и техногенные факторы, определяющие фазовое состояние грунтов и его преобразование

Как уже отмечалось ранее, на современном этапе развития инженерной геологии исследование грунтов для корректного анализа и оценки водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов как оснований и среды сооружений различного назначения требует учета традиционно рассматриваемых фаз – твердой, жидкой, газообразной, а также фазы биогенного происхождения, связанной с деятельностью подземных микроорганизмов.

Исследование деятельности подземной микробиоты должно быть увязано с комплексным рассмотрением их присутствия и привнесения во взаимосвязи с природными и техногенными источниками. Такой анализ должен учитывать весь спектр инженерно-хозяйственной и промышленной деятельности, а также функционирования системы жизнеобеспечения городов и горнопромышленных регионов. Характер использования территории предопределяет прежде всего степень контаминации подземных вод и грунтовой толщи, а также возможность трансформации физико-химических и биохимических условий подземной среды, ее микробную пораженность и, соответственно, агрессивность по отношению к подземным конструкциям – несущим и ограждающим [34]. Следовательно, необходимо принимать во внимание и

исторический аспект использования территории на протяжении времени функционирования города [18].

Основные источники поступления и распространения микроорганизмов в подземных водах и грунтах можно разделить на две большие группы: *природные* и *техногенные*. *Природные* источники микробиоты включают глеевые и глееватые почвы, болота, непосредственно подземные воды (включая глубокие водоносные горизонты), а также, как уже подчеркивалось в разделе 1.2, зоны кор химического выветривания горных пород. Последние из названных характеризуются присутствием микроорганизмов, ускоряющих преобразование минеральной составляющей материнских горных пород. Подобные естественные источники формируют микробное разнообразие, способного к преобразованию под действием техногенных факторов. Основные источники поступления и распространения микроорганизмов в подземных водах и грунтах можно разделить на две большие группы: *природные* и *техногенные*. К *природным* источникам микробиоты относят глеевые и глееватые почвы, болота, непосредственно подземные воды (в том числе глубокие водоносные горизонты), а также, как уже подчеркивалось в разделе 1.2, зоны кор химического выветривания горных пород. Такие коры характеризуются присутствием микроорганизмов, ускоряющих трансформацию минеральной составляющей материнских горных пород.

Среди *техногенных* источников особую роль играют системы водоотведения, промышленные отходы, свалки, кладбищенские территории, а также нефтехранилища и нефтеперерабатывающие объекты, при этом сама нефть служит носителем определенных таксонов микроорганизмов. Отдельного внимания заслуживают обогатительные фабрики, использующие нефтепродукты в процессах флотационного обогащения полезных ископаемых.

Наиболее распространенным среди *природных* источников содержания богатого микробиоценоза выступают заболоченные территории. Важной составляющей болотных вод является присутствие разнообразных таксонов микроорганизмов. Состав микробных сообществ болот зависит от степени их загрязнения, окислительно-восстановительных условий, состава болотных вод, степени разложения органического вещества и др. и характеризуется следующими группами [37]:

1) Аэробные микроорганизмы: нитрифицирующие (здесь и далее порядок концентраций (клеток/г) – 10^4), тионовые (10^4-10^5);

2) переходные (факультативные): денитрифицирующие (до 10^6);

3) анаэробные: аммонифицирующие (10^6-10^7), сульфатредуцирующие (~10^6), целлюлозоразлагающие (10^3-10^4), метангенерирующие (10^2-10^4), железоредуцирующие, водородобразующие и др.

Инфильтрация болотных вод определяет содержание легко- и трудноокисляемых органических соединений абиотического и биотического генезиса в подземных водах, при этом окислительно-восстановительный потенциал (Eh) обычно близок к нулю или имеет отрицательные значения, что свидетельствует о восстановительных условиях среды.

Перенос микроорганизмов с болотными водами приводит к обогащению подстилающих грунтов и подземных вод соответствующими таксонами болотной микробиоты. Стоит отметить, что такое влияние может распространяться на глубину 30 метров и более с образованием на поверхностях минеральной части биопленок – микробные сообщества, дополнительно поддерживающие благоприятную для размножения среду, что предопределяет процесс трансформации состава, состояния, физико-механических и водных свойств песчано-глинистых грунтов. Важным фактом выступает соответствие размеров бактериальных клеток и глинистой фракции (2-5 мкм и менее), что способствует росту содержания тонкодисперсной фракции в грунтах. Следует отметить, что процесс адаптации микроорганизмов в загрязненных средах основан на их способности к уменьшению размеров вплоть до наноформ [70]. Следовательно, благодаря высокой устойчивости к внешним воздействиям, а также малым размерам, такие микроорганизмы способны проникать на глубины и превышающие 30 м.

Известно, что микроорганизмы обладают зарядом различной плотности, распределенным по поверхности. Поверхностный заряд бактериальных клеток представляет собой характеристику, тесно взаимосвязанную с составом клеточной оболочки. Его величина и знак определяются: химическим составом клеточной стенки (в том числе содержанием пептидогликанов, тейхоевых кислот); наличием карбоксильных, амино-, фосфатных и других ионизирующихся групп; видовой принадлежностью микроорганизмов (грамположительные и грамотрицательные бактерии) [119, 180]. Большинство микроорганизмов приобретают суммарный отрицательный заряд. Поверхностный заряд способен изменяться и приобретать положительные значения под влиянием факторов внешней среды, при этом наибольшее влияние оказывает величина pH среды [119, 180]. Следует подчеркнуть, что наличие поверхностного заряда характерно не только для живых бактериальных клеток, но и для мертвых.

Поверхность живой клетки отличается сложной структурой, проявляющейся в изменчивости ее химического состава, неоднородности распределения поверхностного заряда, а также неоднородности глубины поверхностного слоя. Такие структурные особенности можно рассматривать как систему естественных дефектов бактерий. Эти особенности определяют формирование на поверхности бактериальных клеток системы активных центров, по своим характеристикам (дальности действия и их количеству) сопоставимых с частицами глинистых минералов.

Помимо наличия микроорганизмов в подземных водах и грунтах, существенное влияние на их свойства оказывают и продукты метаболизма бактерий, включая белки, углеводы, а также продукты, образующиеся в результате цикла биохимической переработки органического вещества вплоть до образования биохимических газов (полной утилизации органического вещества) (рисунок 1.16).

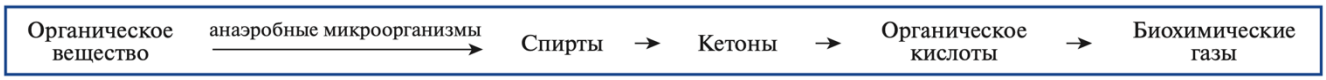


Рисунок 1.16 – Процесс утилизации органического вещества микроорганизмами [135]

С позиций газодинамики газовые пузыри подразделяются на две группы – мягкие и твердые – в зависимости от соотношения внешнего давления и внутреннего лапласовского. Последнее определяется силами поверхностного натяжения на границе раздела газовой компоненты и описывается уравнением Лапласа [12]:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}, \tag{1.2}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

r – диаметр газового пузырька.

В том случае, если внешнее давление больше лапласовского, пузыри относятся к мягким. Такие пузыри обладают высокой сжимаемостью, склонны к разрушению при воздействии на них, а также они могут сливаться друг с другом. Твердые пузырьки характеризуются крайне малыми радиусами, при этом внешнее давление практически никак на них не воздействует за счет проявления внутренних сил, что делает их устойчивыми [146, 166]. Как уже было отмечено ранее, гидрофобная газовая фаза ограничивается диаметрами поры водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов, в которой размещается газовый пузырь, и имеет в среднем размеры < 2-4 мкм и менее, что зависит от степени водонасыщения S_r.

В поровой воде сохраняются твердые пузырьки малорастворимых газов CH_4, N_2, H_2, редуцирующиеся в анаэробной обстановке, тогда как растворимые газы CO_2, H_2S, NH_3 обогащают химический состав поровых вод и определяют агрессивность подземных вод по отношению к конструкционным материалам.

Важно отметить, что микробные сообщества болот продуцируют широкий спектр газов как продуктов метаболизма в зависимости от окислительно-восстановительных условий, включающий все вышеупомянутые компоненты (CH_4, N_2, H_2, CO_2, H_2S, NH_3) с различной степенью растворимости.

Заболачивание территорий неизбежно приводит к развитию специфических глеевых (оглеенных и глееватых) почв болотного типа характерного серо-голубого или зеленоватого оттенка (с содержанием соединений восстановленного железа Fe^{2+}), что определяется их

длительным переувлажнением и анаэробными условиями среды при обязательном участии микроорганизмов [128, 152, 171].

Следует отметить, что наиболее адекватная оценка глинистых грунтов может быть проведена только при комплексном подходе, учитывающем как условия их формирования, так и современные преобразования под влиянием внешних факторов, включая *техногенные воздействия*. В отличие от природных процессов литогенеза, техногенные воздействия часто вызывают необратимые изменения в системе структурных связей глинистых грунтов и негативно воздействуют на их деформационную способность и прочность. Особенностью активного техногенного воздействия на компоненты подземного пространства является его длительность, которая несравнимо меньше продолжительности природных геологических процессов, исторических периодов. Следует подчеркнуть, что процессы изменения фазового состояния грунтов непостоянны во времени, в пространстве, по глубине геологического разреза и др. Время таких воздействий обычно составляет месяцы, годы, реже несколько десятилетий, что сопоставимо (и даже меньше) со сроком эксплуатации сооружений. Исключение составляют архитектурно-исторические памятники, срок эксплуатации которых соизмерим с историческим периодом – временем функционирования города. Для Санкт-Петербурга оно составляет более 320 лет, а для других российских и зарубежных городов – еще больше. Следует учитывать, что многие территории были заселены значительно раньше времени основания городов. Длительность активного воздействия городских структур и поселений на компоненты подземного пространства иллюстрируется примером исторического района Пески, имеющего более чем 500-летнюю историю освоения [18, 34]. При этом необходимо учитывать, что заселены были все побережья – не только вдоль Невы, но и вдоль других рек города.

В условиях Северо-Запада России, в частности Санкт-Петербургского региона, при оценке природной и техногенной трансформации грунтов следует рассматривать комплекс четвертичных отложений, а также выведенные на поверхность коренные глины, для которых помимо действия регрессивного литогенеза необходимо учитывать действие болот и канализационных стоков [18]. В случае с коренными глинами необходимо учитывать их нахождение в анаэробной среде с сохранением их трещиноватости.

Особого внимания заслуживают моренные образования, которые в естественных условиях часто относятся к грунтам частично средней степени литификации, которые в пределах Санкт-Петербурга до сих пор рассматриваются как надежное основание для свайных фундаментов. Однако под воздействием контаминантов, в том числе анаэробных форм микроорганизмов (включая газогенерирующие), такие грунты могут существенно преобразовываться. Морены, залегающие в восстановительных условиях, преобразуются из водонасыщенных грунтов в слабые водогазонасыщенные разности [35, 43].

Многоэтажные жилые и административные здания, опирающиеся на свайные фундаменты с несущим горизонтом моренных отложений, показывают продолжительные (10 лет и более) неравномерные осадки. Известно, что морена, залегающая у дневной поверхности в аэробных условиях, характеризуется высокими φ (15–25° и более), а сцепление обычно превышает 0,08 МПа за счет ее цементации гидроксидами железа [35, 43].

Моренные грунты, залегающие в восстановительных условиях и содержащие таксоны анаэробных микроорганизмов, обладают иными свойствами. Формирование биопленок, а также редукция цементирующих соединений Fe^{3+} приводит к преобразованию структурных связей, что способствует снижению сцепления до 0,04 МПа и менее, а $\varphi \rightarrow \varphi_{min}$. По результатам обратных расчетов модуль общей деформации E таких морен составляет 3 МПа и менее. Следовательно, подобные морены должны рассматриваться как квазипластичная среда [34, 35, 43].

Таким образом, при исследовании действия техногенеза на грунты основания сооружений различного назначения необходимо принимать во внимание следующие аспекты:

1. Изменение окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий подземного пространства – смещение окислительно-восстановительного потенциала в сторону отрицательных значений, изменение уровня pH (чаще подкисление среды) и, соответственно, обогащение среды органическими соединениями.

2. Создание условий для активного обогащения подземного пространства анаэробными формами микроорганизмов различных источников, включая газогенерирующие таксоны.

3. Необходимо принимать во внимание формирование специфического состава подземных вод. При активном техногенном воздействии наблюдается повышение показателей ХПК, $БПК_{5,\ полн}$, величины перманганатной окисляемости. Практически все элементы находятся в восстановленной форме: сера – в виде сероводорода H_2S, азот – в виде иона аммония NH_4^+, нитраты NO_3^- отсутствуют, преобладают нитриты NO_2^-. Особого внимания заслуживает поведение соединений железа.

Как уже было сказано ранее, в окислительной среде соединения Fe^{3+} образуют жесткие цементационные структурные связи, тогда как в восстановительных условиях переход Fe^{3+} в растворимую форму Fe^{2+} сопровождается их разрушением. Разрушение связей соединений окисленного железа вызывает ряд негативных изменений, в том числе и физико-механических свойств грунтов: уменьшения их прочности и деформационной способности.

Стоит отметить, что при анализе территорий сооружений промышленного назначения особое внимание следует уделять воздействию стоков, характерных для предприятий с мокрым технологическим режимом, на подстилающую грунтовую толщу [65, 158, 172, 173]. Интенсивность их влияния на грунты, в том числе изменение их фазового состава, определяется не столько объемными показателями сбросов промстоков, сколько спецификой технологических

процессов предприятий, определяющих их состав и продолжительность воздействия [35, 65, 32, 162].

4. Негативное преобразование грунтовой толщи, которое проявляется в изменении состава, состояния и физико-механических свойств песчано-глинистых отложений и носит необратимый характер воздействия.

Наибольшее негативное воздействие микроорганизмы оказывают на песчаные грунты и разности глинистых отложений. Образование биопленок на поверхности частиц водонасыщенных песков приводит к существенному снижению угла внутреннего трения φ, а при практически полном отсутствии сцепления *c* такие грунты постепенно приобретают свойства тяжелой жидкости, переходя в плывунное состояние (рисунок 1.17).

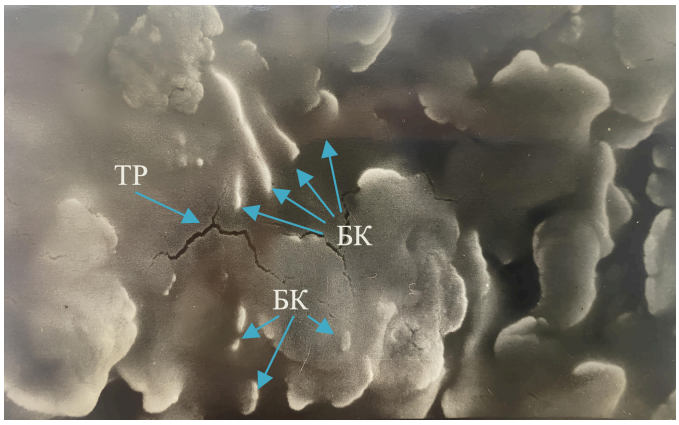


Рисунок 1.17 – Поверхность частиц моренных суглинков с биопленками, состоящих из живых и мертвых микроорганизмов, а также продуктов их метаболизма. Видны контуры бактериальных клеток (БК). Изображение получено О.В. Рыбальченко и Р.Э. Дашко на электронном микроскопе (увеличение ×4000). Трещины (ТР) в поверхностном слое частиц возникают в результате сканирования электронным лучом

Водо- и водогазонасыщенные тонкодисперсные грунты в таком случае необходимо рассматривать как квазипластичные разности. Особенно опасной является биохимическая генерация в порах грунта газов в форме твердых микроскопических пузырьков, которые, выполняя роль своеобразных «шарикоподшипников», способны снижать значение φ песков практически до нулевых значений. При расселении микроорганизмов по толще грунтов происходит увеличение содержания тонкодисперсной фракции, благодаря размеру бактериальных клеток (2-5 мкм), что сопоставимо с глинистыми частицами [34]. Рост дисперсности глинистых грунтов также может наблюдаться в присутствии иона аммония NH_4^+ (содержание которого характерно в том числе для коммунально-бытовых стоков), который благодаря своему крупному радиусу рассматривается как отрицательно-гидратирующий, способствующий диспергации [18].

Стоит отметить, что длительное воздействие микробной пораженности на глинистые грунты вызывает биохимическую деградацию глинистых минералов, приводящую к их аморфизации. Этот процесс развивается согласно механизму извлечения катионов (посредством выделения ферментов, слизи и др. веществ) Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} как металлов, участвующих в осуществлении важных функций клеток бактерий, из структуры кристаллической решетки тонкодисперсных частиц и их катионов, входящих в состав диффузионного облака.

5. Развитие процессов, включая биокоррозию. Процессы, развивающиеся в подземном пространстве, вызваны как деятельностью самих микроорганизмов, так и их метаболитами. Особое внимание должно быть уделено гетеротрофным анаэробным формам микроорганизмов, генерирующих биохимические газы. Депонирование и диссипация малорастворимых газов оказывает влияние на изменение НДС основания сооружений. Процесс биокоррозии конструкционных материалов протекает как за счет деятельности микроорганизмов, формирующих биопленки на подземных конструкциях, так и за счет метаболитов бактерий – газов, кислот, энзимов.

Достоверный анализ водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов с учетом трансформации их состава, состояния и свойств под воздействием природных и техногенных источников привноса органических и неорганических соединений абиотического и биотического генезиса должен базироваться на индивидуальном подходе с обязательным привлечением экспериментального (лабораторного и полевого) обоснования с учетом реальных условий взаимодействия системы «тонкодисперсные грунты основания – сооружение». Необходимо учитывать специфику привносимых соединений, включая их состав, литологические особенности грунтов, наличие в них структурных связей различной природы; значение также приобретает учет временного фактора.

1.7 Выводы по главе 1

1. Анализ существующих подходов к инженерно-геологической оценке глинистых грунтов показывает, что традиционные методы, основанные на определении физических характеристик (плотности, влажности, пористости) и классификации по числу пластичности I_P с использованием нижнего и верхнего пределов пластичности (W_L и W_P), не отражают реального поведения грунтов в условиях их естественного залегания. Рассмотрение водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложений должно осуществляться с комплексным учетом их многофазности, включая твердую, жидкую и газообразную составляющие. Для корректной оценки деформационной способности и прочности глинистых грунтов необходимо использование знаний о морфологии порового пространства с позиций не только абсолютной величины пористости и коэффициента пористости, но и размера пор, их формы и сообщаемости.

2. Глинистые грунты, составляющие бóльшую часть горных пород осадочного чехла, формируются в результате взаимодействия процессов химического выветривания, седиментации и последующего протекания литогенеза в различных геодинамических условиях. В стабильных платформенных областях (Русская плита Восточно-Европейской платформы) глинистые толщи сохраняются на больших глубинах, тогда как в тектонически активных зонах они претерпевают метаморфизм и преобразуются в разности аргиллитов, сланцев и др. Первичные глины образуются в корах химического выветривания при сочетании климатических, физико-химических и биохимических условий. Развитые толщи глинистых грунтов субаквальных обстановок осаждаются чаще в морских бассейнах, реже в озерных и лагунных.Глинистые грунты, составляющие бóльшую часть горных пород осадочного чехла, формируются в результате взаимодействия процессов химического выветривания, седиментации и последующего протекания литогенеза в различных геодинамических условиях. В стабильных платформенных областях (Русская плита Восточно-Европейской платформы) глинистые толщи сохраняются на больших глубинах, тогда как в тектонически активных зонах они претерпевают метаморфизм и преобразуются в разности аргиллитов, сланцев и др. Первичные глины образуются в корах химического выветривания при сочетании климатических, физико-химических и биохимических условий. Развитые толщи глинистых грунтов субаквальных обстановок осаждаются чаще в морских бассейнах, реже в озерных и лагунных.

3. Система энергетически-неоднородных активных центров, наиболее полно описанная в трудах Г.И. Дистлера, формируется за счет сложного кристаллохимического строения и высокой дисперсности глинистых минералов. Структурные дефекты различных порядков, а также изоморфные замещения определяют специфику центров, локализованных как на базальных, так и на торцевых гранях минералов. Подобные процессы приводят к нарушению электронейтральности и появлению избыточного заряда, распределенного по поверхности частиц. Минералы группы монтмориллонита проявляют наибольшую активность, в то время как минералы группы каолинита характеризуются более жесткой структурой кристаллической решетки и, соответственно, меньшей физико-химической активностью.

4. Комплекс физических, физико-химических и химических процессов предопределяет развитие структурных связей глинистых грунтов. Характер взаимодействия между частицами закономерно изменяется со степенью литификации – от дальнодействующих молекулярных и кулоновских сил в слаболитифицированных глинистых разностях до близкодействующих ионно-электростатических и химических связей в литифицированных глинах. При анализе структурных связей глинистых отложений необходимо оценивать роль органики, биогенных компонентов (в частности, кремнезем диатомовых водорослей) и цементирующего вещества, которые могут формировать жесткие структурные связи уже на стадиях диагенеза, препятствуя

гравитационному уплотнению в течение геологического времени и при сохранении высокой влажности грунтов.

5. Анализ состояния глинистых грунтов следует проводить в зависимости от выбора их модели, определяемой степенью литификации – тонкопористой для слаболитифицированных разностей или трещиновато-блочной для высоколитифицированных толщ. Вполне понятно, что данные модели дополняют друг друга. Прочность и деформационная способность глинистых грунтов определяются комплексом факторов, среди которых ключевое значение приобретают степень литификации, условия их формирования, структурно-текстурные особенности, характер и природа структурных связей, минеральный состав и др.

6. Проведение современного инженерно-геологического анализа глинистых грунтов как многофазных систем требует учета не только системы активных центров абиогенной природы (минералов), но и органической составляющей, включая микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности. Достоверная оценка водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов должна обязательно учитывать возможность трансформации их состава, состояния и физико-механических свойств под воздействием природных и техногенных источников поступления бактерий и их метаболитов.

Глава 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРОВОЙ ВОДЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ АБИОТИЧЕСКОГО И БИОТИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА ФАЗ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

2.1 Современные представления о структуре воды в объеме

Поровая вода представляет собой одну из основных фаз водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов, определяющей их состояние, физико-механические свойства и поведение при изменении напряженно-деформированного состояния толщи, протекания физико-химических, температурных и других процессов *in situ*. Вода в объеме обладает уникальными физическими свойствами, отличающимися аномальностью от ее родственных водородных соединений (H_2S, H_2Se, H_2Te). Свойства таких соединений водорода (температура замерзания и кипения, теплоемкость, вязкость и др.) изменяются закономерно, в то время как для воды характерны аномальные отклонения, которые объясняются образованием сетки водородных связей между молекулами.

Основополагающими исследованиями строения жидкой воды выступают работы Дж. Бернала и Р. Фаулера (с 1930-х г.), в которых была предложена тетраэдрическая модель ее структуры, базирующейся на анализе рентгеновских дифракционных данных. Согласно даным исследованиям, молекула воды имеет V-образную форму с углом HOH, составляющим 103-106°, который близок к тетраэдрическому углу (109,5°). Ключевым положением данной модели выступает тетраэдрическая координация молекул воды, при которой каждая молекула окружена четырьмя соседними, образуя относительно правильный тетраэдр. При этом радиус H_2O составляет примерно 1,4 Å (рисунок 2.1) [6, 122].

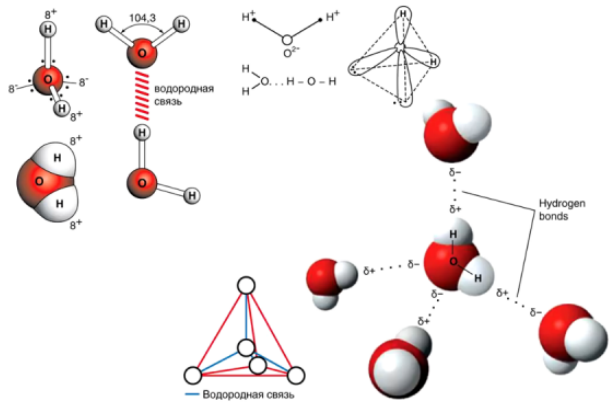


Рисунок 2.1 – Тетраэдрическое строение молекул воды (Pearson Education Inc., 2011)

В таких исследованиях было установлено, что в жидкой воде сохраняется ближний порядок, характерный для твердых тел, что позволило ввести понятие «жидкий кристалл». Распределение электронной плотности согласно тетраэдрическому строению определяется структурой расположения электрических зарядов, при этом две положительные и две отрицательные области ориентированы в пространстве с формированием вершин тетраэдра –

каждая молекула воды стремится взаимодействовать в среднем с четырьмя соседними молекулами, формируя тетраэдр [6, 122].

Между молекулами воды образуются направленные достаточно прочные межмолекулярные водородные связи, которые и объясняют существование ее аномальных свойств. Водородные связи формируются за счет взаимодействия положительно поляризованного атома водорода малого размера одной молекулы с ближайшими электроотрицательными атомами другой. Величина энергии большинства водородных связей, изучение которых продолжается и по сей день, варьирует в пределах 10-40 кДж/моль. Такое значение превышает энергию ван-дер-ваальсовых взаимодействий (около 10 кДж/моль), но ниже ковалентных и ионных связей (порядка 500 кДж/моль) [164]. Существуют водородные связи, обладающие и более высокой прочностью – до 160-170 кДж/моль [117].

Каждый атом кислорода с двумя атомами водорода способен участвовать в образовании четырех водородных связей. Две образуются за счет собственных атомов водорода, а еще две – через неподеленные электронные пары атома кислорода. Такая взаимодействие определяет уникальные свойства воды, включая аномально высокие температуры фазовых переходов, максимальную плотность при 4°С, высокую диэлектрическую проницаемость и др.

Единая строгая теория, позволяющая наиболее широко описать модель структуры жидкой воды, в настоящий момент отсутствует. Существующие модели строятся на эмпирической основе, сочетая экспериментальные данные с физическими, химическими, термодинамическими расчетами и рядом допущений. Углубленные исследования структуры воды начались в 40-х годах прошлого века и продолжаются и по сей день.

В 1946 г. О.Я. Самойловым была описана структура жидкой воды как клатратная модель, где в воде сохраняется подобный гексагональному льду каркас с водородными связями, пустоты которого частично заполнены мономерными молекулами воды. В 1959 г. Л. Полинг предположил, что основной структурой воды может служить сетка водородных связей в форме многогранников, присущая некоторым газовым гидратам.

Еще ранее С. Фрэнком и У. Уэном в 1957 г. предложена модель «мерцающих кластеров», доказывающая, что с помощью водородных связей между молекулами воды образуются «мерцающие» кластеры с временем пребывания в определенном центре равновесия 10^{-10}-10^{-11} с в общей массе свободных молекул воды (рисунок 2.2). Каждый кластер при этом содержит порядка 12-150 молекул воды, количество которых увеличивается прямо пропорционально с уменьшением температуры.

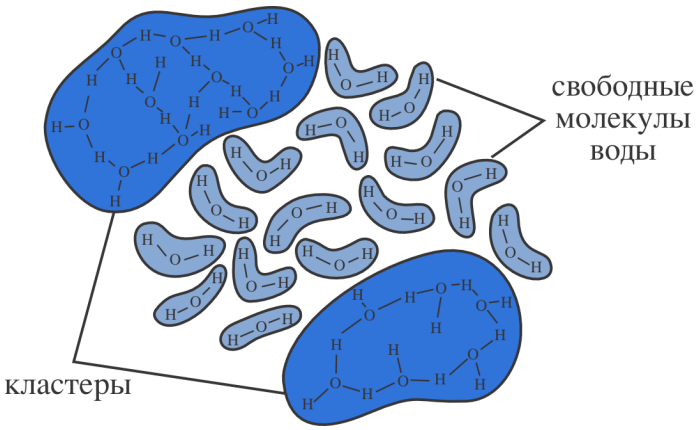


Рисунок 2.2 – Модель «мерцающих» кластеров С. Фрэнка и У. Уэна

К кластерным моделям также относится модель структуры воды Г. Немети и Х. Шераги (1962 г.), в которой предполагается, что вода состоит из областей льдоподобной ажурной тетраэдрической структуры, которые погружены в среду, состоящую из мономерных молекул воды с разорванными водородными связями.

В настоящее время также известны модели структурных смесей воды. Согласно этим моделям, в жидкой воде присутствуют области с различным типом упорядоченности (тетраэдрической, плотноупакованных и промежуточных структур). В рамках моделей смесей рассматривается существование нескольких типов кластеров, которые подразделяют на кластеры с высокой плотностью и кластеры с пониженной плотностью, характеризующиеся менее прочными межмолекулярными связями [176, 179].

Исследования, проводимые с использованием современного компьютерного моделирования, также объясняют аномальные свойства воды через особенности ее структурной организации – в том числе и тетраэдрическую координацию, хотя и с меньшей степенью упорядоченности, чем у твердого тела. Исследования показывают, что в жидкой воде наблюдается увеличение среднего числа ближайших «соседей» до пяти-шести при уменьшении количества водородных связей до 3,5 на молекулу и их время жизни порядка 10^{-11}-10^{-13} с. Установлено, что время существования водородных связей разделяется на продолжительное (10^{-12}-10^{-11} с) и короткое (10^{-14}-10^{-13} с) [134, 167]. Таким образом, перед образованием новой связи молекула воды успевает многократно (до нескольких десятков раз) изменить свою ориентацию относительно соседней по существующей связи молекулы [134, 167].

В настоящий момент известно, что молекулы воды способны формировать не только классические тетраэдрические, но и другие пространственные конфигурации, включая октаэдрические, додекаэдрические, икосаэдрические, гексаэдрические и др. структуры, в том числе и кольца, состоящие из различного числа водных молекул. Данные локальные структурированные молекулы воды с сильными связями погружены в сетку разупорядоченных кластеров, обладающих ослабленными водородными связями. Так, в работах 2006 г. изучалась

конденсация водяного пара, осаждающегося на пластинах Cu и Ag. При специально подобранных режимах конденсации визуализировалось образование гексамеров, состоящих из шести молекул воды (рисунок 2.3) [155]. Стоит подчеркнуть, что для полиэдрических фигур структуры воды также свойственна изменчивость.

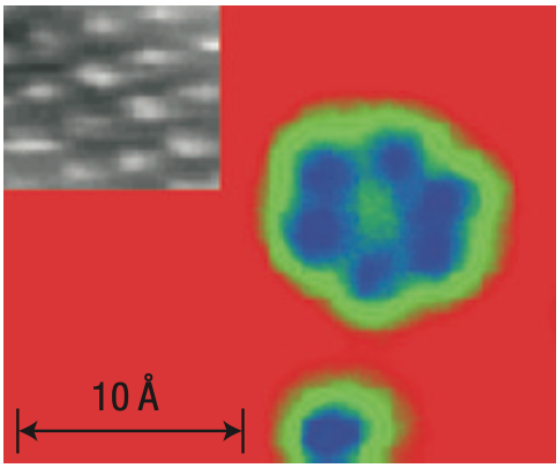


Рисунок 2.3 – STM-изображения кластеров адсорбированной воды в высоком разрешении (гексамер H_2O на плотноупакованных (111) поверхностях Cu) [155]

Стоит отметить существующую в научном сообществе точку зрения, согласно которой полное и исчерпывающее описание структуры воды в настоящее время не может быть выполнено в рамках современных методов исследования [134].

2.2 Теоретические и научно-практические положения изменения структуры свободной воды в растворах

Представленные выше исследования структурных особенностей воды справедливы при отсутствии в ней растворенных соединений. Однако в реальных условиях вода практически всегда содержит соли в различных формах (ионной, комплексной) в широком диапазоне их концентраций, что приводит к изменениям структурной организации воды. В связи с этим активное развитие получили исследования, направленные на изучение структуры воды при взаимодействии ее молекул с различными неорганическими и органическими соединениями.

Для понимания механизмов такого влияния необходимо рассмотреть представления Я.И. Френкеля (1947 г.) о природе твердого, жидкого и газообразного состояний веществ. Согласно концепции описания состояния вещества Я.И. Френкеля жидкое состояние отличается от твердого и газообразного. В твердых телах движение молекул ограничено колебательными и вращательными движениями вокруг временных положений равновесия в узлах квазикристаллической решетки. Для жидкостей характерны также скачкообразные перемещения между временными положениями равновесия – процесс самодиффузии, получивший название трансляционное движение. В ходе такого движения молекулы воды, выходя из временного равновесия, попадают в пустоты ее структуры и задерживаются там на время (примерно

10^{-11}-10^{-13} с), пока вновь не переходят в движение в виде скачкообразных перемещений. В газообразном состоянии трансляционное движение молекул усиливается, а закономерность их перемещения и пребывания во временных центрах равновесия нарушается, приобретая хаотичный характер.

Согласно трудам Ю.П. Сырникова (1967 г.), в жидкой воде необходимо рассматривать не менее четырех типов скачков молекул, что связано с существованием как минимум двух различных положений равновесия – в узлах льдоподобного каркаса и в его полостях. Соответственно, возможными становятся переходы молекулы воды из решетки каркаса в другой узел или в полость, а также из полости молекулы могут перейти в другую полость либо вернуться в узел решетки.

Таким образом, феномен трансляционного движения молекул воды в «жидком» кристалле может рассматриваться с позиций его подавления. Если наложение внешних физических полей способно затруднять или полностью останавливать такое движение молекул воды, то структурная организация водной среды может приобретать свойства, близкие к твердому телу, даже при положительных температурах.

Согласно работам О.Я. Самойлова на основе молекулярно-кинетического подхода к исследованию жидких растворов, все ионы по характеру их воздействия на подвижность и организацию структуры объемной воды можно разделить на два типа [92]:

1) отрицательно-гидратирующие ионы, характеризующиеся наименьшей плотностью заряда и притяжением электронов к ядру и, соответственно, обладающие наибольшим радиусом. К отрицательно-гидратирующим ионам можно отнести те, радиус которых превышает условный радиус тетраэдра, образованного молекулами воды. Одновалентные крупные ионы (K^+, Rb^+, Cs^+, NH_4^+, I^-) встраиваются в существующий каркас из молекул воды, разрушают и разрывают водородные связи, существующие в структуре, ускоряют обмен между соседними молекулами воды, тем самым создавая зоны повышенной молекулярной подвижности растворов электролитов;

2) в присутствии положительно-гидратирующих ионов наблюдается обратное действие. Малые и многозарядные ионы с наименьшим размером электронного облака и их диаметра – Na^+, H^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Al^{3+} – упрочняют ближайшие слои воды и укрепляют ее льдоподобную структуру, снижая частоту трансляционного движения и подвижность ее молекул.

Таким образом, переход между явлением отрицательной и положительной гидратации иона можно определить его радиусом. Такой границе отвечают гипотетические ионы с радиусами ~1,1 Å, при таком размере они не оказывают существенного влияния на структуру водного раствора [88].

Классификация ионов и молекул по их влиянию на структуру различных веществ традиционно основывается на ряду Ф. Гофмейстера (Hofmeister series), впервые предложенном в 1888 г., работы которого были направлены на изучение явлений осаждения белков и некоторых других веществ в растворах солей [139, 159].

Такой ряд ранжирует вещества по их способности стабилизировать или разупрочнять структуру воды и биомолекул (например, белков) и разделен на ионы-космотропы, с высокой плотностью заряда (по аналогии с положительно-гидратирующими) и ионы-хаотропы, с размытым зарядом (отрицательно-гидратирующие) [129, 139]. В современных исследованиях ряд Хофмейстера применяется для прогнозирования поведения растворов в биохимии, фармацевтике, материаловедении. В инженерной геологии такое разделение применяется в теоретических и практических целях с точки зрения способности ионов к агрегации либо диспергации грунтов в водной среде.

Характер структурных преобразований воды в растворах электролитов определяется сложным взаимодействием нескольких факторов. Важную роль играет не только природа отдельных ионов, но и их комбинация в системе, а также концентрация растворов. В разбавленных растворах всегда имеются молекулы воды, не связанные с ионами, при этом при достижении определенных концентраций в растворе (различных для разнообразных солей) может наблюдаться практически полная трансформация структуры, в результате которой среда приобретает свойства, присущие кристаллогидратам (молекулы воды располагаются среди ионов, образующих структуру соли).

2.3 Основные положения явления ядерного магнитного резонанса

Начиная с середины XX в. одним из основных инструментов для проведения исследований структур жидких и твердых тел и получения наиболее объективных и информативных данных о них стал метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Он основан на явлении резонансного поглощения радиочастотной электромагнитной энергии ядрами с ненулевым спином во внешнем магнитном поле с переориентацией магнитных моментов ядер [127]. Ядерный магнитный момент возникает благодаря наличию у атомного ядра ненулевого спина *I*. Соответственно, методы ЯМР применимы к таким ядрам, как ^{1}H, ^{2}D, ^{19}F, ^{13}C и др. Ядра с нулевым спином (например изотоп ^{12}C, где число протонов и нейтронов четное) не дают сигнала ЯМР.

Спин определяется внутренними моментами протонов и нейтронов, составляющих ядро. Магнитный момент μ «вращающегося» ядра выражается следующим соотношением [127]:

$$\mu = \gamma \cdot h \cdot I, \qquad (2.1)$$

где h – постоянная Планка;

γ – гиромагнитное отношение (характеризует связь магнитного момента с моментом импульса).

В постоянном магнитном поле напряженностью B_0 энергия магнитного момента определяется скалярным произведением:

$$E = -(\mu \cdot B_0) = -\mu \cdot B_0 \cdot \cos\theta, \quad (2.2)$$

где θ – угол между векторами μ и B_0 (рисунок 2.4).

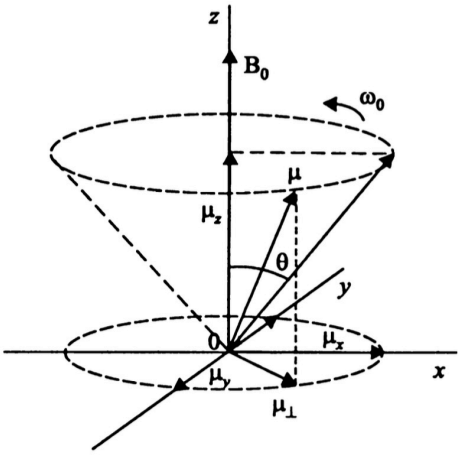


Рисунок 2.4 – Конус ядерного спина, прецессирующего с частотой Лармора $\omega_0 = \gamma B_0$ (собственной частоты прецессии магнитного момента частицы) [127]

Явление ЯМР возникает при воздействии на ядро, помещенное в постоянное магнитное поле B_0, переменным электромагнитным полем резонансной частоты $\nu_0 = \Delta E/h$, где ΔE – разность энергий между уровнями (ν_0 для протонов ^{1}H в магнитном поле 1 Тл составляет 42,58 МГц). Согласно квантовому характеру спина, для ядра с I существует значение $2I+1$ возможных проекций спина на ось квантования m_z (квантовых состояний) от $-I$ до $+I$. Так, для протона ^{1}H возможны два состояния (энергетических уровней): $m_z = \pm 1/2$ (рисунок 2.5). Согласно положениям квантовой теории, разрешены энергетические переходы между расщепленными уровнями с изменением проекции спина только $\Delta m_z = \pm 1$.

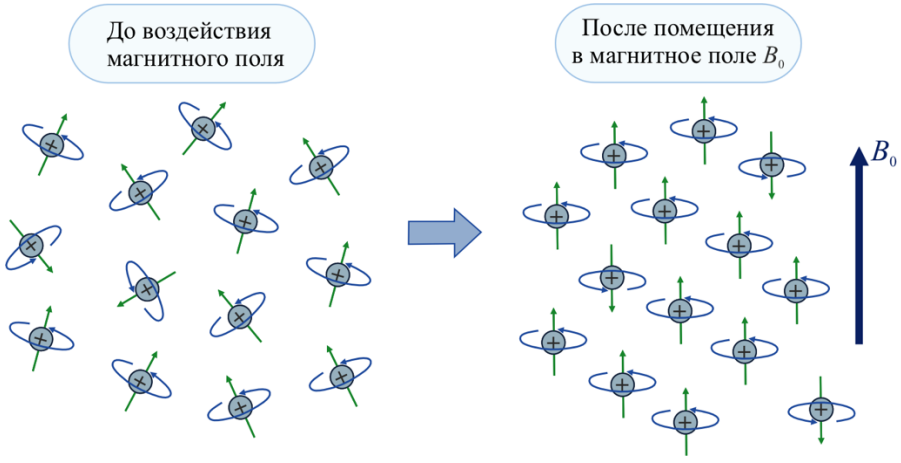


Рисунок 2.5 – Ориентация магнитных моментов μ ядер до и после наложения внешнего магнитного поля B_0 (составлено автором на основе [127])

Энергетически более выгодным является состояние, при котором компонента магнитного момента ядра ориентирована параллельно направлению внешнего магнитного поля напряженностью B_0. Напротив, антипараллельная ориентация магнитного момента соответствует возбужденному энергетическому состоянию с более высокой энергией.

При наложении радиочастотного импульса с частотой, соответствующей резонансному условию, возможны переходы протонов между этими энергетическими уровнями. Поглощение кванта электромагнитного излучения приводит к вынужденному (индуцированному) переходу ядра с нижнего энергетического уровня (параллельная ориентация) на верхний уровень (антипараллельная ориентация). Обратный переход сопровождается излучением энергии, регистрируемой как ЯМР-сигнал с формированием спектра сигнала.

Спектроскопия ЯМР представляет собой метод, направленный на исследование молекулярной структуры веществ, тогда как ЯМР-релаксация в первую очередь позволяет изучать состояние веществ, их динамические характеристики и молекулярную подвижность на основе анализа времен релаксации ядерной намагниченности (T_1 и T_2) и коэффициентов самодиффузии.

Одна из возможностей метода ЯМР заключается в определении параметров времен релаксации среды: спин-решетчатой T_1 и спин-спиновой T_2 ядер ^{1}H – скорости обмена энергией между спиновой системой и решеткой. Структурные изменения воды определяют уменьшение времен T_1 и T_2. Стоит отметить, что данный метод способен регистрировать даже весьма слабые молекулярные взаимодействия.

Состояния всех ядер формируют единый ансамбль спинов. Суммарная макроскопическая намагниченность M представляет сумму всех индивидуальных магнитных моментов спинов, помещенных во внешнее магнитное поле B_0 [127]:

$$\vec{M} = \sum_k \vec{\mu}_k \tag{2.3}$$

Как уже было сказано выше, в состоянии термодинамического равновесия большинство ядерных спинов занимают энергетически выгодное положение с ориентацией магнитных моментов параллельно внешнему магнитному полю B_0.

Следовательно, наблюдается формирование равновесной намагниченности M_0, также направленной вдоль оси приложенного поля.

Воздействие на систему радиочастотных импульсов B_1, ориентированных перпендикулярно B_0, приводит к отклонению вектора суммарной намагниченности на заданный угол θ. Величина θ при этом определяется параметрами импульса [127]:

$$\theta = \gamma \cdot B_1 \cdot \tau, \tag{2.4}$$

где τ – длительность прикладываемого импульса.

Особое значение имеют 90° и 180° радиочастотные (РЧ) импульсы. Импульс π/2 (угол поворота 90°) переводит макроскопическую намагниченность в плоскость xy, перпендикулярную направлению основного поля B_0 (рисунок 2.6).

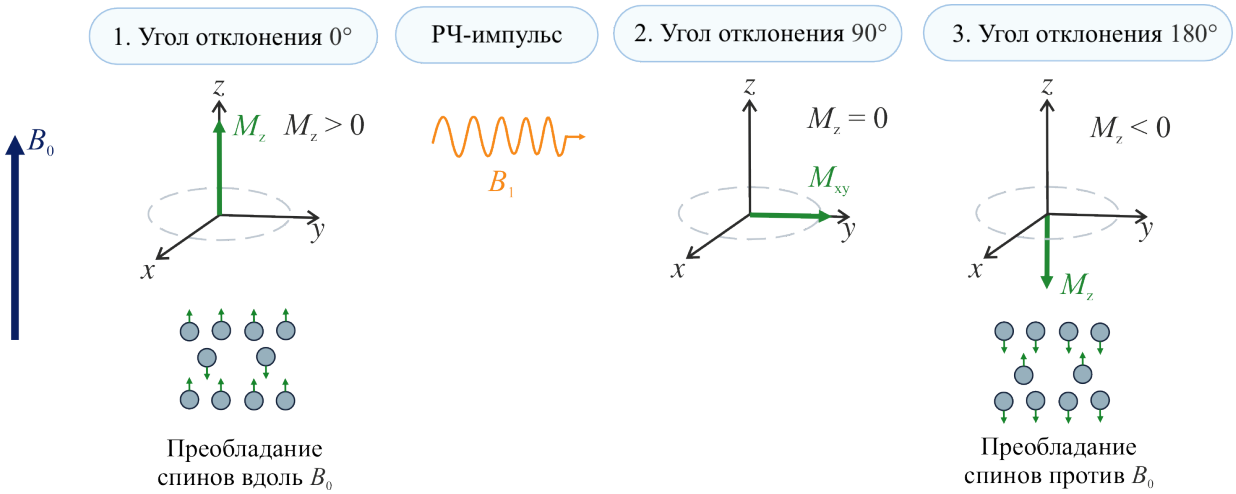


Рисунок 2.6 – Схема положения суммарного вектора намагниченности M в результате приложения 90° и 180° РЧ импульсов (составлено автором на основе [127])

После прекращения действия радиочастотного импульса суммарный вектор намагниченности M начинает релаксировать к исходному равновесному состоянию путем:

– восстановления продольной компоненты намагниченности M_z с характерным временем T_1;

– затухания поперечной компоненты M_{xy} – временем поперечной релаксации T_2.

Затухание поперечной намагниченности M_{xy} происходит неравномерно вследствие дефазировки элементарных магнитных моментов μ. Такой процесс сопровождается обменом энергией между спинами, поэтому время T_2 носит название спин-спиновая релаксация. Параллельно происходит восстановление продольной намагниченности M_z со временем спин-решетчатой релаксации T_1 – энергия спинов рассеивается в другие степени свободы вещества через взаимодействие с «решеткой». В анализе проведенных исследований будет в основном использоваться параметр T_1.

Эксперименты, проведенные с помощью ЯМР, впервые позволили утверждать, что молекулы воды вокруг ионов, характеризующихся положительной гидратацией, обмениваются быстрее, чем в объемной воде.

Подтверждением описанных структурных изменений в водных растворах электролитов служат результаты исследований В.И. Чижика, выполненных на физическом факультете Ленинградского государственного университета в середине 1960-х г. на релаксометре ЭХО-4. В ходе экспериментов с водными растворами перхлоратов (ClO_4^-) различной концентрации катионов методом ЯМР были получены данные о структуре молекул воды, характеризующиеся различными временами спин-решетчатой релаксации T_1 (рисунок 2.7) [108]. Анионы ClO_4^- не

обладают способностью изменять структуры воды, поэтому результаты исследований солей показывают только влияние катионов.

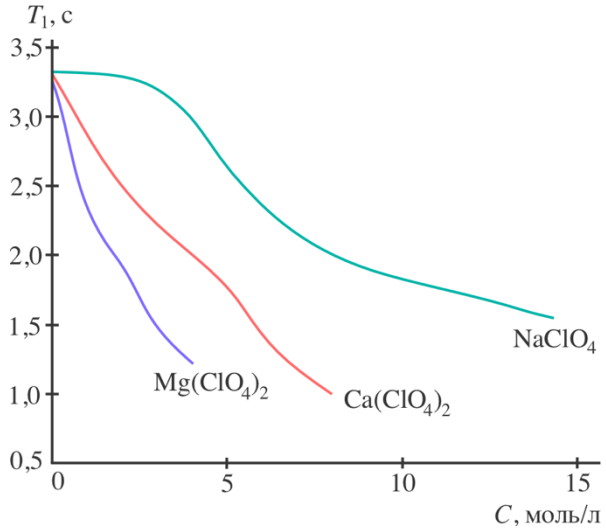


Рисунок 2.7 – Зависимость времени спин-решетчатой релаксации протонов поровой воды T_1 в растворах перхлоратов щелочных и щелочноземельных элементов от их концентрации [108]

Экспериментально установлено, что для дистиллированной воды величина параметра T_1 составляет 2,5 с, тогда как для полностью дегазированной – 3,5 с. Анализ представленных данных на рисунке 2.7 позволяет оценить различную степень структурированности молекул воды в зависимости от различных растворов перхлоратов щелочных и щелочноземельных элементов при их концентрации примерно 4 моль/л. Растворы перхлората натрия показывают наименьшее снижение параметра T_1, тогда как соли кальция приводят к более существенному уменьшению данного показателя вплоть до 2 с. Наиболее значимое влияние ионов натрия на структурное состояние раствора начинает проявляться только при концентрациях свыше 5 моль/л. В интервале от 5 до 15 моль/л наблюдается закономерность к увеличению степени структурированности водного раствора, которая при C = 15 моль/л возрастает приблизительно в три раза по сравнению с чистой дегазированной водой. Значение T_1 водных растворов щелочноземельного металла Mg^{2+} снижается более чем в 3 раза по сравнению с объемной водой и составляет примерно 1 с уже при относительно невысоких концентрациях.

В 1980-х г. на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета Р.Э. Дашко под руководством В.И. Чижика была проведена серия исследований структурных особенностей хлоридных растворов электролитов с различными катионами, включая отрицательно-гидратирующие (рисунок 2.8). Стоит отметить, что хлориды также не оказывают существенного влияния на структуру объемной воды. Работы выполнялись на релаксометре ЭХО-4 в диапазоне концентраций от 0 до 4 моль/л.

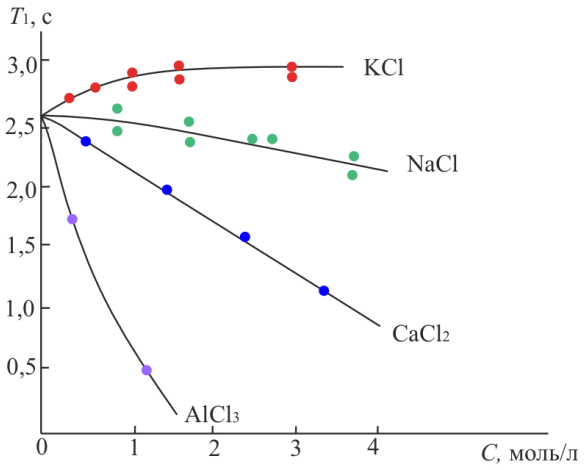


Рисунок 2.8 – Зависимость времени спин-решетчатой релаксации протонов поровой воды T_1 в растворах солей от их концентрации C [35]

Анализируя график, представленный на рисунке 2.8, можно отметить, что самое незначительное снижение параметра T_1 наблюдается для растворов NaCl, что хорошо согласуется с данными на рисунке 2.7 при идентичных концентрациях. В небольших концентрациях ион Na^+ проявляет диспергирующие свойства. Анализ структурирования водного раствора при постепенном повышении концентраций в присутствии двухвалентного катиона Ca^{2+} также выявляет закономерности, схожие с описанными выше на рисунке 2.7. Наибольший интерес с точки зрения активности ионов представляют трехвалентный катион Al^{3+} и одновалентный K^+, который обладает способностью к отрицательной гидратации. Наиболее существенное уменьшение T_1 вплоть до 0,5 с и, соответственно, наибольшая структурированность молекул воды вблизи иона наблюдались в растворах в присутствии алюминия даже при сравнительно небольших концентрациях C = 1 моль/л. В свою очередь, некоторое увеличение параметра T_1 уже при небольших концентрациях C > 0,2-0,3 моль/л наблюдалось в растворах KCl. Это свидетельствует о повышении подвижности молекул воды вблизи иона K^+ и, соответственно, о его свойствах как отрицательно-гидратирующего.

Современные исследования, проведенные в XXI в., также подтверждают вышеописанные данные о преобразовании структуры воды в растворах электролитов [129, 157].

Метод ЯМР представляет возможности для количественной оценки и характеристики процессов гидратации – взаимодействий катионов с молекулами воды, приводящих к образованию гидратных оболочек. При проведении экспериментов с помощью ЯМР можно определить следующие параметры: силу связи определенного иона с гидратной оболочкой, число молекул, связанных с ионом, координацию, подвижность и время жизни молекул воды вокруг иона. Такое явление возникает благодаря силам, возникающим между заряженными частицами и полярными молекулами воды – ион-дипольного взаимодействия. Диполи воды ориентируются электрическим полем, создающегося катионами и анионами. При этом положительно

заряженные ионы (катионы) способны притягивать отрицательные части молекул воды (атомы кислорода), а, соответственно, отрицательно заряженные (анионы) – положительные (атомы водорода).

Проведенные В.И. Чижиком экспериментальные исследования методом ЯМР и выполнение последующих аналитических расчетов позволили выявить координацию молекул воды в гидратных оболочках различных ионов. Установление таких закономерностей также выполнялось на водных растворах ClO_4^- различного катионного и анионного составов [108]. Понимание степени и характера гидратации ионов имеет принципиальное значение для анализа целого ряда процессов в дисперсных грунтах. К таким процессам в первую очередь следует относить формирование диффузного ионного облака вокруг тонкодисперсных частиц и связанный с ним процесс ионного обмена. Образование диффузного облака диктует особенности физико-химических процессов, протекающих в тонкодисперсных грунтах.

Ионы Na^+ и Ca^{2+} обладают двухслойной структурой гидратации. Для названных катионов первый гидратационный слой содержит шесть молекул воды, а второй – двенадцать. При этом в случае Na^+ подвижность молекул воды в первом слое оказывается ниже, чем в чистой воде, тогда как во втором слое – выше, что может указывать на меньшую прочность его структуры по сравнению с тетраэдрической координацией структуры объемной воды.

Для иона Ca^{2+} характерны несколько иные закономерности. Подвижность молекул воды в обоих гидратационных слоях оказывается ниже, чем в объемной воде. Для иона Mg^{2+} предполагается наличие трех гидратационных слоев. При этом первый слой включает шесть молекул воды, второй – двенадцать, а третий – тридцать шесть. При этом все три слоя характеризуются пониженной подвижностью по сравнению с чистой водой.

Ион K^+ образует двухслойную гидратную оболочку. В первом слое подвижность молекул воды сопоставима с чистой водой, тогда как во втором слое она повышается. Среди одновалентных катионов наибольшей прочностью гидратной оболочки отличается Li^+. Молекулы воды также координируются вокруг одновалентных анионы, но практически не изменяются в подвижности по сравнению с водой в объеме (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Координационные числа одно- и двухвалентных ионов [108]

Ион	Число молекул в гидратационных слоях			
	в первом	во втором	в третьем	общее
Одновалентные ионы				
Li^+	4	-	-	4
Na^+	6	12	-	18
NH_4^+	4	-	-	4
F^-	4	-	-	4
Cl^-	4	-	-	4
Br^-	4	-	-	4
NO_3^-	6	-	-	6

Продолжение таблицы 2.1

Ион	Число молекул в гидратационных слоях			
	в первом	во втором	в третьем	общее
Двухвалентные ионы				
Mg^{2+}	6	12	36	54
Ca^{2+}	6	12	-	18
Sr^{2+}	8	16	-	24
Ba^{2+}	12	24	-	36

Представленные данные исследований позволяют выстроить следующие ряды ионов по степени их воздействия на снижение подвижности молекул воды:

$$ClO_4^- < NO_3^- < Br^- < Cl^- < F^-$$

$$NH_4^+ < K^+ < Na^+ < Li^+$$

$$Ba^{2+} < Sr^{2+} < Ca^{2+} < Mg^{2+}$$

Современные исследования ионов щелочных металлов, проведенные с помощью метода ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля, подтверждают гидратированность различных катионов в зависимости от их ионного радиуса R_{ion}. Установлено, что динамический радиус r_s (параметр, учитывающий размер иона вместе с его гидратной оболочкой при диффузии в растворе) характеризуется максимальным значением для катиона Li^+ с наименьшим ионным радиусом и составляет $3{,}4 \cdot 10^{-7}$ мм, что превышает показатель r_s других ионов: для Na^+ значение r_s составляет $2{,}4 \cdot 10^{-7}$ мм, Cs+ – $1{,}7 \cdot 10^{-7}$ мм (рисунок 2.9) [142].

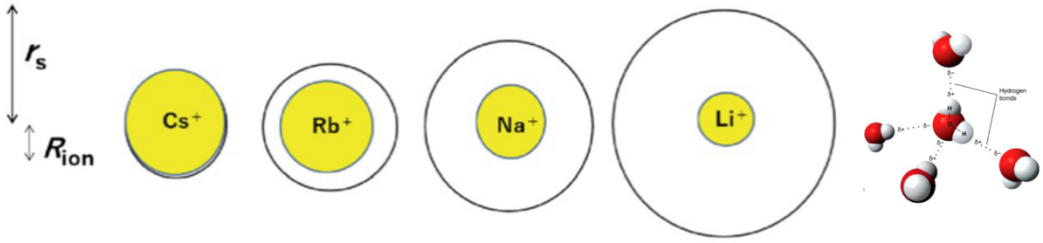


Рисунок 2.9 – Соотношения между динамическим r_s и статическим R_{ion} ионным радиусом для щелочных металлов в водных растворах [142]

Следует отметить, что время равновесного существования гидратной оболочки напрямую зависит от природы иона. При этом данный параметр характеризуется как значительный для небольших многозарядных ионов (Al^{3+}), но достаточно короткое для крупных однозарядных (K^+).

В совместном присутствии в растворе ионов с различающейся способностью к гидратации структура системы будет определяться преимущественно теми ионами, которые обладают способностью к формированию наиболее устойчивых гидратных комплексов.

Приведенные исследования структурных особенностей воды справедливы для воды в объеме и растворов различной концентрации. В водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах наблюдаются иные закономерности структурирования поровой воды; данный процесс

необходимо рассматривать в микрообъемах порового пространства. Ключевым фактором формирования структуры жидкой фазы грунтов выступают активные центры различных фаз абиотического и биотического генезиса, прежде всего поверхности тонкодисперсных твердых частиц. Как уже было проанализировано ранее, микроорганизмы и продукты их метаболизма также обладают развитой системой активных центров.

2.4 Изменение структуры поровой воды под воздействием активных центров твердой поверхности

На основании наиболее полных классификаций А.Ф. Лебедева, Е.М. Сергеева и др. в практике грунтоведения, инженерной геологии, гидрогеологии и др. смежных наук поровые воды в грунтах и породах были разделены на находящиеся в свободном состоянии, физически связанном, химически связанном, твердообразном и парообразном (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Виды воды в глинистых грунтах [80]

Виды воды в глинистых грунтах	Разновидности	Состояние
Свободная	Вода грунтового потока	Заполняет открытые поры
	Иммобилизованная	Изолирована в замкнутых порах
Физически связанная	Адсорбционная	Адсорбирована на минеральной поверхности
	Вода гидратированных ионов	Связана ионами диффузной части двойного электрического слоя частиц
Химически связанная	Конституционная	Входит в кристаллическую структуру минералов
	Кристаллизационная	Входит в структуру кристаллогидратов

Согласно представлениям о состоянии и свойствам жидкой фазы в глинистых грунтах, учитывают не только ту, которая подчиняется законам гравитации, но и воду, находящуюся под воздействием поверхностных сил минеральных частиц и ионов солей с образованием мицеллы (рисунок 2.10).

Сорбция воды вокруг минеральных частиц в глинистых грунтах может быть объяснена формированием двойного электрического слоя (ДЭС), возникающего на границе раздела фаз «тонкодисперсная частица – вода», и существования определенной концентрации ионов-компенсаторов заряда глинистого минерала, что приводит к образованию гидратированных слоев [80, 170]. Считается, что за пределами гидратных оболочек, образующих мицеллу, находится свободная вода. При этом возникает дзета-потенциал ζ – разность потенциалов между слоем неподвижных ионов и свободной водой, который необходимо учитывать при изучении физико-химической активности грунтов [68, 80].

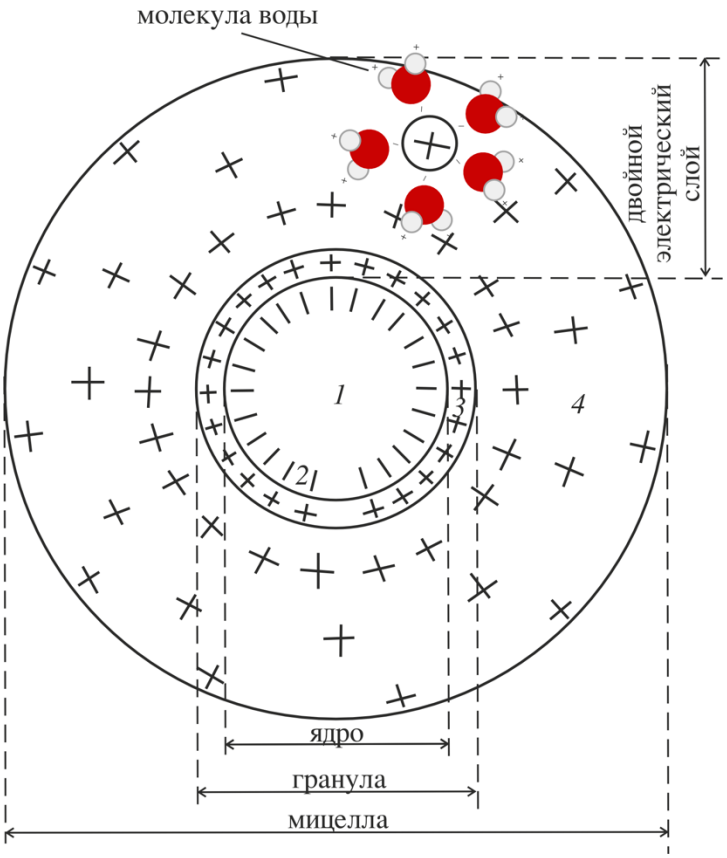


Рисунок 2.10 – Схема строения мицеллы, образованной тонкодисперсной частицей: 1 – тонкодисперсная частица, образующая ядро мицеллы; 2 – отрицательные заряды потенциалопределяющих ионов; 3 – неподвижный слой гидратированных ионов – компенсирующих ионов, образующих совместно с ядром гранулу мицеллы; 4 – диффузный слой гидратированных ионов [68]

Молекулы воды в таких условиях переходят в адсорбированное состояние, формируя слой физически связанной воды, свойства которой отличны от свободной воды. Адсорбированная вода удерживается на поверхности минералов за счет ион-дипольных, диполь-дипольных взаимодействий и формирования водородных связей [80]. В инженерной геологии принято считать, что слой воды, непосредственно прилегающий к поверхности частицы, характеризуется как прочносвязанный, в то время как рыхлосвязанная вода образована гидратацией ионов диффузного слоя за счет сил ион-дипольного взаимодействия [156]. Следует подчеркнуть, что содержание физически связанной воды в грунтах находится в прямой зависимости от минерального состава глинистой фракции и природы обменных катионов. Наибольшее количество адсорбированной воды и воды гидратированных ионов имеют монтмориллонитовые глины, особенно их натриевые формы, при которых диффузный слой с обменным Na^+ характеризуется наибольшей толщиной [57].

Согласно современным представлениям инженерной геологии, максимальное содержание физически связанной воды (включающей как прочносвязанные, так и рыхлосвязанные формы) в

глинистых грунтах соответствует значению максимальной молекулярной влагоемкости $W_{мм}$, введенной А.Ф. Лебедевым в 1936 г. [28, 66]. Для определения $W_{мм}$ А.Ф. Лебедевым были предложены метод центрифугирования, основанные на удалении гравитационной воды из образца за счет центробежных сил, замененный на метод влагоемких сред, при котором поровая вода тонкого слоя глинистой пасты (2 мм) удаляется через фильтровальную бумагу под давлением 65,5 кгс/см^2 [28, 66]. Эквивалентом такого давления служит усилие, развиваемое при центробежном удалении воды. В практике инженерной геологии считается, что $W_{мм}$ близок к пределу раскатывания глинистых грунтов W_P. Такие показатели предлагаются как критерии наличия/отсутствия свободной воды в глинистых грунтах, согласно которым объемная вода существует только в тех грунтах, в которых естественная влажность W_e превышает $W_{мм}$ или W_P.

Экспериментальные исследования изменения структуры воды под воздействием физических полей твердой поверхности начали проводиться с середины XX в. в области физики и физико-химии дисперсных систем. Исследования в области поверхностных явлений на кварцевых подложках проведены, начиная с 1950-х г. Б.В. Дерягиным, Н.В. Чураевым и др. [49, 50, 109]. По данным таких исследований, резкое изменение структуры воды вблизи поверхности кварца происходит на расстоянии до 0,008-0,01 мкм.

В 1955 г. Б.В. Дерягиным и З.М. Зориным было экспериментально установлено, что вода и другие полярные жидкости способны формировать полимолекулярные адсорбционные слои на гидрофильных поверхностях стекла [49]. Последующие исследования Р.М. Пэшли и Дж.А. Китченера, воспроизводивших подобные эксперименты, выявили зависимость толщины образующихся полимолекулярных водных пленок от степени очистки и, соответственно, гидрофильности кварцевой поверхности [165]. Показано, что более тщательно очищенные поверхности кварца обеспечивают образование более развитых полимолекулярных слоев воды за счет освобождения активных центров.

Б.В. Дерягиным с помощью системы «кварцевая подложка – вода» экспериментально установлена высокая чувствительность толщины полимолекулярных адсорбционных слоев h от температуры t, °C (рисунок 2.11).

Доказано, что с ростом температуры наблюдается разрушение упорядоченной структуры граничных слоев воды и, соответственно, уменьшение толщины водных пленок, что, по мнению автора, связано с деструкцией сетки водородных связей вблизи поверхности кварца. Согласно рисунку 2.11, такой процесс наиболее интенсивно протекает при температурах, превышающих 55°C, при которой вода теряет свое квазикристаллическое строение.

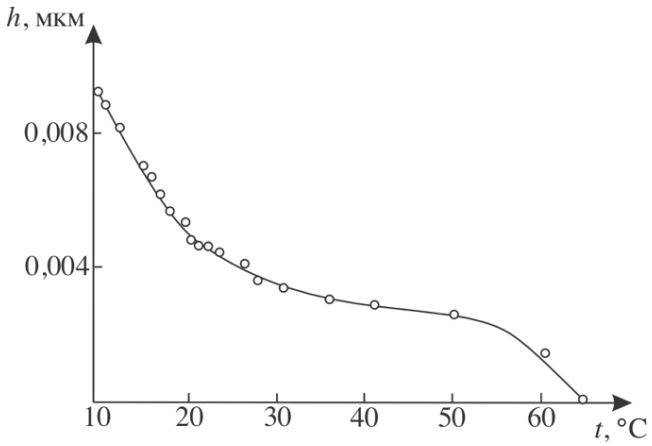


Рисунок 2.11 – Зависимость толщины полимолекулярных адсорбционных слоев *h* от температуры *t*, °С [49]

Наиболее информативными в данной области выступают экспериментальные исследования течения воды в кварцевых капиллярах различного радиуса, позволяющие выявить свойства воды вблизи раздела фаз «кварцевая подложка – вода». Наблюдается возрастание вязкости воды по сравнению с водой в объеме, вызванное трансформацией ее структуры под влиянием поверхностных эффектов в тонких кварцевых капиллярах высокой чистоты, обладающих молекулярно-гладкой поверхностью и строго цилиндрической формой радиуса *r* от сотых долей микрометра при длине до нескольких метров. В экспериментальных исследованиях проводилась сравнительная оценка изменения вязкости η полярной и аполярной жидкостей в сравнении с вязкостью воды в объеме η_0 в зависимости от радиуса *r* капилляров (рисунок 2.12). Для расчета η использовалось уравнение Пуазейля.

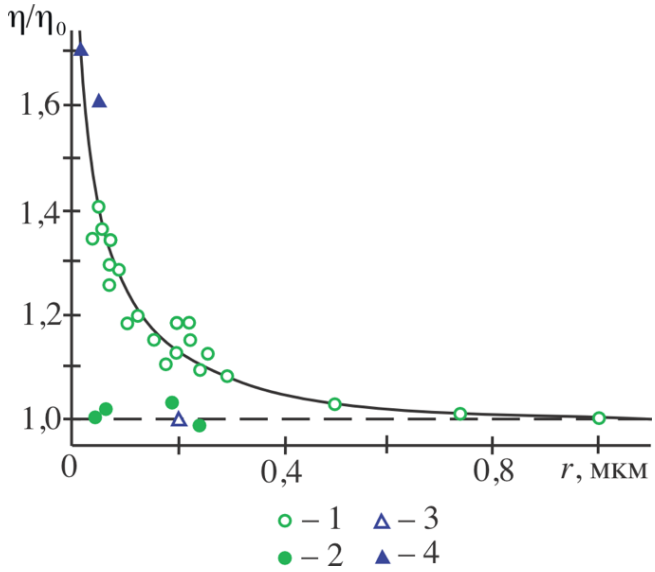


Рисунок 2.12 – Изменение относительной вязкости η/η_0 воды (1), бензола (2) и CCl_4 (3) от радиуса кварцевых капилляров; 4 – данные З.М. Товбиной для воды в порах силикагеля [49]

Кроме того, было выполнено изучение изменения относительной вязкости η/η_0 воды и аполярных жидкостей в зависимости от температуры *t*, °С (рисунок 2.13).

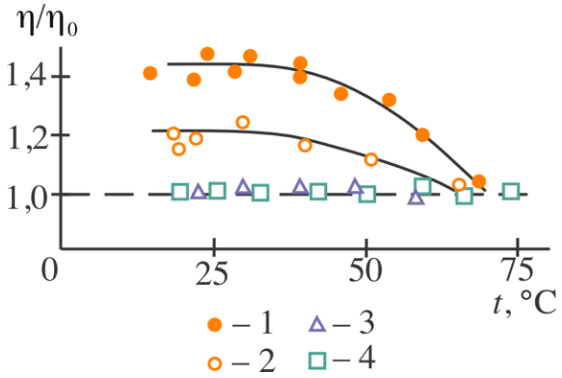


Рисунок 2.13 – Изменение относительной вязкости η/η_0 воды, бензола (3) и CCl_4 (4) в капиллярах радиусом r = 0,05 (1) и 0,17 мкм (2) от температуры *t*, °С [49]

Анализируя рисунок 2.12, можно отметить различие в поведении полярных и неполярных жидкостей в тонких кварцевых капиллярах.

Так, для структурированной воды в капиллярах с радиусом менее 0,5 мкм относительная вязкость η/η_0 превышает единицу, при этом параметр η/η_0 остается постоянным, характерным для объемного состояния, для неполярных жидкостей (бензол, CCl_4). Таким образом, можно сделать вывод о том, что радиус 0,5 мкм соответствует радиусу сферы влияния активных центров кварца. Можно предположить, что на поверхности природного кварца влияние активных центров будет снижено как по радиусу их действия, так и по количеству их содержания.

Необходимо остановиться на экспериментальных данных, полученных З.М. Товбиной для пор силикагеля (рисунок 2.12). Несмотря на то, что их радиус (0,05-0,1 мкм) сопоставим с радиусом тонких кварцевых капилляров, значение относительной вязкости η/η_0 повышается до 1,6-1,7. Для кварца такое соотношение не превышает 1,4. Подобное расхождение может быть объяснено природой самого материала: силикагель представляет собой аморфный гидрофильный кремнезем с высокой сорбционной способностью, что определяет его усиленное преобразующее влияние на структуру воды. К природным аморфным минералам, для которых устанавливаются подобные эффекты, относится кремнезем биогенного (микроводоросли) и вулканического (вулканическое стекло) происхождения.

Анализ зависимости η/η_0 от температуры показывает, что:

– при повышении температуры различия в вязкости структурированной и свободной воды постепенно уменьшаются;

– при достижении температуры ~70°С, когда толщина адсорбированных слоев воды сокращается до монослоя, ее вязкость соответствует объемным значениям даже в очень тонких капиллярах;

– максимальное увеличение вязкости (порядка 35-40%) наблюдается в капиллярах *r* = 0,03-0,05 мкм (при проведении опытов при *t* = 20°С).

Стоит отметить, что по результатам вышеуказанных исследований был сделан вывод о том, что влияние твердой поверхности на структуру слоев воды не ограничивается одним-двумя молекулярными слоями, а распространяется на расстояния до 0,8 мкм [49]. Такое явление особенно выражено в случае высокогидрофильных поверхностей и усиливается при понижении температуры. Было высказано предположение о том, что структура и свойства слоев воды определяются пространственным характером распределения активных центров на твердой поверхности.

Кварцевые подложки, благодаря относительно простому кристаллохимическому строению SiO_2, характеризуются и относительно низкой плотностью активных центров на поверхности. В отличие от них, алюмосиликатные минералы (полевые шпаты – ортоклаз, $KAlSi_3O_8$, слюды – мусковит, $KAl_2(OH)_2[AlSi_3O_{10}]$) определяются бóльшим количеством активных центров. Наиболее сложным строением и максимальным числом активных центров обладают, как уже было сказано ранее, глинистые минералы – слоистые алюмосиликаты [150]. Характеристика групп глинистых минералов была приведена ранее в разделе 1.3.

Особый вклад в изучение свойств структурирования воды на твердой поверхности слоистых алюмосиликатов внесла Иркутская научная школа М.С. Мецика, проводившая экспериментальные исследования в 1970-х г. на пластинах свежерасщепленных слюд в условиях изменения состояния их поверхности и, соответственно, преобразования, многообразия, активности, количества и радиуса действия энергетических центров. Анализ таких работ особо важен, так как слюды характеризуются наибольшим сходством с кристаллохимическим строением глинистых частиц среди всех групп минералов, в частности, алюмосиликатов.

Экспериментальные данные по измерению диэлектрической проницаемости воды $\varepsilon_в$ в тонких адсорбированных слоях между слюдяными пластинками выявляют зависимость показателя $\varepsilon_в$ от толщины пленки воды h (рисунок 2.14, а) [75, 140, 153].

При уменьшении h с 2 до 0,07 мкм значение $\varepsilon_в$ снижается от 80 (характерного для воды в объеме) до значения 4,5. Такое снижение $\varepsilon_в$ свидетельствует об изменении структуры воды в тонких слоях между пластинками слюды в сторону следующих процессов:

– молекулы воды теряют свободу трансляционного движения;

– происходит ограничение вращательной подвижности молекул воды вокруг своей оси.

Экспериментальные исследования показали, что теплопроводность λ тонких структурированных водных пленок толщиной примерно 0,1 мкм на свежесколотых поверхностях слюды достигает высоких значений – порядка 60 Вт/м· град, что сопоставимо с теплопроводностью некоторых металлов (рисунок 2.14, б). Примечательно, что промывка свежесколотой поверхности слюды кипящей водой приводит к значительному снижению теплопроводности до значений, характерных для объемной воды $\lambda = 0{,}6$ Вт/м·град.

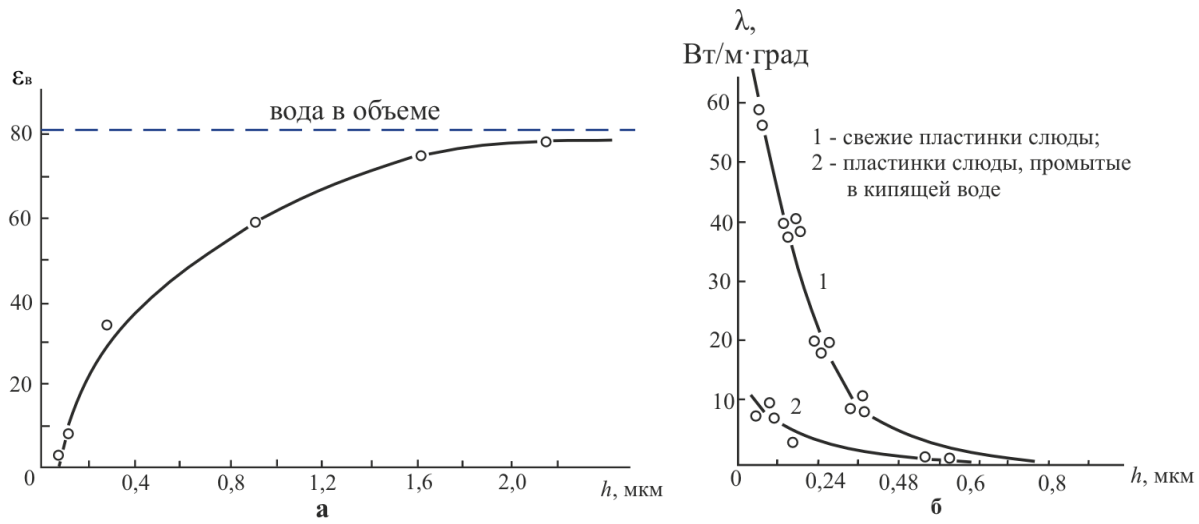


Рисунок 2.14 – Изменение диэлектрической проницаемости воды $\varepsilon_в$ (а) и теплопроводности воды λ (б) от толщины пленки воды h между пластинами слюды [35, 75]

Современные достижения в области экспериментальных методов исследования (использование нейтронной дифракции, рентгеновской спектроскопии и др. методов) в сочетании с развитием вычислительных технологий открывают новые возможности для изучения поведения воды в межфазных системах. Так, например, доказано структурирование воды в мицеллах – в присутствии кислот мицеллы характеризуются меньшим размером [125].

2.5 Анализ трансформации структуры поровой воды в тонкодисперсных грунтах

Предположение о структурированном состоянии воды в водонасыщенных глинистых грунтах было сформулировано Р.Э. Дашко на основании наблюдений за состоянием отложений в основании различных сооружений, а также результатов экспериментальных исследований. Подобные идеи развивались также в трудах мерзлотоведов Московского государственного университета Б.Н. Достовалова, А.А. Ананяна и др. Экспериментальное подтверждение гипотезы об отсутствии свободной воды в глинистых грунтах различного гранулометрического состава и физического состояния было получено в начале 80-х годов прошлого века с использованием ЯМР-релаксометра ЭХО-4 (частота $^1H = 20$ МГц) на физическом факультете Ленинградского государственного университета под руководством В.И. Чижика. В рамках исследований была также проведена сравнительная оценка влияния минерального состава на преобразование структуры поровой воды [35, 48].

Следует еще раз особо подчеркнуть, что глинистые грунты характеризуются наибольшим количеством и развитостью активных центров, что связано с особенностями кристаллохимического строения решетки слоистых алюмосиликатов.

В ходе выполнения экспериментальных исследований на релаксометре ЭХО-4 был проведен комплексный анализ изменения структурных особенностей поровой воды в глинистых

грунтах, определяемых по показателю времени спин-решетчатой релаксации T_1, с учетом следующих факторов [35, 48]:

– зависимость T_1 от содержания глинистой фракции M_c и изменения влажности (физического состояния) при постоянном минеральном составе (группа гидрослюд) (рисунок 2.15);

– влияние на T_1 активности различных групп глинистых минералов – гидрослюд и бентонитов (рисунок 2.16).

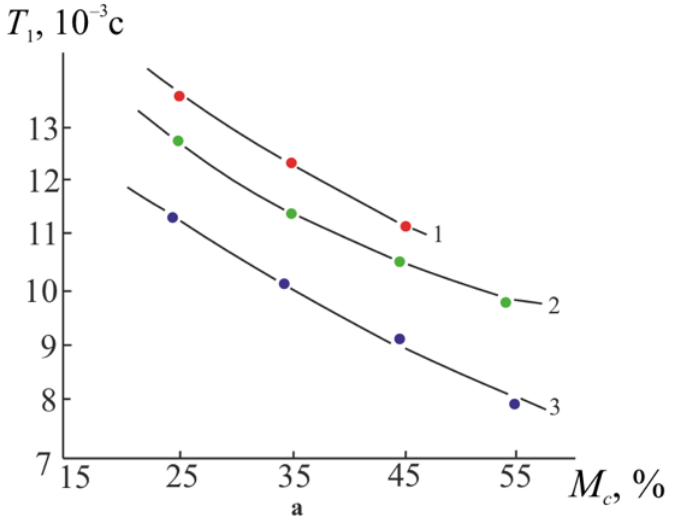


Рисунок 2.15 – Изменение времени спин-решетчатой релаксации T_1 поровой воды от содержания глинистой фракции в грунте M_c и влажности грунта на пределе текучести W_L: 1 – $W = 1{,}1\ W_L$; 2 – $W = W_L$; 3 – $W_P < W < W_L$ [35]

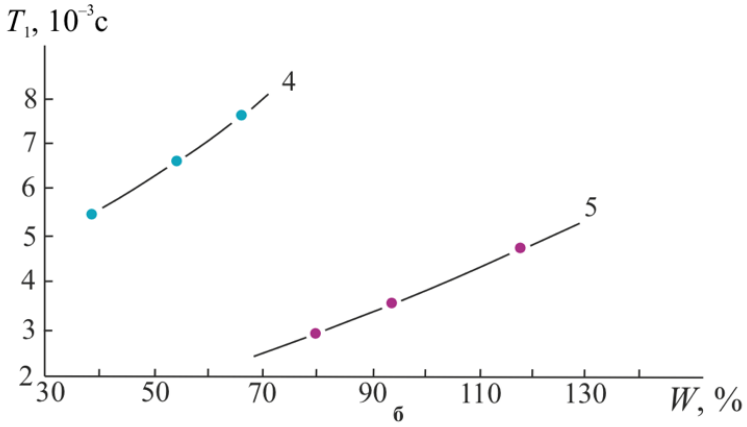


Рисунок 2.16 – Изменение времени спин-решетчатой релаксации T_1 поровой воды от влажности грунта W и его минерального состава: 4 – гидрослюдистые глины; 5 – бентонитовые глины [35]

Проведенные исследования показали, что свободная вода при такой вариации состава и состояния глинистых грунтов полностью отсутствует, так как усредненный параметр T_1

составляет $n \cdot 10^{-3}$ с по сравнению со свободной водой ($T_1 = 2{,}5$ с). При этом снижение T_1 отвечает высокой степени структурированности поровой воды и наблюдается при:

– возрастании содержания глинистой фракции M_c в образцах грунтов;

– наименьших влажностях (при постоянстве минерального состава).

Анализ рисунка 2.16 показывает, что глинистые минералы группы монтмориллонита обладают более высокой активностью энергетических центров даже при высоких значениях влажности $W > 70$ %. Следует отметить, что влажность на пределе текучести каолинитовых глин составляет около 65% и повышается до 85% для бентонитовых разностей. При этом время спин-решетчатой релаксации для первого типа глин составляет $T_1 = 8 \cdot 10^{-3}$ с, что вдвое превышает значение того же показателя для второго – $T_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ с.

Кроме того, было исследовано воздействие минерализации поровых растворов различной концентрации и химического состава на структурирование поровой воды в глинистых грунтах. Эксперименты проводились при внесени в образцы растворов, анализируемых ранее на рисунке 2.8). Результаты представлены на рисунке 2.17.

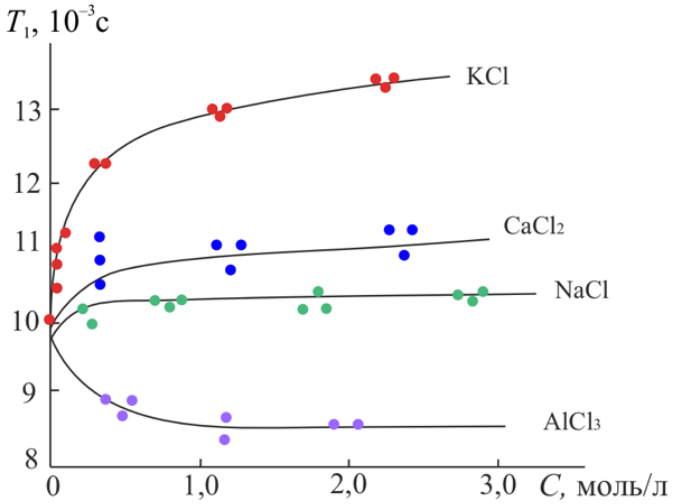


Рисунок 2.17 – Изменение времени спин-решетчатой релаксации T_1 протонов воды поровых растворов различной концентрации C гидрослюдистых глин ($M_c = 54\%$) текучей консистенции ($W = W_L$) [35]

Изучение влияния минерализации и ионного состава поровых растворов на структуру жидкой фазы тонкодисперсных отложений показало, что структура поровой воды определяется преимущественно активными центрами глинистых частиц, что подтверждается значениями времени спин-решеточной релаксации T_1, при этом T_1 остается в пределах диапазона $n \cdot 10^{-3}$ с. Такой вывод справедлив как для отрицательно- (K^+), так и для положительно-гидратирующих ионов (Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Al^{3+}).

Следует отметить, что в системе «дисперсная частица – вода – ион» прослеживается двойственная природа действие ионов. С одной стороны, они влияют на подвижность молекул

воды, с другой – влияют на степень агрегированности грунта. В свою очередь степень агрегированности определяет величину поверхностной энергии глинистых грунтов, диктующей количество активных центров – при агрегировании их число уменьшается, тогда как при диспергировании возрастает. Агрегирующая способность ионов усиливается с ростом их заряда по правилу Шульце-Харди, упомянутому ранее. К наиболее слабым коагулянтам относят одновалентные ионы (K^+, Na+), к более сильным – двухвалентные (Ca^{2+}, Mg^{2+}). При этом наиболее активные трехвалентные ионы (Al^{3+}) обладают максимальной коагулирующей способностью. Изменения структуры поровой воды глинистых грунтов, насыщенных растворами различного ионного состава и концентрации, и объясняются такими закономерностями.

Анализируя рисунок 2.17, можно отметить, что наибольшее увеличение времени спин-решеточной релаксации T_1 наблюдается в присутствии KCl в поровом растворе глинистых грунтов. Такое положение определяется влиянием отрицательно-гидратирующего иона K^+ на структуру воды, что приводит к усилению движения молекул H_2O вокруг него. Стоит отметить, что диспергирующее действие иона K^+ в данном случае практически полностью отсутствует.

В присутствии иона Ca^{2+} отмечается его способность к агрегации, характерной для двухвалентных ионов. Однако увеличение параметра T_1 оказывается менее значимым по сравнению с K^+. Важно отметить, что для Ca^{2+} повышение подвижности поровой воды, связанное с процессами коагуляции частиц, сохраняется даже при наибольших концентрациях (C до 3 моль/л).

Эксперименты с глинистыми грунтами, насыщенных растворами в пристутствии Na^+ позволили установить, что в области низких концентраций (0-0.3 моль/л) наблюдается небольшое увеличение подвижности поровых вод. При этом с дальнейшим ростом концентраций наблюдается стабилизация процесса.

Особый случай представляет ион Al^{3+}, обладающего высокой коагулирующей способностью, которая компенсируется наиболее ярко выраженным эффектом структурирования тетраэдров молекул H_2O. Такое положение иллюстрируется снижением показателя времени T_1 при концентрациях до ≈ 1 моль/л.

Продолжение исследований структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах осуществлялось, начиная с 2023 г., на усовершенствованных приборах («ЯМР-релаксометр «ЭХО-12» (частота для ядер ^1H – 20 МГц). Прибор разработан на кафедре радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета), под руководством и при непосредственном участии в опытах В.И. Чижика, А.В. Иевлева и А.С. Мазура [48]. Использование данной установки позволяет определять степень структурированности поровой воды послойно, на различном удалении от активных центров твердой поверхности.

Методика измерений включала в себя определение времен спин-решетчатой релаксации T_1 с использованием последовательности импульсов «инверсия-восстановление». Начальный 180°-импульс, согласно рисунку 2.5, переводит вектор суммарной намагниченности M из равновесного состояния в инвертированное положение (проекция $M_z = -M_0$). За счет явления спин-решетчатой релаксации после инверсии макроскопическая намагниченность начинает возвращаться в исходное равновесное состояние вдоль положительного направления оси z. Перед тем, как она достигает такого состояния, на нее накладывается 90°-импульс, который поворачивает M в плоскость xy для оценки остаточной компоненты M на оси z (M_z). Методика измерений включала следующие параметры: длительность 90° радиочастотного импульса – 3,8 мкс; «мертвое» время – 32 мкс; отношение сигнал/шум порядка 900; интервал между импульсами варьировался от 0,2 до 400 мкс с дискретизацией на 60 значений. Аппаратная часть экспериментов включала: импульсный генератор Spin Core с тактовой частотой 100 МГц; программно-аппаратный комплекс «ЭхоСкан» с интерфейсом, разработанным на языке LabView.

Обработка полученных результатов проводится с использованием программно-аппаратного интерфейса «ЭхоСкан». Для анализа кривых восстановления намагниченности M, зависящих от временных интервалов t между радиочастотными импульсами, применялся алгоритм анализа по методу оптимизации Левенберга–Марквардта, направленный на решение задач о наименьших квадратах:

$$M = \sum_k M_0^k \left(1 - a^k \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1^k}\right)\right), \tag{2.5}$$

где M_0 – полная намагниченность k-компоненты;

k – количество компонент;

a – корректирующий коэффициент;

T_1^k – время спин-решетчатой релаксации k-компоненты.

В результате выполнения первой серии исследований были установлены четкие закономерности уменьшения времени спин-решеточной релаксации T_1 в зависимости от физического состояния водонасыщенных глинистых грунтов, содержания глинистой фракции, ее минерального состава, а также состава поровых вод. Поскольку в практике инженерной геологии, механики грунтов и смежных дисциплин общепринятым является представление о наличии свободной воды в грунтах с влажностью, близкой к влажности на пределе текучести W_L, то основная часть современных экспериментов была сосредоточена именно на образцах водонасыщенных грунтов именно такого физического состояния.

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить закономерности послойного изменения структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах по величине параметра T_1 в зависимости от удаленности от активных центров твердых частиц до

центра поры. Изучение выполнялось на серии образцов с различным содержанием глинистой фракции, представленной группой гидрослюд, при неизменном физическом состоянии, соответствующем, согласно ГОСТ 25100, текучему при $W = W_L$.

Изменение содержания глинистой фракции и параметров физического состояния глинистых образцов грунтов представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Гранулометрический состав и некоторые физические свойства исследуемых глинистых грунтов

Номер образца	Тип грунта	Размер фракций и содержание в образцах, %		Влажность W, %	Пределы пластичности, %		Число пластичности, I_P, %
		Глинистая (<0,002 мм)	Пылеватая (0,002-0,05 мм)		Влажность на пределе текучести W_L	Влажность на пределе раскатки W_P	
1	Суглинок средний пылеватый	16	84	26,7	26,7	15,8	10,9
2	Суглинок тяжелый пылеватый	28	72	34,2	34,2	19,5	14,7
3	Глина пылеватая	40	60	45,0	45,0	24,0	21,0

Наименования грунтов приведены в соответствии с широко используемой в инженерной геологии трехчленной классификацией В.В. Охотина, основанной на содержании песчаной, пылеватой и глинистой фракций. Увеличение доли пылеватой фракции достигалось привнесением различного количества мономинеральной кварцевой пыли. Определение гранулометрического состава грунтов проводилось с помощью пипеточного метода. Содержание глинистой фракции определяет величины характерных влажностей W_L, W_P и, соответственно, I_P.

С целью сравнительной оценки влияния содержания именно глинистой составляющей дополнительно был изучен образец мелкозернистого песка преимущественно кварцевого состава, полностью насыщенного дистиллированной водой. Результаты гранулометрического состава показывают, что содержание частиц в данном образце размером 0,25-0,1 мм составляет 95%.

Полученные значения времени спин-решёточной релаксации T_1 (таблица 2.4) количественно отражают изменение степени структурирования поровой воды в зависимости от расстояния от активных центров поверхности твёрдых частиц.

Экспериментальные данные показывают закономерности изменения времени спин-решеточной релаксации T_1 от содержания глинистой фракции в грунте. Наблюдается снижение максимальных значений T_1 по мере увеличения доли содержания тонкодисперсных частиц и, соответственно, роста количества активных центров.

Таблица 2.4 – Значения времени спин-решетчатой релаксации T_1 для грунтов текучей консистенции с различным содержанием глинистой фракции и песчаного мелкозернистого грунта

Номер образца	Тип грунта	Содержание глинистой (<0,002 мм) фракции, %	$W = W_L$, %	Время спин-решетчатой релаксации, с	
				T_{1S}	T_{1C}
1	Суглинок средний пылеватый	16	26,7	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$
2	Суглинок тяжелый пылеватый	28	34,2	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
3	Глина пылеватая	40	45,0	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
4	Песок мелкозернистый	следы	–	$5 \cdot 10^{-2}$	1

Примечание. T_{1S} – характеризует структурированность слоя поровой воды вблизи твердой поверхности частиц, T_{1C} – то же в центральной части поры.

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии свободной воды в порах исследованных водонасыщенных глинистых грунтов, даже в их текучем состоянии, согласно ГОСТ 25100 [25]. Стоит отметить сравнение полученных характеристик, которые показывают, что максимальное зарегистрированное значение T_{1C} в центре поры для исследованных тонкодисперсных грунтов (образец суглинка среднего пылеватого) составило $2 \cdot 10^{-2}$ с, что более чем на два порядка ниже значения T_1 для свободной воды (2,5 с).

В водонасыщенных песчаных грунтах центральная часть пор содержит воду, параметры которой близки к объемной воде ($T_{1C} = 1$ с), что свидетельствует об отсутствии ее выраженной структурированности. В то же время наблюдаемая небольшая степень упрочнения поровой воды в непосредственной близости от поверхности частиц мелкозернистого песчаного грунта ($T_{1S} = 5 \cdot 10^{-2}$ с), вероятно, может быть объяснена присутствием тонких «рубашек» на песчаных зернах за счет пылеватых и глинистых частиц. Как отмечалось ранее, такие частицы в тонких капиллярах способны проявлять свойства за счет действия активных центров, влияющих на состояние приграничных слоев воды. При этом такие данные однозначно подтверждают, что в песчаных грунтах, в отличие от глинистых, основной объем поровой воды сохраняет свойства, близкие к объемной, за исключением названных тонких приповерхностных слоев.

Проведенное сопоставление данных, полученных на ЯМР-релаксометре ЭХО-12, с ранее установленными закономерностями (ЯМР-релаксометр ЭХО-4) подтверждает их численную идентичность. Проведенный анализ показывает совпадение средневзвешенных значений T_1, рассчитанных с использованием наиболее вероятных значений времен релаксации на различном удалении от активных центров твердых поверхностей частиц. Сопоставимость параметров T_1

получена для водонасыщенных глинистых грунтов различного гранулометрического состава в текучем состоянии ($W = W_L$) (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Сравнение значений T_1, полученных на ЯМР-релаксометрах ЭХО-4 и ЭХО-12

Содержание глинистой (<0,002 мм) фракции, %	Время спин-решетчатой релаксации T_1, 10^{-3} с		Примечание
	ЭХО-4	ЭХО-12	Экспериментальные исследования выполнены на грунтах одного и того же минерального, гранулометрического составов и физического состояния
16	–	13,22	
28	12,10	9,36	
40	11,10	8,60	

Для всех исследуемых образцов, включая различные по содержанию глинистой фракции грунты и мелкозернистый песок, на ЯМР-релаксометре ЭХО-12 были получены спектры сигналов свободной индукции (FID) после воздействия 90° радиочастотного импульса с последующим преобразованием Фурье. Приемник релаксометра использует синхронный фазовый детектор без возможности квадратурного обнаружения, что потребовало проведения измерений со смещением от резонансной частоты на 47,5 кГц при спектральном разрешении 500 Гц.

Полученные спектры представлены на рисунке 2.18, где отдельно показаны результаты для каждого типа образцов. Для сравнительного анализа выполнен совмещенный спектр с нормировкой по оси амплитуд (рисунок 2.18, д), что позволило выявить общие закономерности влияния активных центров поверхностей твердых минеральных частиц, прежде всего глинистых, на структурирование поровой воды.

Аппроксимация спектральных данных спада магнитной индукции протонов поровой воды Лоренцевой формой линий для всех исследованных образцов позволяет выявить особенности ее структурирования относительно расстояния от активных центров твердых частиц. В таблице 2.6 отражены определенные позиции состояния поровой воды в объеме пустотного пространства грунта, при этом выделены два характерных слоя – первый и второй. Показано сравнение полученных спектров с эталонным, записанным для дистиллированной объемной воды.

Таблица 2.6 – Значения HWHM (half width at half maximum), полученные при обработке спектров сигналов

№	HWHM, кГц				
	Песок мелкозернистый	M_c = 16 %	M_c = 28 %	M_c = 40 %	Объемная вода
Слой 1	0,44	0,86	1,17	1,29	0,2
Слой 2	2,67	3,0	3,9	4,7	–
3	–	19,0	19,0	19,0	–

Примечание. Параметр HWHM применяется при анализе спектров и обозначает половинную ширину на уровне половинной амплитуды.

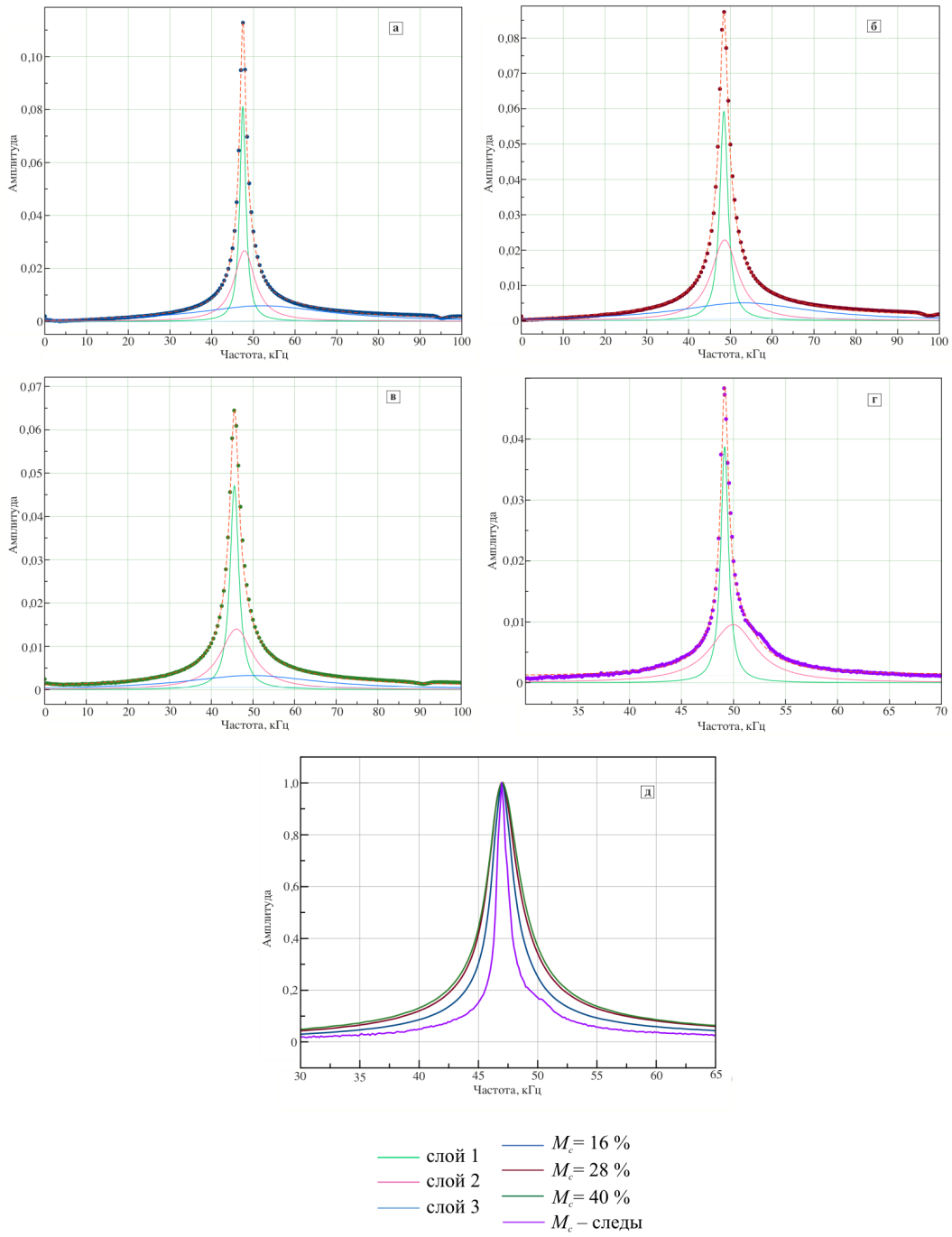


Рисунок 2.18 – Спектры сигнала FID, записанные для водонасыщенных глинистых грунтов различного гранулометрического состава постоянного физического состояния ($W = W_L$) и песка мелкозернистого: а – M_c = 16 %; б – M_c = 28 %; в – M_c = 40 %; г – песок мелкозернистый кварцевый; д – совмещенный спектр четырех испытанных образцов

Первый слой отражает степень структурированности воды в центральных областях пор – в наибольшем удалении от активных центров твердой поверхности частиц, где наблюдается постепенное уменьшение степени структурирования поровых вод при увеличении содержания глинистой фракции. Согласно исследованиям морфологии порового пространства, описанным детальнее в главе 1, для глинистых грунтов малой степени литификации радиус поры может достигать примерно 6 мкм. Согласно Г.И. Дистлеру, поляризационные центры действуют

именно на таком расстоянии (до 10 мкм) и способствуют замедлению трансляционного движения молекул воды, тем самым переводя воду в состояние, близкое к твердообразному. Значение полуширины линии (HWHM) в наиболее удаленных слоях воды для водонасыщенных глинистых образцов в 4-6 раз превышает аналогичный параметр для свободной воды (0,2 кГц).

Схожим закономерностям изменения структурированности поровой воды отвечает и второй слой, но в непосредственной близости от твердой поверхности частиц, где наблюдается действие эпитаксиальных центров. Под их влиянием наблюдается изменение плотности воды в сторону ее увеличения. Такое действие обнаруживается на расстоянии менее 0,2 мкм. Слой поровой воды, согласно таблице 2.6, характеризуется высокими значениями HWHM с общей тенденцией возрастания по мере увеличения содержания глинистой фракции M_c и, соответственно, роста количества активных центров слоистых алюмосиликатов.

Третья позиция установлена только в глинистых грунтах, при этом она характеризуется постоянством параметра HWHM для жидкой фазы, что может свидетельствовать о наличии кристаллизационной воды в разностях, содержащих минералы группы гидрослюды.

Для образца песчаного мелкозернистого грунта основная часть ЯМР-сигнала соответствует характеристикам, схожим с объемной водой, что свидетельствует о практически свободном состоянии молекул в центральных областях пор. Однако ширина спектральных линий вблизи поверхности частиц отражает взаимодействие молекул воды с твердой фазой и их структурирование под действием, определяемым, в основном, присутствием более тонких частиц.

Полученные спектральные закономерности согласуются с выводами, сделанными на основе анализа времен спин-решетчатой релаксации T_1, и подтверждают установленную ранее зависимость степени структурирования поровой воды от расстояния от активных центров поверхности твердых частиц и содержания глинистой фракции.

Помимо изучения степени структурирования поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах в текучем состоянии ($W = W_L$), были проведены экспериментальные исследования глинистого образца того же минерального (гидрослюдистого) состава при влажности на пределе пластичности ($W = W_P$). Стоит отметить, что согласно действующей классификации в области инженерной геологии, такое состояние характеризуется как квазитвердое. Показатель W_P при этом отвечает границе перехода глинистого грунта из пластичного в твердое состояние. В почвоведении параметр W_P соответствует влажности начала увядания растений, когда корневая система теряет способность извлекать почвенную влагу. Создаваемого корнями вакуума оказывается недостаточно для преодоления сил, удерживающих воду в порах грунта. Данные эксперименты позволили выявить различия в структурировании поровой воды в глинистых грунтах при их различных физических состояниях.

Исследование структуры воды в водонасыщенном глинистом образце (M_c = 40 %) при влажности, соответствующей пределу пластичности ($W \approx W_P$ = 26 %), выявило определенные особенности, характерные для такого состояния грунта. Измерения на ЯМР-релаксометре ЭХО-12 дали возможность убедиться, что значение параметра T_1 варьировало в относительно узком диапазоне от $5 \cdot 10^{-3}$ до $9 \cdot 10^{-3}$ с. Такой интервал значений может быть увязан с действием двух факторов: минимальными размерами пор водонасыщенных глинистых грунтов, находящихся в таком состоянии, когда свойства воды наиболее приближены к свойствам твердого тела, а также преобладанием влияния эпитаксиальных центров на структурирование воды по сравнению с действием поляризующих центров.

Анализ аппроксимации спектральных данных спада магнитной индукции молекул H_2O поровой воды (с использованием Лоренцевой формы линий) позволил выявить наличие двух типов воды (рисунок 2.20):

– кристаллизационной воды глинистых минералов (как и ранее, параметр HWHM составил 19 кГц);

– единого слоя структурированной поровой воды вокруг глинистой частицы.

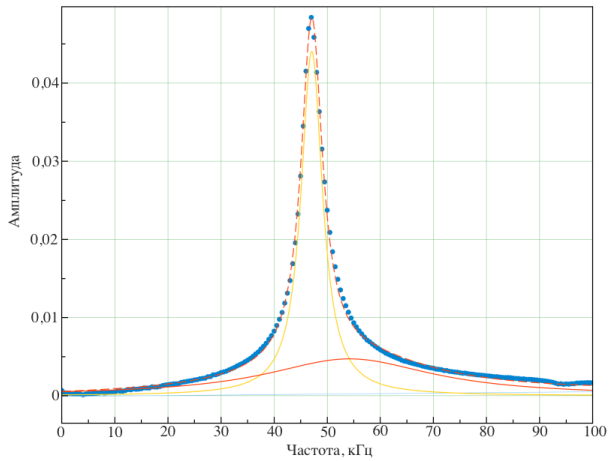


Рисунок 2.19 – Спектр сигнала FID, записанный для глинистого грунта (M_c = 40 %) при $W = W_P$ = 26 %

Полученные данные демонстрируют отличие в параметрах структурирования поровой воды для образца с влажностью на границе раскатывания. Значение полуширины линии (HWHM) для такого водонасыщенного глинистого грунта оказалось в 12,5 раз меньше аналогичного параметра, определенного для свободной воды. Такое значение отвечает максимальной степени упорядоченности структурированной поровой воды и, соответственно, определяет минимальную подвижность ее молекул среди исследованных образцов.

Как отмечалось ранее, максимальной плотностью и развитостью активных центров среди минеральных компонентов твердой фазы отличаются слоистые алюмосиликаты – глинистые минералы. О значимости кристаллохимического строения глинистых минералов

свидетельствуют проведенные экспериментальные исследования с образцами, в которых содержится тонкодисперсная фракция (<0,002 мм), но отсутствуют глинистые минералы. В качестве объекта исследования выступила пульпа – техногенно-минеральное образование, формирующееся в процессе обогащения медно-колчеданных руд Урала в результате дробления в шаровых мельницах пород, содержащих полезный компонент, и последующего цикла флотации для его извлечения (рисунок 2.20).

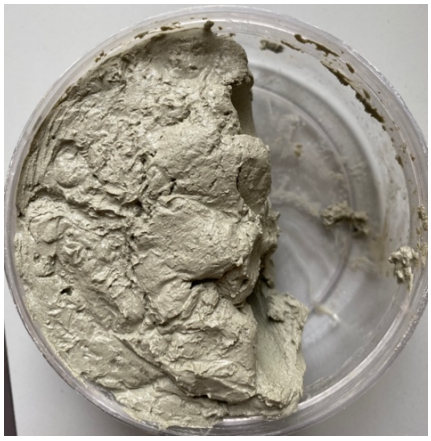


Рисунок 2.20 – Образец исследуемой пульпы[3]

Пульпа в месте ее сброса характеризуется следующими показателями процентного распределения фракций: песчаная (0,05-2 мм) – 26,3-35,1%; пылеватая (0,05-0,002) – 51,1-59,4%; тонкодисперсная фракция <0,002 мм – 13,5-17,1% [17]. Влажность исследуемого образца такой пульпы составила $W = 30{,}5\%$.

В вещественном составе исследованного образца обнаружены такие минералы, как кварц (SiO_2) – 40%; альбит ($Na[AlSi_3O_8]$) – 32%; клинохлор ($(Mg,Al)_6[Si_{3,\,1\text{-}2}Al_{0,9\text{-}1,2}O_{10}](OH)_8$ – 20%; карбонаты – 3%; биотит ($K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,F]_2$) – 3%; пирит ($FeS_2$) – менее 1%; рутил ($TiO_2$) – около 1% [17]. Как видно из представленного минерального состава, исследуемая пульпа не содержит глинистых минералов. Образование тонкодисперсной фракции (<0,002 мм) в данном случае, по всей видимости, происходит в процессе дробления в шаровых мельницах присутствующих в руде алюмосиликатов – в первую очередь клинохлора (20% состава) и в меньшей степени биотита (3%).

Экспериментальные исследования выявили, что время спин-решёточной релаксации T_1 для исследуемого образца пульпы составляет $3{,}7 \cdot 10^{-2}$ с при описанной ранее методике измерений, что на порядок выше того же параметра для глинистых грунтов ($T_1 = n \cdot 10^{-3}$ с). В отличие от водонасыщенных глинистых образцов, где наблюдался диапазон значений T_1 и, соответственно, послойное изменение структуры поровой воды, данный техногенный материал характеризуется отсутствием выраженных слоев и единым параметром T_1. Такие особенности

[3] Образец пульпы предоставлен д.г.-м.н., профессором О.М. Гуман

могут свидетельствовать об однородности свойств поровой воды в порах пульпы, преобладающем влиянии только одного типа активных центров. Важно отметить, что энергетические центры на поверхности тонкодисперсных частиц пульпы проявляют меньшую активность по сравнению с активными центрами глинистых минералов и, соответственно, обладают ослабленным воздействием на структуру поровой воды. Кроме того, присутствие кристаллизационной воды не было установлено.

Как отмечалось ранее в главе 1, тонкодисперсная фракция грунтов может быть представлена компонентами биохимического генезиса. В практике инженерной геологии особое место занимают диатомовые микроводоросли, содержание которых определяет высокую гидрофильность грунтов. Створки диатомовых водорослей, имея характерный размер порядка единиц мкм, что сопоставимо с размерами частиц глинистых минералов, также способны к образованию системы активных центров (рисунок 2.21). Биогенный кремнезем обычно имеет ажурное строение, что приводит к значительному увеличению количества и активности энергетических центров, тем самым влияя на гидрофильность грунта.

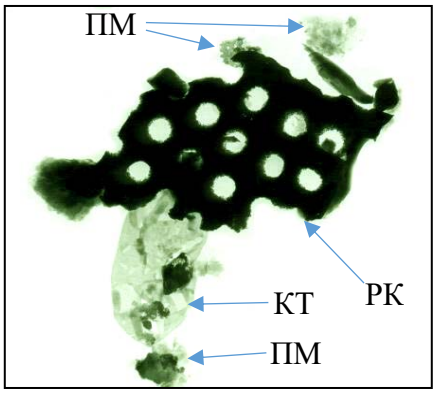


Рисунок 2.21 – Изображения микроводорослей (РК), бактериальной клеточной стенки – «клеточной тени» (КТ) и продуктов метаболизма (ПМ), полученные на электронном микроскопе (увеличение ×17000) (опыты О.В. Рыбальченко и Р.Э. Дашко)

Благодаря микроструктуре кремнеземных панцирей, частицы биогенного кремнезема диатомового происхождения несут энергетически активные центры как на внешних поверхностях створок, так и во внутренней их части, что определяется особенностями их строения – размерами и наличием дефектов упаковки и остаточных органических групп.

В процессе геологического преобразования, при длительном накоплении на дне водоемов, относительно крупные диатомовые створки подвергаются постепенному механическому разрушению, приводящему к уменьшению размеров частиц по сравнению с исходными цельными раковинами. При этом свежие сколы и трещины, образующиеся при разрушении, создают дополнительные активные центры за счет формирования новых дефектов структур. Соответственно, такие механически поврежденные частицы характеризуются большей концентрацией активных центров по сравнению с цельными створками. Наличие

тонкодисперсной составляющей биогенного генезиса важно учитывать при анализе их взаимодействия с поровыми водами и их структурирования.

Для проведения исследований структурированности поровой воды под действием активных центров твердой фазы, представленной аморфным кремнеземом, биогенного генезиса был использован образец диатомита (ВХ XVI-27_1) из коллекции Горного музея Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Образец приурочен к геологическому разрезу ст. № 1 р. Уравель (Грузия) (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Образец диатомита

На рисунках 2.23, а и б представлены фотографии микростроения образца диатомового ила, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEM 20 в лаборатории «Глубинная метагеология» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

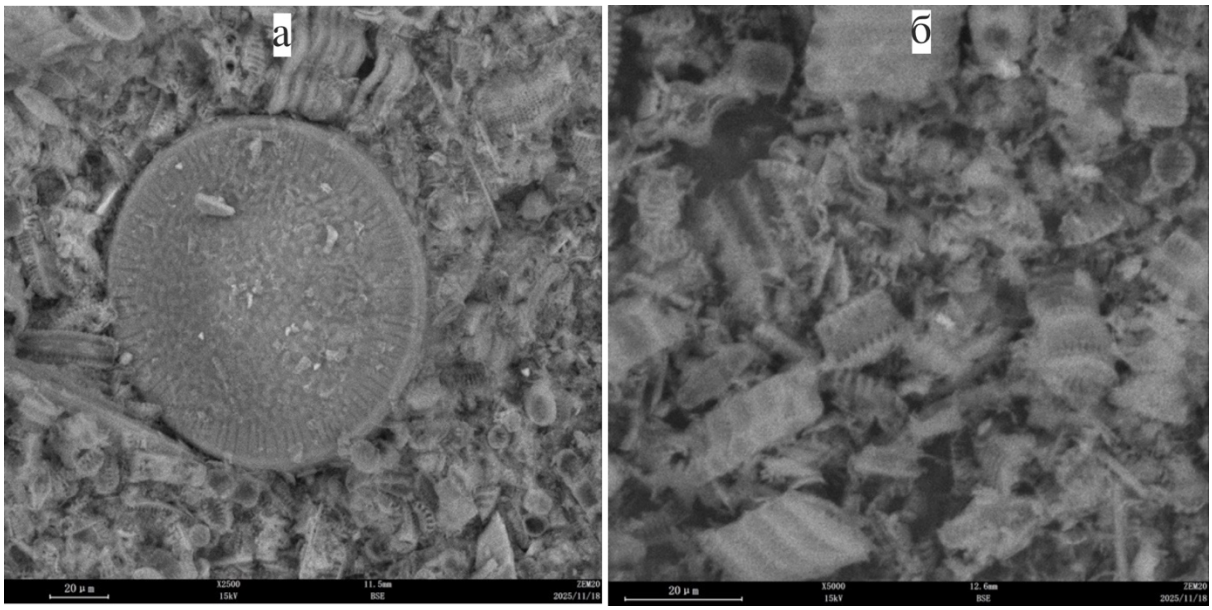


Рисунок 2.23 – Микростроение образца диатомового ила

Для проведения исследований релаксационных параметров с помощью метода ЯМР образец диатомового ила был полностью насыщен дистиллированной водой. В ходе водонасыщения было установлено, что переход образца в неустойчивое состояние произошел при достижении влажности 178%, что определяется высокой гидрофильностью аморфного биогенного кремнезема, характерного для диатомовых отложений.

Проведенные измерения времен спин-решёточной релаксации T_1 позволяют провести сравнительный анализ структурированности поровой воды тонкодисперсных грунтов с различным генезисом твердой фазы: минеральным (глинистые грунты) и биогенным (диатомовые илы). Полученные результаты систематизированы в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Сравнение значений T_1, полученных для образцов водонасыщенных тонкодисперсных грунтов различного генезиса

Номер образца	Тип грунта	Влажность W, %	Время спин-решетчатой релаксации, мс	
			T_{1S}	T_{1C}
1	Диатомовый ил (трепел)	178	$5{,}7\cdot10^{-4}$	$8{,}1\cdot10^{-3}$
2	Глина пылеватая	45 ($W = W_L$)	$9\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-2}$

Анализ данных таблицы 2.7 позволяет сделать выводы о свойствах поровых вод в диатомовых илах. Несмотря на аномально высокую влажность (178%), такой образец демонстрирует выраженную способность к структурированию поровой воды, что проявляется в существенном влиянии активных центров как на поверхности биогенного кремнезема, так и в центральных частях пор.

Проведенные исследования выявили, что структурирующее воздействие кремниевых микростворок диатомовых на поровую воду проявляется в некоторой степени интенсивнее по сравнению с водонасыщенными глинистыми грунтами, даже при высоком (40%) содержании глинистой фракции в последних, несмотря на различие по величине влажности в 4 раза.

Как уже отмечалось ранее, современный этап развития инженерной геологии и других смежных наук требует дополнения традиционной модели рассмотрения водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов. Помимо учета твердой фазы абиогенного и биогенного генезиса необходимо включить в анализ воздействие на структуру поровой воды деятельности подземных бактерий и продуктов их метаболизма.

Использовались глинистые грунты с содержанием глинистой фракции $M_c = 40\%$, преимущественно гидрослюдистого состава. В такие грунты были привнесены водные суспензии, содержащие микроорганизмы – грунтовые грамположительные бактерии палочковидной формы, представленные следующими таксонами: *Bacillus Simplex, Bacillus Subtilis, Bacillus Thuringiensis*. Концентрация бактериальных клеток в каждом случае составляла 10^8 КОЕ/мл[4], что соответствует уровню, характерному для контаминированных грунтов при различных источниках привнесения микроорганизмов. Таксоны *Bacillus* повсеместно встречаются в грунтовой водонасыщенной толще подземного пространства городов и

[4] КОЕ – колониеобразующая единица

горнопромышленных регионов. Влажность таких грунтов соответствовала влагосодержанию на пределе текучести $W = W_L = 45\%$.

Значения T_1 для суспензий, содержащих бактериальные клетки, а также для глинистых грунтов, насыщенных такими микроорганизмами, представлены в таблицах 2.8 и 2.9.

Таблица 2.8 – Значения времени спин-решетчатой релаксации T_1 для суспензий в присутствии различных видов бактерий *Bacillus*

№ образца	Суспензии с различными таксонами бактерий	Время спин-решетчатой релаксации T_1, с	
		T_{1S}, с	T_{1C}, с
1	*Bacillus Simplex*	$3{,}5 \cdot 10^{-3}$	1,7
2	*Bacillus Subtilis*	–	1,8
3	*Bacillus Thuringiensis*	$3{,}5 \cdot 10^{-2}$	1,8

Примечание: T_{1S} – характеризует структурированность поровой воды на поверхности бактериальной клетки, T_{1C} – в основном объеме суспензии.

Таблица 2.9 – Значения времени спин-решетчатой релаксации T_1 для грунтов текучей консистенции $W = 45\%$ с содержанием глинистой фракции $M_c = 40\%$ в присутствии различных видов *Bacillus*

№ образца	Таксоны бактерий, привнесенные в образцы глинистых грунтов	Время спин-решетчатой релаксации T_1, с	
		T_{1S}, с	T_{1C}, с
1	*Bacillus Simplex*	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	$2{,}5 \cdot 10^{-1}$
2	*Bacillus Subtilis*	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	$1{,}1 \cdot 10^{-1}$
3	*Bacillus Thuringiensis*	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$
4	Глина пылеватая без привнесенных бактерий	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Примечание: Обозначения T_{1S} и T_{1C} приведены ранее в таблице 2.4

Анализ выполненных исследований показывает, что в пределах одного вида *Bacillus* различные бактерии оказывают неодинаковое влияние на структуру воды, что необходимо учитывать при анализе поведения контаминированных микроорганизмами водонасыщенных глинистых грунтов. Так, данные экспериментов показали, что наибольшим структурирующим эффектом обладает вид *Bacillus Thuringiensis*, что проявляется в снижении времени спин-решеточной релаксации в центральной части поры до величины $T_{1C} = 7 \cdot 10^{-2}$ с (таблица 2.9).

Однако нельзя не отметить повышения параметров T_1 по сравнению с системой «глинистый грунт – дистиллированная вода». Основой такого процесса может служить взаимодействие между разноименно заряженными поверхностями – отрицательно заряженными глинистыми частицами и положительно заряженными бактериальными клетками, а также их приспособительной функцией и, соответственно, образованием биопленок на твердых поверхностях. Такое взаимодействие приводит к частичной компенсации энергии активных

центров, но не устраняет полностью раздельного структурирующего воздействия на молекулы поровой воды.

Наибольшее воздействие на структурированность поровой воды оказывают основные метаболиты деятельности микроорганизмов – белки. В экспериментах использовались растворы бычьего сывороточного альбумина (БСА) заданной концентрации, что позволило количественно оценить его влияние на структуру растворов и на поровую воду в водонасыщенных глинистых грунтах. БСА представляет собой трехдоменный глобулярный белок вытянутой эллипсоидной формы, несущий отрицательный заряд, в физиологических условиях (pH 7,40) приобретает компактную «сердцевидную» конформацию [56, 178].

Экспериментальными исследованиями было выявлено, что уже при растворении альбумина в воде наблюдается выраженное структурирование приграничных слоев молекул H_2O, что подтверждается снижением показателя преломления с 1,333 (объемная вода) до меньших значений, свидетельствующим о формировании льдоподобных структур [77]. Такие исследования показывают, что вокруг белковых молекул образуется слой структурированной воды толщиной 5-10 мкм, представляющий собой сложную гетерогенную систему. В этом слое пространственная сетка льдоподобных наноструктур формирует своеобразный гидрогель, причем часть структур сохраняет способность к динамическим флуктуациям [161].

Еще ранее на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II для оценки микробной пораженности водо- и водогазонасыщенных дисперсных грунтов широко использовался показатель суммарного белка (СБ), который, как известно, может быть представлен в виде выражения:

$$СБ = СБ_{ЖК} + СБ_{МК} + СБ_{ПМ}, \quad (2.6)$$

где $СБ_{ЖК}$, $СБ_{МК}$ и $СБ_{ПМ}$ – содержание белка живых, мертвых клеток и продуктов их метаболизма соответственно.

На основании биохимических исследований, проведенных с применением различных методов (например, по М. Брэдфорду), был установлен широкий диапазон значений параметра СБ от 300 мкг/г[5] и более в зависимости от сорбционной способности тонкодисперсных грунтов, различия в физико-химических условиях, а также уровня контаминации толщи грунтов и подземных вод. Использование других биохимических методов исследования (по определению содержания белка методами О. Лоури и Г. Петерсона) позволило сделать вывод о более высоких значениях СБ в водонасыщенных грунтах – до 1800-1900 мкг/г.

Соответственно, для оценки структурированности молекул воды с помощью метода ЯМР эксперименты проводились при следующих концентрациях белка в растворах и грунтах: 300,

[5] 300 мкг суммарного белка на 1 г сухой породы

480, 720, 1020 и 1320 мкг/г. Стоит отметить, что при внесении белковых растворов в глинистые грунты наблюдалось образование новых структурных связей за счет сорбции длинноцепочечных органических соединений на поверхности минеральных частиц. Такой процесс проявлялся в заметном усложнении доведения до однородности образцов с увеличением концентрации СБ.

Значения T_1 для растворов различной концентрации СБ и при последующем их внесении в глинистые грунты приведены в таблицах 2.10 и 2.11.

Таблица 2.10 – Значения времени спин-решетчатой релаксации T_1 для водных растворов с различным содержанием белка

№ образца	Содержание СБ в дистиллированной воде, мкг/мл	Время спин-решетчатой релаксации T_1, с	
		T_{1S}, с	T_{1C}, с
1	300	0,1	2,5
2	480	0,2	2,8
3	720	0,1	2,7
4	1020	0,1	2,6
5	1320	0,1	2,2

Примечание: T_{1S} – характеризует структурированность поровой воды на поверхности белка, T_{1C} – в основном объеме водного раствора.

Таблица 2.11 – Значения времени спин-решетчатой релаксации T_1 для грунтов текучей консистенции $W = 45\%$ с содержанием глинистой фракции $M_c = 40\%$ с различным содержанием белка

№ образца	Содержание СБ в глинистых образцах грунтов, мкг/г	Время спин-решетчатой релаксации T_1, с		Примечание
		T_{1S}, с	T_{1C}, с	
1	300	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	При содержании СБ > 300 мкг/г структурированность воды в ближних слоях не фиксируется за счет отсутствия свойств жидкости
2	480	–	$1{,}1 \cdot 10^{-2}$	
3	720	–	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	
4	1020	–	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	
5	1320	–	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	
6	Образец пылеватой глины без привнесения белка	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	–

Примечание: Обозначения T_{1S} и T_{1C} приведены ранее в таблице 2.4

Зафиксировать время спин- решеточной релаксации T_{1S}, значение которого составило $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ с, оказалось возможным только лишь при минимальной исследуемой концентрации белка (300 мкг/г). Такая величина на порядок ниже аналогичного параметра для системы «глинистый грунт – дистиллированная вода», что указывает на дополнительный вклад в структурирование поровой воды белковых компонентов. При повышении концентрации белка свыше 300 мкг/г метод ЯМР не регистрирует жидкообразные свойства воды в тонких

приповерхностных слоях. Преобладание влияния активных центров глинистых минералов на структуру воды в центральной части поры помогает объяснить относительную стабильность параметра T_{1C} во всем исследованном диапазоне концентраций образцов. Таким образом, молекулы белка способны трансформировать структуру воды преимущественно в непосредственной близости от их поверхности.

Максимальное воздействие на структурирование поровой воды вплоть до ее трансформации в твердообразное состояние оказывает основной продукт метаболизма бактерий, актиномицетов и микромицетов – микробный белок. Следует отметить, что методы энзимного закрепления глинистых грунтов широко рассматриваются в геотехнической практике.

В настоящее время метод ЯМР активно применяется зарубежными исследователями, в частности немецкими учеными в области почвоведения, для изучения почв различного состава и их взаимодействия с водой [120]. Работы направлены на понимание физико-химических процессов, протекающих в них. Одним из ключевых направлений таких исследований выступает разработка неразрушающего метода определения пористости почв и оценки распределения пор по размерам с использованием ЯМР-релаксометрии [120, 154]. Подчеркивается, что чем крупнее пора – тем менее структурирована в ней жидкая фаза. С помощью ЯМР-спектроскопии проводятся также исследования механизмов взаимодействия молекул воды в присутствии различных органических компонент почв (древесина, целлюлоза, органические компоненты торфов и глееватых почв и др.) [143]. Уделяется внимание роли слизистых веществ (биогидрогелей) в формировании почвенных свойств [126]. На примере природных гелей исследуются их взаимодействия с водой в поровом пространстве и влияние на характеристики почв.

2.6 Выводы по главе 2

1. Вода представляет собой жидкий кристалл, особенности строения которого были установлены в начале 30-х годов XX в. английскими учеными Дж. Берналом и Р. Фаулером. Структурная организация объемной воды определяется тетраэдрической координацией молекул, связанных системой водородных связей, что определяет ее аномальные свойства. В дальнейшем, на основании экспериментальных исследований и термодинамических расчетов, были разработаны различные модели воды в объеме, выявлена специфика ее трансформации под воздействием различных физических полей, в том числе активных центров различных кристаллохимических поверхностей (минеральных, металлических, неметаллических и др.), а также под влиянием органических и неорганических соединений.

2. Исследования по формированию структуры воды, отличной от ее свойств в объеме, были впервые наиболее полно проведены Б.В. Дерягиным, Н.В. Чураевым, М.С. Мециком на кварцевых и слюдяных подложках. Эксперименты Б.В. Дерягина и Н.В. Чураева показали, что в

уже тонких кварцевых капиллярах вода приобретает структурированность. Замена подложек с кварца на алюмосиликаты выявила разницу в воздействии на структуру воды, что связано с увеличением числа и интенсивности активных центров. Исследования научной школы М.С. Мецика подтвердили структурированность воды вблизи поверхностей слюдяных подложек (свежерасщипленных и промытых в кипящей воде), что проявляется в снижении диэлектрической проницаемости и повышении теплопроводности молекул воды. Такие преобразования определяются эпитаксиальными и поляризующими активными центрами твердой поверхности минералов. Наиболее сильная степень структурированности поровой воды характерна для глинистых минералов, обладающих наиболее развитой системой энергетически неоднородных активных центров.

3. В настоящее время наиболее информативным и достоверным методом исследования структуры жидкостей и твердых тел кристаллического и аморфного строения выступает метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР), позволяющий регистрировать даже слабые молекулярные взаимодействия, в том числе через анализ времен спин-решетчатой T_1 и спин-спиновой T_2 релаксации. Экспериментальные исследования В.И. Чижика на релаксометре ЭХО-4 подтвердили, что в водных растворах различных электролитов наблюдается связь между природой и концентрацией ионов и степенью структурированности воды.

4. Исследования структурированности поровой воды в различных глинистых грунтах в зависимости от их физического состояния, гранулометрического и минерального состава, а также состава поровых вод с использованием ЯМР-релаксометра ЭХО-4 были впервые выполнены на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Р.Э. Дашко в 80-х годах XX века. Результаты таких экспериментов показали, что в глинистых грунтах даже текучей консистенции вода характеризуется высокой степенью структурированности. Время спин-решетчатой релаксации T_1 для поровой воды глинистых грунтов составило $n \cdot 10^{-3}$ с, что более чем на два порядка ниже, чем для воды в объеме (2,5 с). Увеличение содержания глинистой фракции и присутствие более активных глинистых минералов (монтмориллонит) усиливает степень структурированности поровой воды.

5. Экспериментальные исследования были продолжены с 2022 г. в условиях развития методологии и усовершенствования установок ЯМР (релаксометр ЭХО-12). Полученные данные показали, что поровая вода в водонасыщенных глинистых грунтах различного гранулометрического состава и физического состояния характеризуется различной степенью структурированности в зависимости от удаления от активных центров твердых частиц. Такой вывод основан на результатах измерений времени спин-решетчатой релаксации в центральных частях поры T_{1C} и у поверхности частиц T_{1S}, а также ширине спектральных линий HWHM.

Установлено, что в песчаных грунтах основной объем поровой воды сохраняет свойства, близкие к воде в объеме.

6. Современные экспериментальные исследования с применением ЯМР-релаксометра ЭХО-12 позволили установить закономерности послойного изменения структуры поровой воды в глинистых грунтах не только в зависимости от гранулометрического состава и физического состояния, но и в присутствии биогенной фазы, представленной микроводорослями, микроорганизмами и их основным метаболитом – белками. Экспериментально доказано, что вклад в изменение структуры поровой воды вносит тонкодисперсная фракция, представленная биогенным аморфным кремнеземом диатомовых водорослей, даже при влажности образцов свыше 178%. Максимальное воздействие на структурирование поровой воды до ее перехода в твердообразное состояние оказывает белок – основной продукт жизнедеятельности микроорганизмов, что проявляется в снижении времени спин-решетчатой релаксации до значений $T_{1S} = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ с.

Глава 3 ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ВОДО- И ВОДОГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

3.1 Научно-практические положения теории фильтрационной консолидации

Как уже было сказано ранее, теория и практика проектирования, в том числе расчетов устойчивости оснований, которые представлены водонасыщенными глинистыми грунтами, базируется на модели фильтрационной консолидации К. Терцаги, предложенной еще в 1925 г. [175]. Известно, что основным положением теории служит процесс уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов при оттоке (фильтрации) поровой воды согласно закону Дарси под действием роста нормальных напряжений, определяющих величину градиентов напора. Стоит отметить, что такая теория применяется не только в рамках инженерной геологии, геотехники и механики грунтов, но и при решении некоторых задач в динамике подземных вод [44]. Считается, что наблюдаемый в ряде случаев рост дебитов эксплуатационных скважин во время продолжительных откачек происходит за счет дополнительного поступления подземных вод из глинистых водоупоров при снижении уровня подземных вод на величину S и, соответственно, роста нормальных напряжений на водоупорные толщи ($\sigma_z = \gamma_в S$, где $\gamma_в$ – удельный вес воды).

При математическом обосновании модели фильтрационной консолидации К. Терцаги были сделаны следующие допущения [38, 175]:

• решение одномерной задачи уплотнения водонасыщенного глинистого грунта без возможности его бокового расширения (мощность слоя глинистого грунта h, отнесенная к ширине площади загрузки b, $h/b \leq 0{,}25$);

• глинистые грунты полностью водонасыщены, и поровая вода имеет свойства свободной;

• структурные связи между частицами грунта отсутствуют и приложенные давления в момент времени $t = 0$ полностью передаются на воду, в которой возникает напор $H_0 = (p_2 - p_1)/\gamma_в$ (рисунок 3.1);

• фильтрация воды из глинистого грунта подчиняется линейному закону Дарси под действием градиентов напора:

$$v = -k\frac{\partial H}{\partial l}, \tag{3.1}$$

где v – скорость фильтрации;

$\frac{\partial H}{\partial l}$ – градиент напора;

k – коэффициент фильтрации грунтов.

• в любой момент времени t, отличный от нуля, все внешнее давление $p = p_2 - p_1$ перераспределяется на поровую воду $p_в$ (поровое давление) и скелет грунта $p_{ск}$ (эффективное давление) (рисунок 3.1).

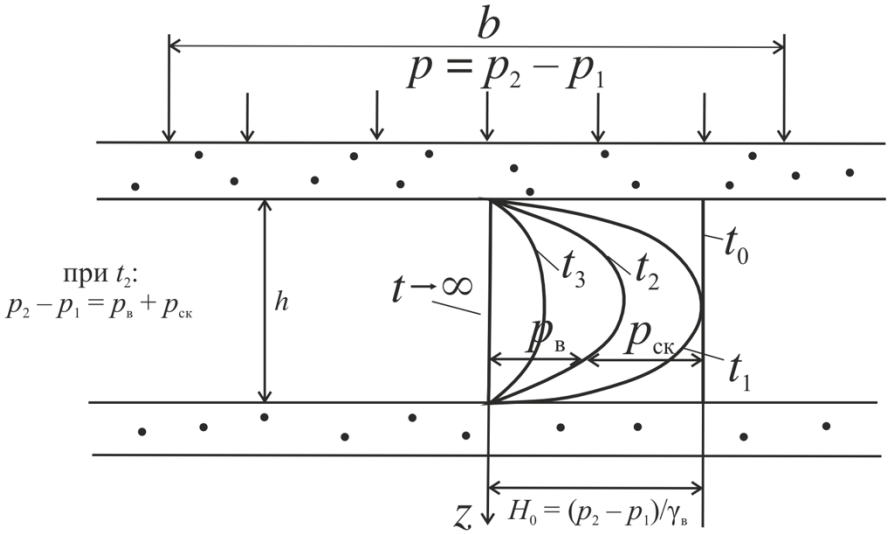


Рисунок 3.1 – Изохроны распределения порового давления по высоте слоя глинистого грунта z для различной продолжительности t действия внешнего давления при двухстороннем оттоке воды (согласно гипотезе К. Терцаги) [38, 175]

Основное уравнение неразрывности для фильтрационного потока связывает увеличение расхода воды (или ее скорости) между двумя сечениями со скоростью уплотнения и уменьшением пористости грунта между ними [38]:

$$-\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t}, \tag{3.2}$$

где v – скорость фильтрации воды;

z – глубина точки по оси z;

e – коэффициент пористости грунта;

t – время уплотнения глинистого слоя h.

Выражение, описывающее процесс фильтрационной консолидации, связывает изменение напоров в поровой воде глинистого грунта во времени t с изменением напоров H по глубине слоя z:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}, \tag{3.3}$$

где C_v – коэффициент консолидации,

$$C_v = \frac{k(1 + e_1)}{a\gamma_в}, \tag{3.4}$$

где e_1 – начальный коэффициент пористости глинистого грунта;

a – коэффициент сжимаемости грунта в интервале давлений $p_2 - p_1$.

Стоит отметить, что позднее в практике механики грунтов было установлено, что при коэффициенте консолидации $C_v \leq 10^7$ см^2/год процесс фильтрационной консолидации протекает настолько медленно, что его влиянием можно пренебречь. В настоящее время это положение используется в СП 22.13330, а также применялось и в его более ранних редакциях при оценке возможности развития уплотнения грунтов за счет оттока поровой воды [93].

Выражение (3.3) представляет собой однородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно величины напора H с постоянным коэффициентом C_v. Дифференциальные уравнения подобного рода решаются с помощью рядов Фурье, находя частные решения и составляя из них общее при определенных граничных условиях:

1) при $t = 0$ $H = H_0 = (p_2 - p_1)/\gamma_w$ по всей мощности глинистого слоя;

2) при $t \neq 0$ и $z = 0$, $z = h$ $H = 0$, при z, отличном от h, решение уравнения (3.3) имеет следующий вид [38]:

$$H = \frac{4p}{\pi\gamma_в} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m} \mathrm{e}^{-m^2 T_v} \sin m\pi \frac{z}{h}, \tag{3.5}$$

где T_v – фактор времени, равный $\pi^2 C_v t/h^2$, являющийся безразмерной величиной.

Принимая во внимание, что $p_{ск} = p - H\gamma_в$, получается следующая зависимость:

$$p_{ск} = p\left(1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m} \mathrm{e}^{-m^2 T_v} \sin m\pi \frac{z}{h}\right) \tag{3.6}$$

Известно, что осадка слоя S грунта мощностью h рассчитывается согласно формуле:

$$S = \varepsilon_n h, \tag{3.7}$$

где ε_n – относительная деформация элементарного слоя мощностью h:

$$\varepsilon_n = \frac{a p_{ск}}{1 + e} \tag{3.8}$$

Тогда осадка к моменту времени t составит:

$$S(t) = \int_0^h \varepsilon_n(t) dz = \int_0^h \frac{a p_{ск}}{1 + e} dz \tag{3.9}$$

Решение выражения (3.9) позволяет определить зависимость величины осадки во времени:

$$S(t) = \frac{aph}{1 + e}\left(1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^2} \mathrm{e}^{-m^2 T_v}\right) \tag{3.10}$$

Множитель, заключенный в скобки, зависит только от T_v, следовательно, формула (3.10) может быть представлена в следующем виде:

$$S(t) = S_к U(T_v), \tag{3.11}$$

где $S_к$ – конечная осадка;

$U(T_v)$ – степень уплотнения глинистого грунта.

Таким образом, степень уплотнения U показывает относительную часть конечной осадки слоя h на момент времени t. Только при $t \to \infty$ и $T_v \to \infty$ выполняется условие U = 1 и $S(t) = S_к$, что не соответствует действительности.

Развитие теории фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов проводилось рядом ученых: Н.М. Герсевановым, В.А. Флориным, Н.А. Цытовичем, Н.Н. Масловым, З.Г. Тер-Мартиросяном, Ю.К. Зарецким, М.Ю. Абелевым, С.А. Розой, М.Н. Гольдштейном, Е.И. Медковым, П.Л. Ивановым, А.Л. Гольдиным, А.И. Ксенофонтовым, И. Рендуликом, М.Э. Био, Н. Карилло, Р. Гибсоном и др. (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Развитие положений теории фильтрационной консолидации [55, 71, 72, 104, 107]

Авторы	Годы начала работы	Модели водонасыщенных глинистых грунтов
К. Терцаги	с 1925 г.	Идеальная, без учета структурных связей и особых свойств поровой воды
В.А. Флорин	с 1937 г.	С учетом прочности скелета грунта, его ползучести, начального градиента напора
Н.А. Цытович	с 1951 г.	
Н.Н. Маслов	с 1949 г.	Применимость процесса фильтрационной консолидации только для водонасыщенных глинистых грунтов нарушенного сложения текучих и текучепластичных консистенций
Ю.К. Зарецкий	с 1967 г.	При коэффициенте водонасыщения грунтов $S_r < 0{,}95$ поровое давление не возникает, учет аномальных свойств воды, определяющих значение начального градиента напора
З.Г. Тер-Мартиросян	с 1960-х гг.	Учет сжимаемости минеральной части, воды и газовой составляющей
М.Ю. Абелев	с 1971 г.	Учет структурной прочности и начального градиента напора
А.И. Ксенофонтов	с 1968 г.	Релаксационная теория консолидации

Так, развитие теории фильтрационной консолидации шло по пути введения в расчетную модель глинистого грунта начального градиента напора $I_н$, связанного с аномальными свойствами воды, ограничением применения такой теории для определенных типов глинистых грунтов, рассмотрением вопросов о возможности сжимаемости скелета, поровой воды, газовой ее составляющей, анализа протекания консолидации за счет оттока воды и за счет ползучести скелета грунта, а также с применением иных принципов. Так, например, необходимо отметить работы А.И. Ксенофонтова, в которых используются реологические модели для описания деформационного поведения водонасыщенных глинистых грунтов как однофазных сред, то есть при полном отсутствии «активной зоны фильтрационной консолидации», при значениях их коэффициента фильтрации k менее 10^{-3} м/сут [61, 62, 63].

Анализ таблицы 3.1 показывает, что практически все авторы, развивающие положения теории фильтрационной консолидации, ссылаются на наличие начального градиента напора $I_н$ в

водонасыщенных глинистых грунтах за счет аномальности свойств поровой воды в таких отложениях. Известно, что параметр $I_н$ зависит от гранулометрического и минерального состава глинистых грунтов, их плотности и влажности, а также температуры. При фильтрации через глинистые грунты аполярных жидкостей без водородных связей (ацетон, хлороформ, толуол и др.) начального градиента фильтрации не наблюдается. Известно, что зависимость скорости фильтрации от градиента напора разделена на несколько областей, представленных на рисунке 3.2.

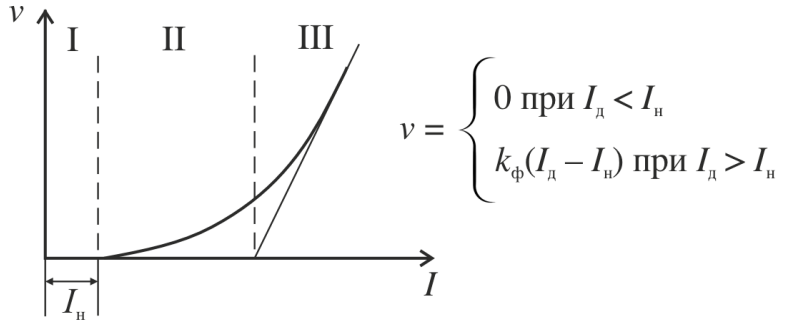


Рисунок 3.2 – Зависимость скорости фильтрации воды v от действующего градиента напора $I_д$ в глинистых грунтах: I – зона нулевой скорости фильтрации; II – зона малых скоростей фильтрации и нелинейной зависимости между v и I; III – зона высоких скоростей фильтрации и квазилинейной связи между параметрами v и I

Таким образом, начальный градиент фильтрации $I_н$ представляет собой параметр, связанный с учетом структурирования поровой воды, который впервые был предложен еще в 1899 г. Ф. Кингом, как дополнение к закону Дарси [147].

Вполне понятно, что значение $I_н$ необходимо сопоставлять с градиентами, существующими в реальных природных условиях. Большой объем экспериментальных исследований по определению величины $I_н$ был выполнен под руководством В.М. Гольдберга для глинистых грунтов различного минерального состава и состава обменных катионов. Для монтмориллонитовых глин были получены наиболее высокие значения: варьирование $I_н$ наблюдалось в пределах до 33 для их Ca^{2+}-форм и до 100 для Na^{+}-форм, что вполне отвечает проведенным исследованиям степени инертности поровой воды по отношению к действию гидростатического давления столба воды при постоянстве физических параметров глинистых грунтов [16]. При этом природные монтмориллонитовые глины характеризовались значениями $I_н$ около 50, в то время как для гидрослюдистых разностей этот параметр составлял от 15 до 40 [16].

Здесь же следует остановиться на определении коэффициента фильтрации $k_ф$, входящего в расчет определения коэффициента консолидации C_v (формула (3.4)), который в механике грунтов определяет возможность развития процесса фильтрационной консолидации.

Коэффициент фильтрации $k_ф$ для глинистых грунтов чаще всего определяется в лабораторных условиях с использованием компрессионно-фильтрационных приборов, реже – в полевых условиях. Выполнение лабораторных определений $k_ф$ в глинистых грунтах возможно только при действии достаточно высоких значений $I_д$, часто не соответствующих реальным условиям. В полевых условиях, напротив, изучение коэффициента фильтрации с помощью наливов в шурфы должно сопровождаться оценкой механизма движения воды в толще глинистых грунтов. При этом параметр $I_н$ определяется при фильтрации в поровом пространстве в условиях действия столба воды при постоянстве объема, плотности, влажности и пористости образца.

Интересно отметить опыты Р.Э. Дашко с наливами воды в шурфы, проведенные для оценки характера фильтрации в глинистых грунтах – водонасыщенных тяжелых суглинках озерно-аллювиального происхождения мягкопластичной консистенции. Такие суглинки залегали в зоне основания шламохранилища обогатительной фабрики калийных солей [35]. Наливы осуществлялись с использованием красящего органического вещества – эозина – яркого красно-оранжевого цвета, который не сорбируется глинистыми отложениями, а лишь фиксирует пути трассирования воды. В результате проведения таких опытов было установлено, что фильтрация в глинистых грунтах основания осуществлялась преимущественно по поверхностям ослабления и существующим тонким трещинам (вертикальным, наклонным, горизонтальным), которые не различимы визуально. Поровая фильтрация наблюдалась в сантиметровом слое в донной части шурфа контакта «вода – грунт», как показано на рисунке 3.3.

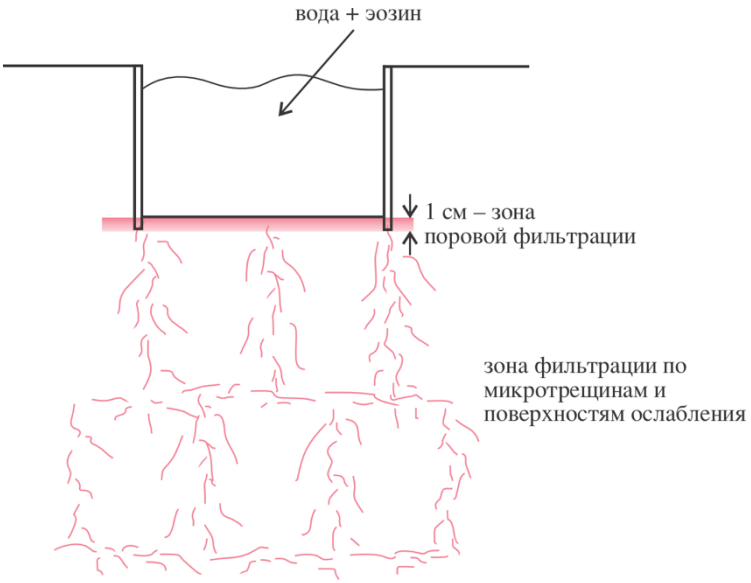


Рисунок 3.3 – Схематичное изображение фильтрации воды с эозином в толще глинистых грунтов мягкопластичной консистенции при наливах в шурфы

Такие опыты позволили обосновать физико-химическую модель взаимодействия хлоридно-натриевых рассолов (минерализация > 270 г/л) обогатительной фабрики калийных

солей с трещиновато-блочной средой глинистых грунтов в основании шламохранилища и достоверно оценить факторы, влияющие на увеличение проницаемости отложений.

Встает вопрос о возможности использования начального градиента напора $I_н$ при прогнозировании условий возможности уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов под действием давления от сооружения, поскольку в основании наблюдаются деформации грунта. При этом критерии определения $I_н$ предполагают неизменность таких свойств грунтов, как плотность, влажность и пористость.

Определение начального градиента напора $I_н$ не предполагает перераспределения давления, создаваемого столбом воды, между скелетом грунта и поровой водой: передача давления идет полностью на воду, учет структурных связей не принимается во внимание. Значение имеют размер пор и в меньшей степени их морфология; принципиально важный аспект – их сообщаемость. Для корректной оценки необходимы знания о степени агрегирования (диспергирования) грунта, а также об активных центрах различных фаз грунта, влияющих на структурирование поровой воды.

При действии внешнего давления через фундамент, штамп или непосредственно от земляных сооружений необходимо рассматривать перераспределение давления между скелетом и поровой водой. При этом следует учитывать, что давление в поровой воде возникает только при условии разрушения структурных связей.

В связи с этим при воздействии на глинистые грунты жестким штампом ключевое значение приобретает параметр градиента начала фильтрационной консолидации – $I_{нфк}$ [35, 39]. Фильтрационная консолидация водонасыщенных глинистых грунтов возможна только в случае превышения действующим градиентом напора $I_д$ значения $I_{нфк}$. Параметр $I_{нфк}$ был предложен ранее в 1977 г. и успешно использован при обосновании длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности оградительных дамб в южной части защитных сооружений от наводнений в Санкт-Петербурге (между островом Котлин и городом Ломоносовым), которые успешно эксплуатируются почти 50 лет.

Для количественной оценки $I_{нфк}$ изучалось поведение двух идентичных образцов грунта при различных условиях оттока воды. Первый образец уплотнялся при свободном оттоке поровой воды, второй – при отсутствии дренирования, с измерением порового давления системой иглодатчиков в условиях одномерного сжатия [39]. Расхождение в показаниях иглодатчиков, свидетельствующих о начале оттока воды из образца, позволило оценить величину градиента начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$.

Проведенные многочисленные экспериментальные исследования различных типов водонасыщенных глинистых грунтов дали возможность установить эмпирическую зависимость градиента начала фильтрационной консолидации [35, 39]:

$$I_{\text{нфк}} = \text{A}\sqrt{M_c} \tag{3.12}$$

Значение коэффициента *A* зависит прежде всего от соотношения пылеватой и непылеватой фракций и степени литификации грунта (таблица 3.2).

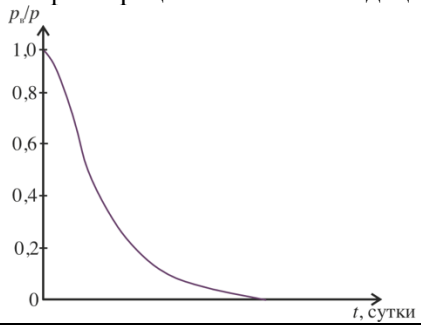
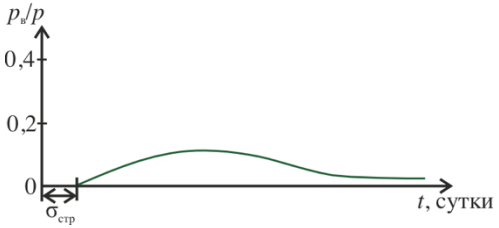
Таблица 3.2 – Значение коэффициента *A* для различных типов глинистых грунтов [35]

Степень литификации глинистого грунта	Разность пород	
	пылеватые	непылеватые
Малая	70-100	50-70
Средняя	120-150	100-200

Стоит отметить, что в таблице 3.1 значения множителя *A* приведены для гидрослюдистых разностей водонасыщенных глинистых грунтов. В присутствии глинистых минералов группы монтмориллонита данный показатель будет принимать более высокие значения.

Следует еще раз подчеркнуть, что в отношении водонасыщенных глинистых грунтов К. Терцаги не вводит каких-либо ограничений с точки зрения возможности протекания фильтрационной консолидации в различных типах глинистых грунтов. Однако приведенный анализ показывает, что для тонкодисперсных отложений необходимо учитывать их физическое состояние. При влажности, составляющей 1,1–1,2 W_P, поровая вода оказывается настолько структурированной, что метод ЯМР уже не воспринимает ее как среду, обладающую свойствами жидкости. Соответственно, в практике эксплуатации гражданских, промышленных, гидротехнических и других типов наземных сооружений при реальных (низких) градиентах напора такая поровая вода не способна к удалению из грунта. Обобщенная схема различий в подходах к анализу процесса фильтрационной консолидации приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сводная таблица подходов к анализу процесса фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов

Критерии сравнения	Допущения модели фильтрационной консолидации К. Терцаги	Предлагаемые позиции, основанные на проведенном научно-практическом анализе
Решение одномерной задачи уплотнения	Рассматривается в классической теории	Анализируется при использовании параметра градиента начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$
Состояние грунта	Водонасыщенное, поровая вода имеет свойства свободной (гравитационной)	Водонасыщенное, поровая вода имеет кристаллохимическое строение с различной степенью структурированности** под действием групп активных центров ** – *структурированность воды в глинистых грунтах определена экспериментально с помощью метода ЯМР*
Наличие структурных связей	Отсутствуют, что определяет характер распределения внешнего давления*	Присутствуют структурные связи различной природы и прочности, определяющих степень подвижности (деформирования) грунтов и перераспределения внешнего давления между скелетом и водой
Характер фильтрации воды и закономерности изменения порового давления	Фильтрация воды подчиняется закону Дарси. Поровое давление $p_в$ возникает мгновенно при его относительной величине $p_в/p = 1{,}0$, а затем снижается до нуля по мере завершения процесса фильтрационной консолидации 	Необходимо учитывать градиент начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$. Поровое давление $p_в$ развивается постепенно (но не с нулевого момента времени), по мере разрушения структурных связей прочностью $\sigma_{стр}$ во времени t, и его относительная величина $p_в/p$ не достигает 1,0. Максимальные значения $p/p_в$ зависят от гранулометрического и минерального состава грунта, его физического состояния, числа активных центров и др. Снижение порового давления происходит до остаточных значений 
Основной вывод	Невозможность прямого применения задачи одномерного сжатия в реальных условиях при отсутствии в них аномально высоких градиентов напора, характерных для компрессионных приборов	Необходимость перехода на задачи двух- и трехмерного сжатия грунтов в условиях реальных низких градиентов напора, при которых поровая вода инертна по отношению к внешнему давлению и работает совместно с твердой частью грунта, что определяет их деформационное поведение во времени

**Примечание*. Наличие структурных связей согласно модели школы механики грунтов Н.А. Цытовича приводит к радикальному изменению развития порового давления во времени в условиях превышения внешнего воздействия над прочностью структурных связей

3.2 Научно-практические положения ревизии теории фильтрационной консолидации на основе анализа экспериментальных данных структуры поровой воды в многофазных глинистых грунтах

Как уже было доказано ранее, необходимо принимать во внимание наличие системы активных центров в различных фазах водонасыщенных тонкодисперсных отложений, под действием физических полей которых происходит преобразование структуры поровой воды. Как показали исследования, выполненные с помощью метода ЯМР, поровая вода в глинистых грунтах имеет высокую степень структурированности. В определенных разностях она не фиксируется как жидкообразная фаза и по своим свойствам приближается к твердому телу. Такое состояние воды, которое создает определенные ограничения при передаче внешнего давления на поровую воду, отвечает тугопластичной консистенции глинистых грунтов средней степени литификации. Следует подчеркнуть, что приведенный вывод правомочен только для глинистых разностей, в которых преобладают минералы групп каолинита и гидрослюд. Присутствие высокоактивных глинистых минералов, а также кремнезема биогенного и вулканического происхождения, микроорганизмов и белков в тонкодисперсных отложениях исключает наличие жидкообразных свойств поровой воды, что определяет необходимость проведения специального анализа ее структурированности. Установленные закономерности определяют такую степень инертности, при которой поровая вода оказывается неспособной воспринимать действие внешнего давления.

Экспериментальные исследования относительных величин поровых давлений $p_в / p$ в условиях одномерной задачи уплотнения в образцах с различным содержанием глинистой фракции M_c и близкими физическими состояниям показали идентичность снижения $p_в / p$ по мере увеличения степени структурированности поровой воды и, соответственно, степени ее инертности по отношению к давлению p (рисунок 3.4).

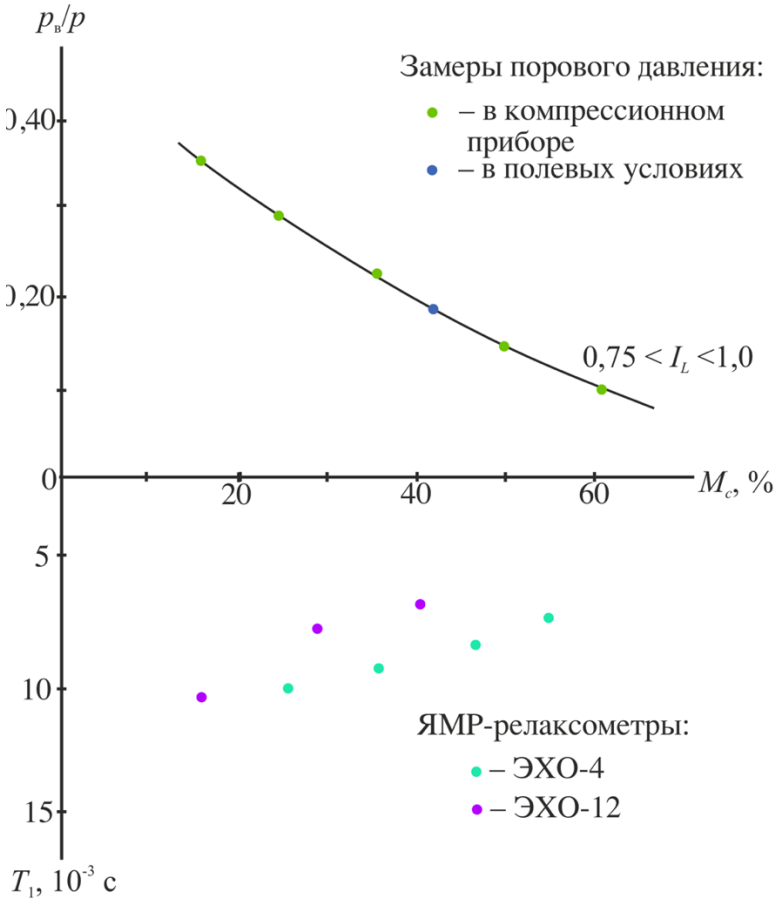


Рисунок 3.4 – Закономерности изменения относительной величины порового давления $p_в$ / p текучепластичных пылеватых глинистых грунтов и времени спин-решетчатой релаксации T_1 в зависимости от содержания глинистой фракции M_c

По мере увеличения содержания глинистой фракции M_c, которая определяет и время спин-решетчатой релаксации T_1, снижается и относительная величина порового давления $p_в$ / p. Анализ рисунка 3.3 дает возможность установить, что при уменьшении T_1 в узком диапазоне (примерно в 1,5 раза) снижение $p_в$ / p достигает 3,5 раз, что свойственно для глинистых грунтов (тонкодисперсная фракция которых представлена преимущественно гидрослюдой) текучепластичной консистенции – от легких суглинков до глин.

На рисунке 3.5 приведены зависимости изменения относительной величины порового давления $p_в$ / p и времени спин-решетчатой релаксации T_1 от состояния грунтов по показателю консистенции (от мягкопластичного до текучего) для суглинков тяжелых пылеватых (M_c = 28%, а) и глин пылеватых (M_c = 40%, б).

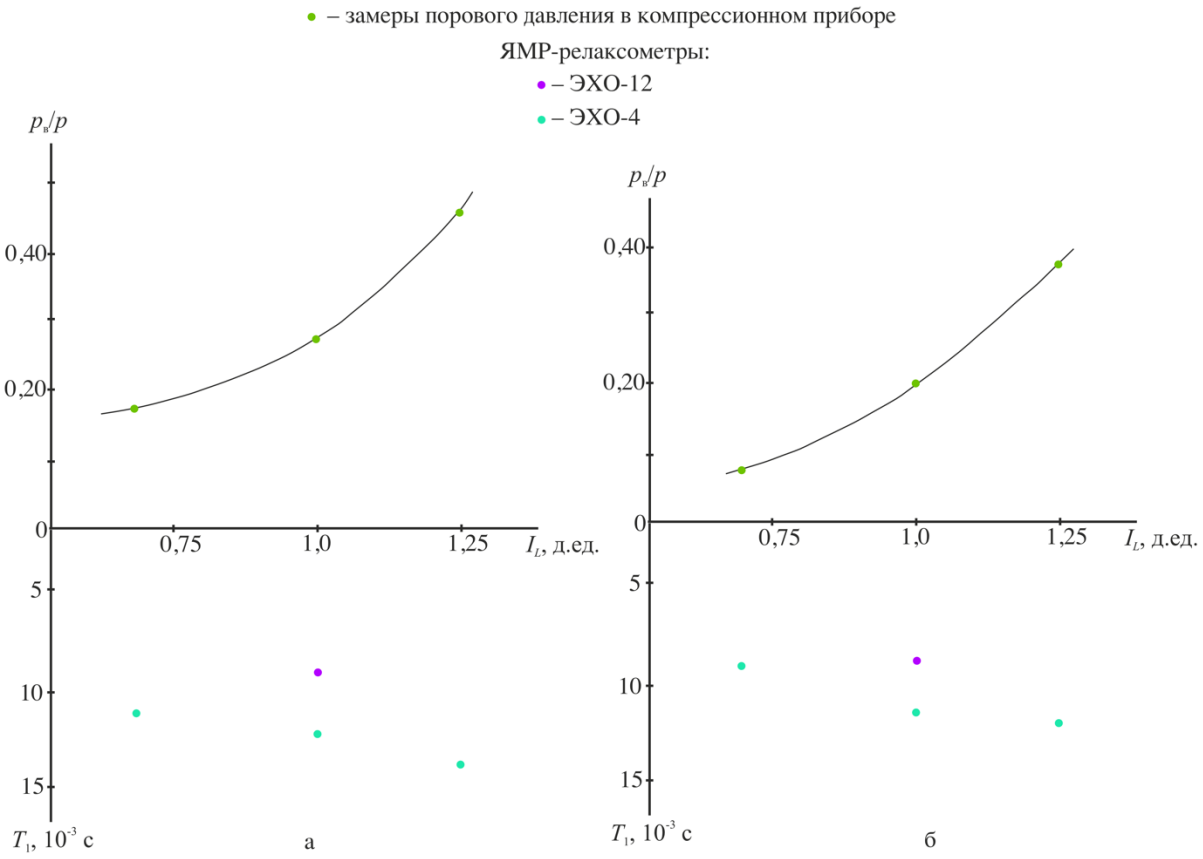


Рисунок 3.5 – Закономерности изменения относительной величины порового давления $p_в / p$ и времени спин-решетчатой релаксации T_1 в зависимости от показателя консистенции I_L для суглинков тяжелых пылеватых (M_c = 28%) (а) и глин пылеватых (M_c = 40%) (б)

Согласно рисунку 3.5, для пылеватых глин в мягкопластичном состоянии величина порового давления $p_в / p$ снижается до крайне низких значений. При этом данное состояние фиксируется при времени спин-решетчатой релаксации $T_1 \approx 8 \cdot 10^{-3}$ с, что может служить критерием для таких грунтов, при котором поровое давление практически не развивается даже в лабораторных условиях.

Следует отметить, что усиление степени инертности поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах различного физического состояния по отношению к действию внешнего давления прослеживается не только при росте глинистой фракции как основного носителя активных центров и при изменении ее минерального состава. Полученные в главе 2 закономерности уменьшения времени спин-решетчатой релаксации T_1 также позволяют сделать вывод об усилении инертности поровой воды к действию давления p в присутствии тонкодисперсной фракции, представленной биогенным аморфным кремнеземом (с позиций минерального состава грунтов). Его влияние на структурированность поровой воды превышает влияние монтмориллонита. Как уже отмечалось ранее, створки диатомовых микроводорослей сложены биогенным кремнеземом, при этом такие водоросли присутствуют в донных

отложениях морских и пресноводных бассейнов различных климатических зон, в том числе на северо-западе России.

Присутствие биогенной составляющей – микроорганизмов и продуктов их метаболизма (прежде всего белков) – также вносит дополнительный вклад в структурирование поровой воды водонасыщенных тонкодисперсных отложений и, как следствие, в снижение относительной величины порового давления $p_в$ / p.

Изучение структуры воды в водонасыщенных тонкодисперсных отложениях, рассмотренное в предыдущей главе, и степень ее инертности по отношению к внешнему давлению имеют определяющее значение при оценке, анализе и прогнозировании длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности наземных сооружений различного назначения и уровня капитальности, в основании которых залегают водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты различного генезиса и возраста. Анализ строительства и эксплуатации наземных сооружений различного назначения, возведенных на таких глинистых грунтах, позволяет выявить, что в ряде случаев основания сооружений переходят в ограниченно-работоспособное и/или аварийное состояние вследствие развития значительных по величине длительных и неравномерных абсолютных и относительных деформаций [30, 45, 111, 112].

3.3 Основные положения проектирования сооружений по предельным состояниям

Как известно, согласно действующей в настоящее время нормативной документации, проектирование сооружений различного назначения осуществляется по двум группам предельных состояний – первой и второй.

Проектирование сооружений по первой группе предельных состояний (по несущей способности) ориентировано на состояние, приводящее к полной непригодности сооружений к эксплуатации. Согласно СП 22.13330 целью расчета оснований по несущей способности выступает обеспечение прочности и устойчивости оснований, а также недопущение сдвига фундамента по подошве и его опрокидывания [93]. Проектирование сооружений различного назначения по I-му предельному состоянию применяется при: действии больших горизонтальных нагрузок, строительстве сооружения вблизи откоса, котлована, залегании скальных грунтов в основании, водонасыщенных органоминеральных и органических, а также при возрастании давлений от сооружений при их реконструкции [93]. Следует отметить, что в данной работе рассматриваются наземные сооружения, строительство и эксплуатация которых реализованы только в пределах распространения водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных грунтов малой и частично средней степени литификации.

При проектировании оснований сооружений по первой группе предельных состояний расчет осадки не выполняется. Необходимо определение и назначение допускаемого давления, при котором исключается формирование единой поверхности скольжения и выпор грунта из-под

подошвы фундамента, приводящие к разрушению сооружения. Такое давление близко к давлению p_2, согласно кривой Н.М. Герсеванова (рисунок 3.6). Величина критических давлений на основание сооружения определяет глубину зон предельного равновесия.

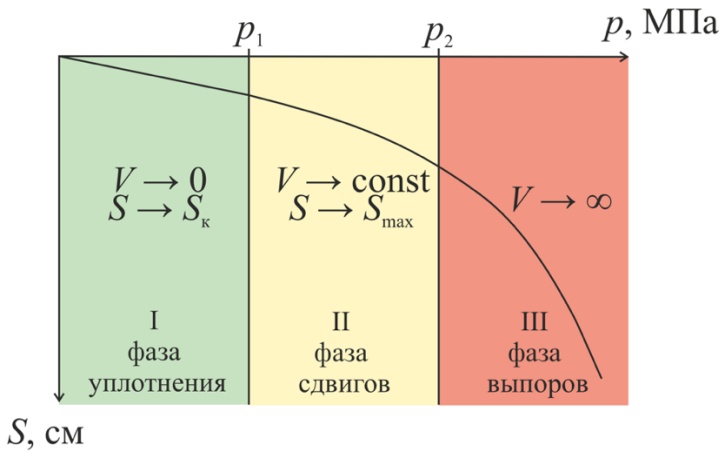


Рисунок 3.6 – Характер развития деформаций S от действующего давления p согласно Н.М. Герсеванову, где V – скорость развития деформаций (составлено автором на основе [38, 39])

Следует подчеркнуть, что давления p_1 и p_2 имеют свой физический смысл. Для первого критического давления p_1 характерно лишь зарождение зон предельного равновесия в точках под краями фундамента [38, 39]. Давления p_2 соответствует формированию единой поверхности скольжения при весомой роли касательных составляющих напряжений [38, 39]. Расчеты несущей способности в таких условиях чаще всего проводятся согласно теории предельного равновесия. Ключевыми параметрами при этом выступают значения сопротивления сдвигу грунтов, характеризуемые сцеплением c и углом внутреннего трения φ.

Расчет осадок при проектировании сооружений по второй группе предельных состояний выполняется при условии использования модели линейно-деформируемой среды, которая предполагает наличие однозначной связи между давлением и деформациями и при обязательном условии затухания осадок во времени [38, 39, 93]. При этом глубина зоны предельного равновесия не превышает 0,25 ширины фундамента b. Величина рассчитываемой конечной осадки $S_к$ не должна превышать предельно допускаемых значений, которые назначаются в зависимости от конструктивных особенностей сооружений, материалов стен, а также типов фундаментов. Вполне понятно, что при проектировании наземных сооружений по II-му предельному состоянию используются давления значительно меньшие по величине, чем давление p_2, согласно действующим нормативным документам. Безопасность проектирования при этом обеспечивается использованием расчетного сопротивления грунтов основания R, величина которого должна быть равна или больше проектного давления $p_с$. В литературе встречаются замечания о том, что расчетное сопротивление представляет собой эмпирическую

зависимость и не имеет физического смысла. Однако такой взгляд представляется не в полной мере отражающим реальное состояние проблемы обоснования параметра *R*.

Следует отметить, что давление, соответствующее расчетному сопротивлению *R*, имеет математическое обоснование, которое базируется на условии предельного равновесия для грунтов, обладающих параметрами угла внутреннего трения φ и сцепления *c*, либо только φ, согласно теории прочности грунтов Кулона-Мора выражается следующим образом [38, 107]:

$$\sin\theta_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 + \frac{2c}{\mathrm{tg}\varphi}} = \sin\varphi, \tag{3.13}$$

где θ_{max} – максимальный угол отклонения;

σ_1, σ_2 – величины максимальных и минимальных главных напряжений:

$$\sigma_1 = \sigma_1^g + \sigma_1^c \tag{3.14}$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^g + \sigma_2^c, \tag{3.15}$$

где σ_1^g, σ_2^g – главные напряжения от собственного веса грунтов;

σ_1^c, σ_2^c – главные напряжения от веса сооружения.

Вывод уравнения реализуется в условиях гидростатического закона распределения напряжений от собственного веса грунтов при коэффициенте боковой деформации $\mu \to 0{,}5$ и соответственно коэффициенте бокового давления $\xi \to 1$:

$$\sigma_1^g = \sigma_2^g = \gamma' h_\phi + \gamma z \tag{3.16}$$

где γ' и γ – удельный вес грунта выше и ниже отметки дна котлована соответственно;

h_ϕ – глубина заложения фундамента;

z – глубина залегания точки расчета σ_1^g и σ_2^g.

Главные напряжения от веса сооружения при значении угла видимости 2β находятся с помощью следующих выражений:

$$\sigma_1^c = \frac{p - \gamma' h_\phi}{\pi}(2\beta + \sin 2\beta) \tag{3.17}$$

$$\sigma_2^c = \frac{p - \gamma' h_\phi}{\pi}(2\beta - \sin 2\beta) \tag{3.18}$$

Тогда величины суммарных напряжений $\sigma_1 = \sigma_1^g + \sigma_1^c$ и $\sigma_2 = \sigma_2^g + \sigma_2^c$ составят:

$$\sigma_1 = \gamma' h_\phi + \gamma z + \frac{p - \gamma' h_\phi}{\pi}(2\beta + \sin 2\beta) \tag{3.19}$$

$$\sigma_2 = \gamma' h_\phi + \gamma z + \frac{p - \gamma' h_\phi}{\pi}(2\beta - \sin 2\beta) \tag{3.20}$$

Подставив (3.19) и (3.20) в (3.13), получается следующее выражение:

$$\sin\theta_{max} = \frac{\frac{p - \gamma' h_\phi}{\pi}\sin 2\beta}{\frac{p - \gamma' h_\phi}{\pi}2\beta + \gamma' h_\phi + \gamma z + \frac{c}{\mathrm{tg}\varphi}} = \sin\varphi, \tag{3.21}$$

Зависимость для определения глубины зоны предельного равновесия z, исходя из выражения (3.21), может быть найдена согласно зависимости:

$$z = \frac{p - \gamma' h_ф}{\gamma\pi}\left(\frac{\sin 2\beta}{\sin\varphi} - 2\beta\right) - \frac{c}{\gamma \mathrm{tg}\varphi} - h_ф \frac{\gamma'}{\gamma} \tag{3.22}$$

Определение максимальной глубины зоны предельного равновесия z_{max} осуществляется путем поиска производной выражения (3.22) по величине β и приравнивания ее к нулю, в результате чего получается, что $\cos 2\beta = \sin\varphi$, что достигается при $2\beta = \pi/2 - \varphi$. Проверка знака второй производной подтверждает, что найденная точка соответствует максимуму функции. Тогда выражение (3.22) можно переписать в виде:

$$z_{max} = \frac{p - \gamma' h_ф}{\gamma\pi}\left(\mathrm{ctg}\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi\right) - \frac{c}{\gamma \mathrm{tg}\varphi} - h_ф \frac{\gamma'}{\gamma} \tag{3.23}$$

Из уравнения (3.23) при $\gamma' = \gamma$ выводится зависимость для расчета давления p_{max} при максимальной глубине распространения зоны предельного равновесия:

$$p_{max} = \frac{\gamma\pi}{\mathrm{ctg}\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi}\left(z_{max} + h_ф + \frac{c}{\gamma \mathrm{tg}\varphi}\right) + \gamma h_ф \tag{3.24}$$

Линейная связь между давлением и осадками определяет I-ую фазу развития деформаций, что теоретически ограничивается первым критическим давлением p_1. Величина p_1 определяется по формуле Н.П. Пузыревского как совершенно безопасное давление при $z_{max} = 0$ для формулы (3.24):

$$p_1 = \frac{\pi\left(\gamma' h_ф + \frac{c}{\mathrm{tg}\varphi}\right)}{\mathrm{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma' h_ф, \tag{3.25}$$

Такое давление было названо безопасным, поскольку локальные зоны разрушения грунта способы только зарождаться под действием касательных напряжений под краями фундаментов (при $\varphi > 0°$).

Совершенствование методологии расчета оснований сооружений определялось поиском экономически целесообразных решений, допускающих увеличение давлений на грунт при соблюдении следующих условий: сохранения линейности между давлением и деформациями, а также стабилизации осадок во времени.

Для грунтов, характеризующихся параметрами сцепления c и углом внутреннего трения φ, либо только φ, возможно повышение расчетного сопротивления основания. Это достигается учетом развития глубины зон предельного равновесия до $z_{max} = 0{,}25b$, при этом формула (3.24) при $\gamma \neq \gamma'$ преобразуется в выражение по определению допускаемого давления, отвечающего расчетному сопротивлению [38]:

$$R = \frac{\pi}{\mathrm{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}\left(0{,}25b\gamma + \frac{c}{\mathrm{tg}\varphi} + \gamma' h_ф\right) + \gamma' h_ф \tag{3.26}$$

Позднее формула (3.26) была дополнена эмпирическими коэффициентами γ_{c1}, γ_{c2} и k_z и схематизирована полученными параметрами как расчетное сопротивление грунта основания R, определяющего возможность использования модели линейно-деформируемой среды для расчета осадок (согласно СП 22.13330.2016) [93]:

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k}\left(M_\gamma k_z b\gamma_{II} + M_q d_I \gamma'_{II} + \left(M_q - 1\right)d_b\gamma'_{II} + M_c c_{II}\right), \quad (3.27)$$

где γ_{c1}, γ_{c2} – коэффициенты условий работы, зависящие от типа грунта основания, конструктивных особенностей сооружений и их размеров;

d_I, d_b – глубина заложения фундамента и подвала соответственно;

k_z – коэффициент, используемый для больших в плане фундаментов ($b \geq 10$ м);

M_c, M_q, M_γ – постоянные коэффициенты, зависящие только от φ, выводимые при упрощении записи формулы (3.31):

$$M_\gamma = \frac{0{,}25\pi}{\mathrm{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \quad (3.28)$$

$$M_q = 1 + \frac{\pi}{\mathrm{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \quad (3.29)$$

$$M_c = \frac{\pi\mathrm{ctg}\varphi}{\mathrm{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \quad (3.30)$$

Как следует из анализа формул (3.26) и (3.27) для определения R, его значение во многом зависит от параметров сопротивления сдвигу – c и, прежде всего, φ.

Принимая во внимание, что для квазипластичных грунтов, в которых отсутствует трение и $\varphi \to 0°$ (φ < 5-7°), разность главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 = 2c$ и, подставив в это выражение формулы (3.19) и (3.20), получится величина давления, при котором возникают пластические деформации [38]:

$$p = \frac{\pi c}{\sin 2\beta} + \gamma' h_\text{ф}, \quad (3.31)$$

Минимальное значение такого давления достигается при максимальном значении sin2β и, соответственно, $2\beta = \pi/2$. При этом условии равенство (3.31) будет иметь вид:

$$p_\text{кр} = \pi c + \gamma' h_\text{ф}, \quad (3.32)$$

Уравнение (3.32) известно как формула Л. Прандтля и отвечает значению первого критического давления p_1 для квазипластичных грунтов. Следует иметь в виду, что в таких отложениях зона предельного равновесия имеет форму полуокружности, радиусом которой служит полуширина фундамента $b/2$ (рисунок 3.7).

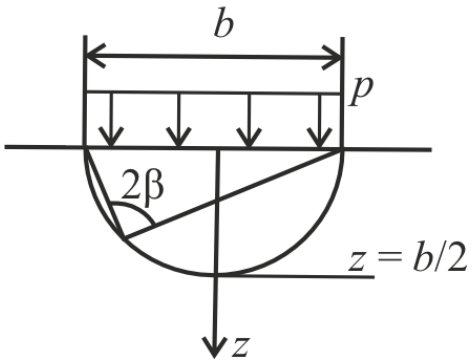


Рисунок 3.7 – Схема определения глубины зоны предельного равновесия в квазипластичных грунтах, обладающих только сцеплением [38]

Следовательно, при наличии в основании квазипластичных грунтов величина давления от сооружения должна быть меньше, чем значение p_1, чтобы предотвратить формирование зон предельного равновесия на глубину $b/2$ (где b – ширина фундамента) и отдавливание грунтов из-под подошвы фундамента.

Значения φ и c определяются методикой испытаний образцов, а также применяемой аппаратуры в лабораторных (одноплоскостной сдвижной прибор или прибор трехосного сжатия) и полевых условиях. Совершенствование методики испытаний грунтов для определения φ и c рассмотрено в главе 4.

3.4 Анализ условий строительства и эксплуатации сооружений, проектируемых по II-му предельному состоянию

В данном разделе выполнен анализ случаев перехода наземных сооружений различного назначения в ограниченно-работоспособное и аварийное состояние при их возведении на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах. Стоит отметить, что проектирование всех рассматриваемых объектов проводилось согласно действующим нормативным документам, что важно прежде всего при назначении параметров сопротивления сдвигу грунтов основания и показателей их деформационных свойств, используемых в расчетах устойчивости (при определении расчетного сопротивления и величины осадки).

История возведения лабораторного корпуса на водонасыщенных моренных отложениях с незначительным содержанием крупнообломочных включений (gIIIos) средней мощностью 10 м, подстилаемых нижнекембрийскими «синими» глинами (Є$_1$sv), показывает, что деформации здания в течение всего 14-летнего периода наблюдений характеризовались постоянной скоростью развития (рисунок 3.8). Процесс подобного деформирования обычно возникает в случаях, когда действующее давление на основание p_c превышает величину расчетного сопротивления грунта R, что указывает на работу грунтов в стадии сдвига (соответствующей II фазе на кривой Н.М. Герсеванова).

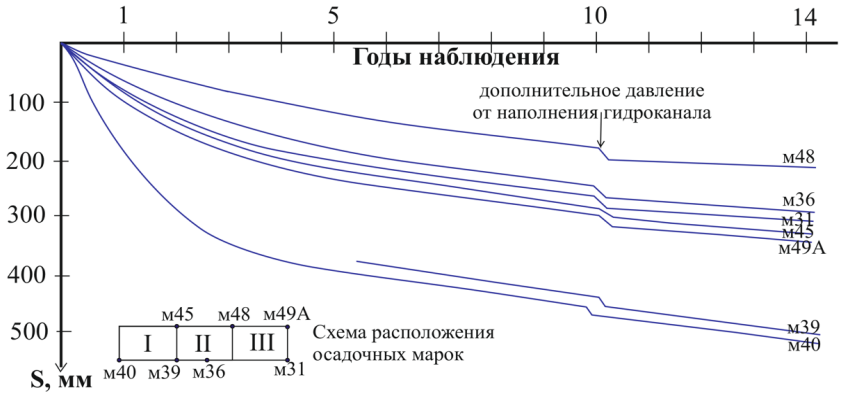


Рисунок 3.8 – Развитие осадок здания лабораторного комплекса в течение 14 лет наблюдений [35]

Четырнадцатиэтажный комплекс был построен на железобетонной плите размером 20×104 м, разделенной деформационными швами на три блока. Фундаментная плита была заглублена на 5 м от дневной поверхности. Давление, передаваемое сооружением на основание, составило p_c = 0,43 МПа.

В ходе проектирования величина расчетного сопротивления основания R была определена на основе использования параметров сопротивления сдвигу моренных грунтов, установленных по консолидировано-дренированной схеме проведения испытаний, в приборах одноплоскостного среза. Значения угла внутреннего трения и сцепления составили: φ = 25° и c = 0,015 МПа. Применение полученного значения φ, ширины фундамента (20 м) и его заглубления на 5 м привели к получению расчетного значения R= 0,73 МПа, которое на 40% превысило величину проектного давления 0,43 МПа. Согласно проведенным расчетам, грунты основания должны были функционировать в линейной стадии протекания деформаций (I фаза согласно кривой Н.М. Герсеванова) в условиях их затухания во времени, поскольку $R >> p_c$.

В процессе возведения сооружения после достижения отметки 6-го этажа началось развитие интенсивных и неравномерных деформаций. Однако было принято решение о продолжении строительства, но работы не были завершены вследствие прогрессирующего развития осадок и нарастания их неравномерности во времени. После десятилетнего периода геодезического мониторинга была сделана проверка состояния грунтов в основании путем заполнения гидроканала, и было увеличено давление на основание до 0,52 МПа, что вызвало дополнительную осадку в форме провальных деформаций величиной 3-5 см (рисунок 3.8).

В рамках проведения экспертных исследований было обосновано решение о необходимости анализа изменения физического состояния грунтов основания сооружения до и спустя 14 лет эксплуатации сооружения на основе данных бурения, выполненного из подвала, с последующим отбором и лабораторным исследованием керна. На рисунке 3.9 представлено распределение нормальных (сжимающих) напряжений σ_z по центральной вертикали при

значении p_c = 0,43 МПа, а также подтвержденное постоянство значений влажности грунтов в период до начала строительства и после 14 лет функционирования недостроенного объекта.

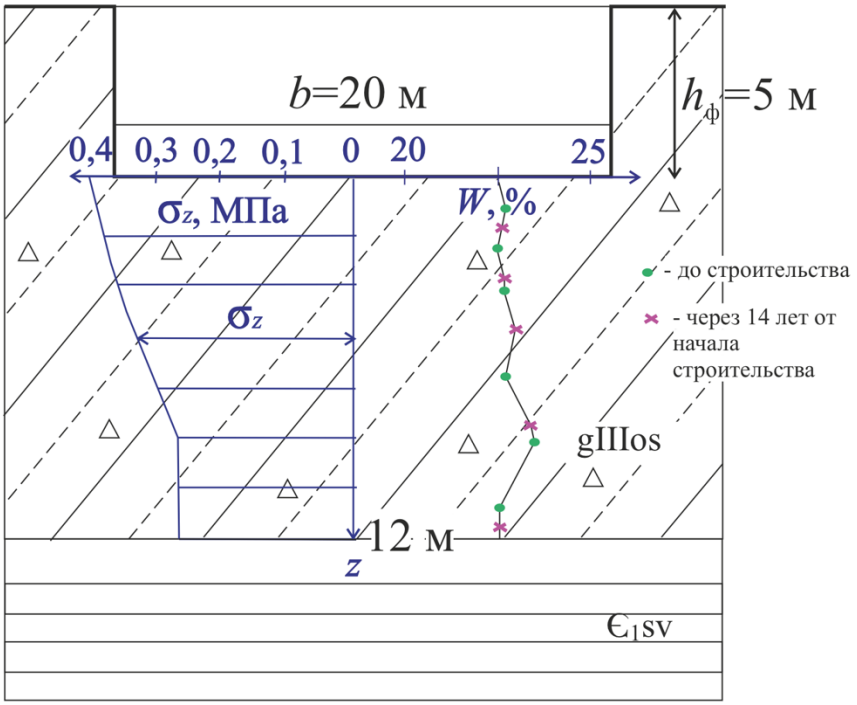


Рисунок 3.9 – Эпюра распределения напряжений σ_z и величины влажности W по глубине z в моренных суглинках основания лабораторного комплекса до и после 14 лет действия давления (составлено автором на основе [35])

Сравнительная оценка физического состояния водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов позволила установить отсутствие изменений значений естественной влажности W, плотности ρ, а также сохранение мягкопластичной консистенции грунтов, несмотря на действие высоких давлений более 0,4 МПа. Следовательно, протекание фильтрационной консолидации грунтов основания не фиксировалось.

Встает вопрос: за счет чего происходили большие и неравномерные деформации грунтов основания в течение 14 лет? Как показали обследования состояния сооружения, осадки развивались за счет медленного отдавливания грунтов из-под фундаментной плиты, что сопровождалось поднятием дневной поверхности в зоне, прилегающей к контурам здания. Все деформации протекали за счет бокового распора отложений в условиях двух- и трехмерной задачи распределения напряжений. Особенно активно такое отдавливание шло по длине рассматриваемого объекта. Сохранение постоянства физического состояния водонасыщенных тонкодисперсных отложений в основании позволило пересмотреть методику определения показателей сопротивления сдвигу для последующего их использования в расчетах устойчивости. Наиболее достоверные условия работы грунта могли быть смоделированы с использованием стабилометров, в которых возможен процесс бокового расширения образцов при постоянстве их физического состояния по параметрам W, ρ, консистенции (закрытая система

испытаний). Данная схема учитывает невозможность оттока поровой воды из водонасыщенных глинистых грунтов, состояние которой характеризуется как структурированное. Полученные параметры сопротивления сдвигу составили: сцепление c = 0,033 МПа, угол внутреннего трения φ = 5°.

Расчетное сопротивление грунтов основания R, определенное с использованием полученных значений φ и c, снизилось до значений 0,27 МПа. Данная величина коррелирует с наблюдаемой динамикой развития осадок по мере роста давления от сооружения выше отметки 6-го этажа. На этом уровне расчетное сопротивление R было превышено и дальнейшее увеличение p_c привело к росту касательных напряжений, что доказывает работу грунта во II-й стадии – стадии пластических незатухающих во времени деформаций. Предельные значения абсолютных деформаций превысили допустимые, а их неравномерность достигла 0,007 и более.

По результатам экспертизы, а также проведенным экономическим расчетам было принято решение о постановке здания на реконструкцию. В настоящее время сооружение такого назначения функционирует в ином месте.

Следует отметить, что формирование и преобразование инженерно-геологических условий городских территорий, в том числе трансформация водонасыщенных глинистых грунтов, их структурных связей, состояния, физико-механических свойств, определяется не только спецификой геолого-литологической обстановки и структурно-тектоническими особенностями территории, но также и направленностью, длительностью инженерно-хозяйственного освоения рассматриваемого региона. Данный подход на протяжении длительного времени успешно применяется в работах Р.Э. Дашко при исследовании объектов различных городов, в том числе Санкт-Петербурга. Длительная контаминация грунтов основания приводит к необратимому преобразованию грунтов, к усилению структурированности поровой воды, что было показано ранее в главе 2 с помощью метода ЯМР.

Соответственно, необходимо выполнение анализа контаминации грунтов основания, прежде всего органическими и неорганическими соединениями абиогенного и биогенного генезиса. Исторический анализ территории размещения лабораторного комплекса, наиболее активное освоение которой началось во второй половине XVIII в., приведен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – История освоения территории лабораторного комплекса

<table>
<tr><th>Характер и особенности освоения территории</th><th>Негативное влияние на компоненты подземного пространства</th></tr>
<tr><td colspan="2">Природные условия до начала освоения</td></tr>
<tr><td>До конца XVIII в. – заболоченная территория (фин. «Кекерикексен» – «лягушачье болото») на пути из Санкт-Петербурга в Царское Село</td><td>Обогащение подстилающих грунтов соединениями биогенного и абиогенного генезиса в процессе инфильтрации болотных вод; миграция продуктов метаболизма микроорганизмов (белки, жиры, углеводы, газы). Глубина влияния достигает 50 м.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Строительство и функционирование архитектурного ансамбля</td></tr>
<tr><td>1774-1777 гг. – строительство путевого дворца Екатерины II (позднее по указу императрицы – Чесменский дворец). Исторический район Чесма сохранился до настоящего времени.</td><td rowspan="3">Накопление большого количества отходов органического и неорганического происхождения за счет отсутствия систем водоотведения и существования кладбища. Такие соединения проникают на большую глубину и приводят к загрязнению грунтов и подземных вод, что отражается на их составе и свойствах и повышает степень агрессивности по отношению к конструкционным материалам.</td></tr>
<tr><td>1777 г. – заложение и строительство церкви Рождества св. Иоанна Предтечи; устройство кладбища</td></tr>
<tr><td>1830 г. – устройство Чесменской военной богадельни; возведение военных служб; разбивка парка</td></tr>
<tr><td>Конец XIX в. – устройство дачного района вокруг Чесменской богадельни</td><td>Функционирование пастбищ и отсутствие систем водоотведения предопределяют загрязнение подстилающих грунтов органикой, микроорганизмами, биогенными элементами, сульфатами, хлоридами и другими соединениями. Примечательно, что во время лета по шоссе прогонялась в город масса гуртов рогатого скота, при этом дачевладельцы сдавали свои усадьбы для пастбища быков.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Советский период</td></tr>
<tr><td>1919 г. – размещение в зданиях богадельни концентрационного лагеря для принудительных работ</td><td rowspan="2">Накопление большого количества отходов органического и неорганического происхождения, которые проникают на большую глубину и приводят к загрязнению грунтов и подземных вод, что отражается на их составе и свойствах и повышает степень агрессивности по отношению к конструкционным материалам.</td></tr>
<tr><td>1922 г. – сельскохозяйственная колония в Чесменском дворце</td></tr>
<tr><td>1930 г. – Автодорожный институт, после войны – Авиационный институт</td><td>–</td></tr>
</table>

Продолжение таблицы 3.4

Характер и особенности освоения территории	Негативное влияние на компоненты подземного пространства
Период, предшествующий строительству лабораторного комплекса	
Середина – конец XX в. (более 50 лет) – свалка отходов мясоперерабатывающего производства	Свалки характеризуются высоким содержанием органических соединений. Перенос в грунтовую толщу и подземные воды абиогенных и биогенных соединений, а также соединений серы и азота. Сточные воды таких предприятий содержат высокие концентрации органических веществ (жиры, белки, частицы мышечной ткани, кровь), неорганические компоненты (фосфаты, нитраты, хлориды). Особую проблему представляет микробиологическое загрязнение, характеризующееся преобладанием метангенерирующих видов, значительным содержанием сульфатредуцирующих бактерий, наличием молочнокислых микроорганизмов, а также присутствием патогенной и условно-патогенной микрофлоры [158, 172, 173]. Свалка была ликвидирована, территория зачищена и засыпана песком. При этом санация грунтов не проводилась.

Таким образом, уже осваиваемая территория представляла собой район, подвергшийся глубокой и длительной контаминации. В пределах геологического разреза водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты и подземные воды характеризовались повышенным содержанием органических и неорганических компонентов. Накопление последних безусловно определилось влиянием целого комплекса как природных факторов (наличием обширных болот), так и техногенными источниками поступления различных соединений – хозяйственно-бытовыми стоками, сельскохозяйственными и промышленными.

Необходимо также рассмотреть определение деформационных параметров водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов, а именно – параметра модуля общей деформации E_o. В лабораторных условиях его значение чаще всего получают с использованием компрессионных приборов. Для компрессионных приборов, как и для одноплоскостных срезных и трехосных установок, необходимо сопоставление действующих градиентов напора $I_д$ в лабораторных условиях и в основании сооружений. При одинаковой величине поровых давлений, зависящих от типа глинистого грунта и приложенных давлений, действующий градиент в лабораторных условиях, как уже было сказано ранее, оказывается на порядки выше, чем при взаимодействии грунта с конкретным сооружением. Вследствие малой длины пути фильтрации в образце $I_д$ достигает аномально высоких значений. В то время как реальные действующие градиенты напора в основаниях сооружений, как правило, не превышают первых единиц и ниже. Следовательно, реальный модуль деформации E оказывается ниже значений, получаемых с

использованием компрессионных приборов, в том числе за счет невозможности оттока структурированной поровой воды в водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах.

Такое положение может быть проиллюстрировано на примере 12-этажного жилого дома, построенного в северо-западной части Санкт-Петербурга. Участок расположен в пределах длительно осваиваемой (в течение 300-400 лет) территории при наличии обширных болот с высокой степенью контаминации. Здание запроектировано и возведено на плитном фундаменте, в основании которого залегают литориновые, озерно-ледниковые и моренные отложения, приуроченные к склоновой части погребенной долины р. Смоленки.

Известно, что литориновые отложения, сформировавшиеся в условиях теплого мелководного моря, в значительной степени обогащены органическим веществом. Генетической особенностью данных отложений является присутствие микроорганизмов, жизнедеятельность которых существенно активизируется при наличии в верхней части разреза торфов, а также при поступлении загрязненных стоков, содержащих питательные и энергетические субстраты для микробиоты. Сами стоки при этом могут служить дополнительным источником поступления микроорганизмов в грунтовую толщу. Такие особенности определяют опасность литориновых отложений при их использовании в качестве оснований сооружений. Для большинства озерно-морских глинистых грунтов характерна высокая подвижность: они способны легко переходить в плывунное состояние при изменении гидродинамического режима, возникновении дополнительных давлений, а также при действии знакопеременных нагрузок.

Как показывают результаты наблюдений за осадками данного жилого дома, фактические величины деформаций сооружения и их неравномерность достигли высоких значений (рисунок 3.10).

Стоит отметить, что в данном случае также необходимо учитывать несоответствие между величиной расчетного сопротивления грунтов основания R и давлением от сооружения p_c ($p_c > R$). Основание жилого дома работало в нелинейной стадии развития деформаций, что сопровождалось выпором грунтов из-под фундамента и выгибом торцевой стены.

Величины расчетной осадки, определенные при принятом модуле общей деформации для моренных грунтов E = 15 МПа (согласно данным компрессионных испытаний), составляли 20-25 см. Однако фактические осадки, зафиксированные спустя 16 лет после начала строительства сооружения, достигли в среднем более 75 см при максимальных значениях 105 см.

Подобное расхождение может быть объяснено некорректным выбором расчетных показателей, а именно – завышением значения E, который, как известно, определяет достоверность и надежность прогнозных оценок условий эксплуатации наземных сооружений.

Выполнение обратных расчетов по определению фактической величины модуля общей деформации на основе замеренных абсолютных осадок, а также послойных деформаций

сжимаемой толщи, зафиксированных по глубинным реперам, позволило установить реальное значение параметра *E*, которое составило всего 1,6-2,0 МПа (рисунок 3.11).

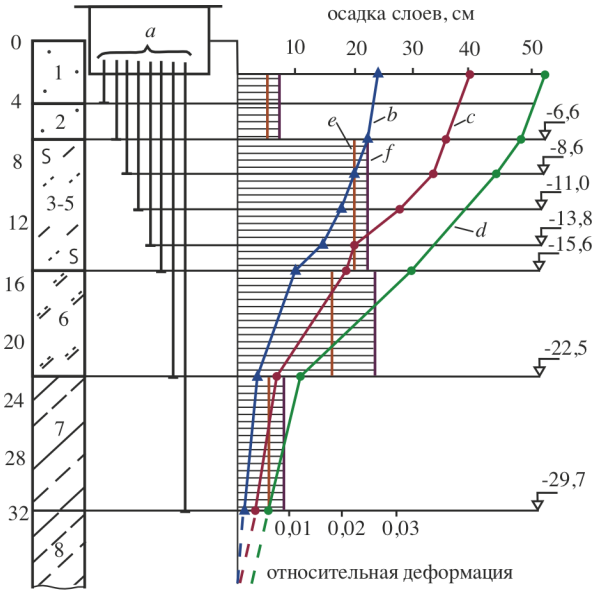


Рисунок 3.10 – Схема размещения глубинных марок и послойные деформации грунтов основания жилого дома: 1-2 – песок техногенный (tIV), 3-5 – супеси, суглинки, глины литориновые (mIV^{lt}), 6 – суглинок ленточный текучий ($lgIIIvd^{b}$), 7-8 – суглинок и супесь моренные с гравием и галькой ($lgIIIvd^{lz}$); *a* – глубинные марки, *b* – эпюры перемещения марок, зафиксированные при окончании строительства, *c* – эпюры перемещения марок, зафиксированные на конец 1-го года эксплуатации дома, *d* – эпюры перемещения марок по прогнозу к моменту стабилизации осадки, *e* – послойные величины относительной деформации на конец 1-го года эксплуатации дома, *f* – послойные величины относительных деформаций на момент стабилизации осадки

Примером перехода здания в ограниченно-работоспособное и аварийное состояние вследствие некорректной оценки деформационной и несущей способности глинистых грунтов основания на стадии проектирования служит жилой дом в Екатеринбурге. Неравномерные деформации данного объекта наблюдаются с момента его возведения в 2006 году и продолжают развиваться по настоящее время, что фиксируется в трещинообразовании несущих стен жилого дома и формировании выпора грунта, сопровождаемым креном сооружения в юго-западном направлении (рисунок 3.12). Особенности развития деформаций свидетельствуют о том, что грунты основания работают во II и III стадии, согласно кривой Н.М. Герсеванова.

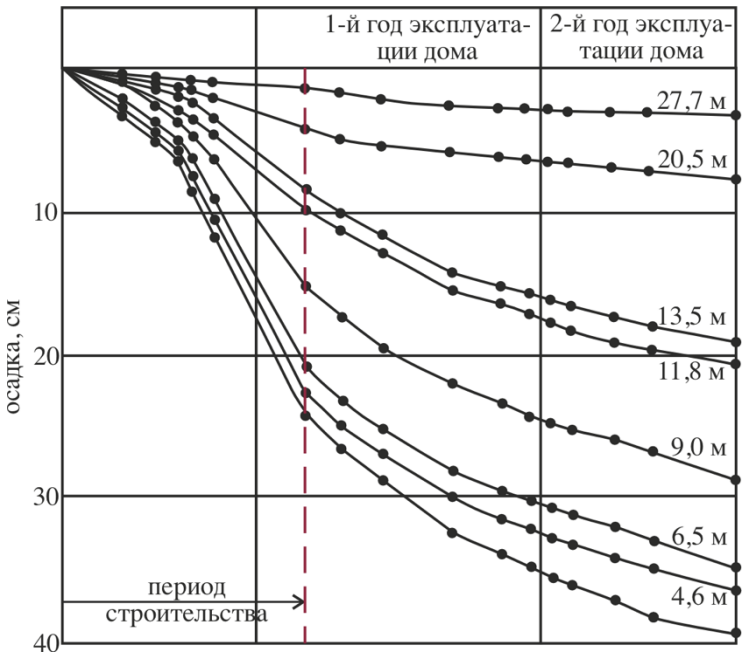


Рисунок 3.11 – Значения осадок глубинных марок во времени для исследования деформаций песчано-глинистой толщи в основании жилого дома

По ряду конструктивных параметров, а также характеру развития нелинейных деформаций, рассматриваемое жилое здание аналогично лабораторному комплексу, а именно:

- слабые водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты в основании сооружения;
- 16-этажное здание;
- фундаментная плита размерами 16×128 м и ее заглубление 4,1 м;
- здание с поперечными несущими стенами разделено осадочными швами на 3 блока;
- давление от сооружения достигает 0,27 МПа.

Корректный анализ несущей способности грунтов основания, как и в предыдущем случае, должен выполняться с учетом длительности и специфики использования территории. Город Екатеринбург как столица промышленного Урала, официально был основан 7 ноября (18 ноября) 1723 г. после весеннего указа императора Петра I о начале строительства крупнейшего в России железоделательного Екатерининского завода на берегах реки Исети. Однако согласно историко-археологическим данным этот регион начал развиваться ранее и к настоящему времени район характеризуется богатой историей освоения (таблица 3.5). Стоит отметить, что при анализе эксплуатируемого жилого дома рассматривается только северо-восточная часть города.



Рисунок 3.12 – Фрагмент характера развития деформаций здания и прилегающей территории, образовавшихся в результате эксплуатации жилого дома в Екатеринбурге (фото автора, июнь 2024 г.)

Таблица 3.5 – История освоения северо-восточной части г. Екатеринбурга

Характер и особенности освоения северо-восточной части г. Екатеринбурга		Негативное влияние на компоненты подземного пространства города
Развитие территорий до основания города		
1704-1716 гг.	Строительство и функционирование Шувакишского железоделательного завода и жилая инфраструктура	–
1723 г.	Основание и функционирование города с его промышленными и жилыми пригородами	Функционирование пастбищ и отсутствие систем водоотведения предопределяют загрязнение подстилающих грунтов органикой, микроорганизмами, биогенными элементами, сульфатами, хлоридами и другими соединениями.
XIX – сер. XX вв.	Разработка торфяных залежей	Обогащение подстилающих грунтов соединениями биогенного и абиогенного генезиса в процессе инфильтрации болотных вод; миграция продуктов метаболизма микроорганизмов (белки, жиры, углеводы, газы). Глубина влияния достигает 50 м.
Развитие промышленных районов города		
С 30-х гг. XX в.	Строительство и эксплуатация Уралмашзавода и его жилой инфраструктуры	Соцгородок – примитивные бараки с отсутствием канализации. Накопление большого количества отходов органического и неорганического происхождения, которые проникают на большую глубину и приводят к загрязнению грунтов и подземных вод, что отражается на их составе и свойствах и повышает степень агрессивности по отношению к конструкционным материалам.
кон. XX – нач. XXI вв.	Место массового распространения несанкционированных свалок твердых бытовых отходов	Хаотичная отсыпка свалочных масс мощностью до 7-10 м. Свалки характеризуются высоким содержанием органических соединений. Перенос в грунтовую толщу и подземные воды абиогенных и биогенных соединений, а также соединений серы и азота.
Нач. XXI в. – настоящее время	Начало массовой застройки жилых и административных зданий	Ниже по тексту

Этап наиболее интенсивного освоения территории исследуемого участка начался в 1966 году после проведения инженерно-геологических изысканий под комплекс учебных зданий, исследования проводились вплоть до 1980 года, но здания возводить так и не решились, после чего рассматриваемая территория до 2003 года представляла собой несанкционированную свалку

твердых бытовых и строительных отходов, которые складировались на торфах и аллювиальных заторфованных грунтах верхней части разреза (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Схематичная карта мест размещения несанкционированных свалок твердых бытовых отходов в северной части г. Екатеринбурга (С.Н. Волков, 1997 г.)

Таким образом, к началу XXI века осваиваемая территория северо-восточной части Екатеринбурга представляла собой район, подвергшийся глубокой и длительной контаминации, при этом в пределах разреза водонасыщенные грунты и подземные воды характеризуются повышением содержания органических и неорганических компонентов под влиянием деятельности болот, складирования хозяйственно-бытовых отходов и канализационных стоков, формирующих восстановительную обстановку в подземном пространстве.

Необходимо остановиться на процессе преобразования состояния и свойств водонасыщенных грунтов и состава подземных вод под действием болот, свалок и утечек из систем водоотведения. Известно, что централизованное водоотведение в Екатеринбурге появилось только в 1930 году. В настоящее время служба водоотведения обслуживает коллекторы, уличные и квартальные сети общей протяженностью более 1220 км, а также 58 канализационных насосных станций. Канализационная система города, в том числе и ее северо-восточной части, находится в неудовлетворительном состоянии. Обследования, выполненные ЕМУП «Водоканал», дали возможность сделать вывод о том, что наблюдается повсеместное разрушение системы водоотведения, которая проложена в стальных и железобетонных трубах, связанное и с разрывами труб за счет неравномерных деформаций и активной коррозией конструкционных материалов в восстановительных условиях, особенно металлов. На рисунке 3.14 отмечены места аварий труб только с разрывами и трещинами, что составляет примерно 30% от общего количества аварийных ситуаций.

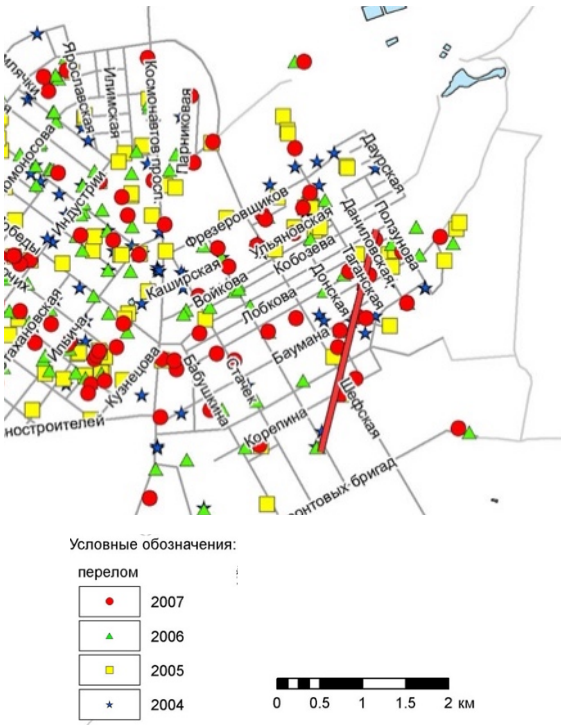
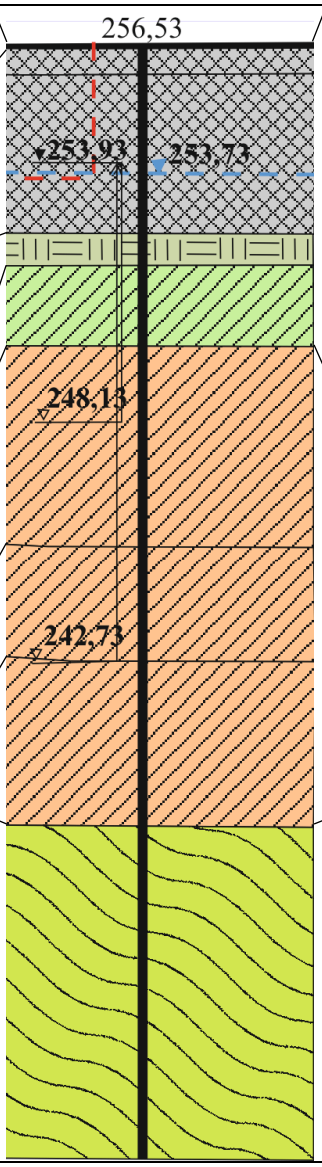


Рисунок 3.14 – План размещения аварийных зон водопроводных систем в северной, северо-восточной и северо-западной частях г. Екатеринбурга (Осипова А.Ю., 2009 г.). Зоны разрыва водопроводных труб имеют определенную протяженность, которая соответствует направлению активных тектонических разломов

Интенсивная контаминация осваиваемой территории подтверждается и химическим составом подземных вод, который характеризуется значительной минерализацией (1750,5-2194,7 мг/дм^3), повышенным содержанием легкоокисляемой органики (21,12-25,28 мгO_2/дм^3) (содержание данного показателя не соответствует реальной картине загрязнения с учетом истории освоения территории и природных источников поступления микроорганизмов), активным накоплением щелочных и щелочноземельных элементов (K, Na^+ – 264,29-302,69 мг/дм^3, Ca, Mg^{2+} – до 212,4 и 98,5 мг/дм^3 соответственно), а также высокой концентрацией сульфат-ионов (до 1300 мг/дм^3) (на самом деле соединения серы в неокисленной пробе находятся в форме сероводорода H_2S). Стоит отметить, что при таких показателях химического состава подземных вод бетоны твердеют медленно и, соответственно, не набирают свою полную прочность, либо наблюдается активная коррозия бетонных и железобетонных конструкций.

В основании жилого дома залегают водо- и водогазонасыщенные слабые глинистые грунты различного генезиса: аллювиального (aQ) (участок относится к заболоченной долине отведенной р. Калиновки) и элювиального происхождения (eMZ, верхняя часть разреза кор химического выветривания юрского возраста, сформированных на серпентинитах нижнего силура) (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Инженерно-геологическая характеристика территории строительства

Индекс	Мощность, м	Характеристика грунтов по данным изысканий и проведенной экспертизы	Инженерно-геологическая колонка	Дополнительная информация, необходимая для проектирования
tIV	0,6-3,8	Щебенистые грунты		Грунты, обогащенные микроорганизмами различного генезиса (болотного, канализационных стоков, личаты (жидкая фаза хозяйственно-бытовых отходов)), а также продуктами их метаболизма
tIV	1,0-6,5	Глинистые щебенистые грунты (с «вдавленными» остатками торфа)		
bQ	0,1-3,5	Торфы сильно-разложившиеся		
aQ	1,2-2,3	Суглинки мягкопластичные		
eMZ	0,5-6,9	Кора выветривания – суглинки полутвердые и тугопластичные		Наличие микроорганизмов, характерных для кор химического выветривания, повышенная трещиноватость горных пород
eMZ	0,8-5,5	Кора выветривания – суглинки полутвердые		
eMZ	2,1-8,5	Кора выветривания – суглинки твердые и полутвердые		
S_1	0,48-9,0	Сланцы малопрочные		Повышенная трещиноватость горных пород

Негативное воздействие на состояние и свойства глинистых грунтов оказывают присутствующие болотные отложения (bQ), а также вышеописанные техногенные источники контаминации подземной среды. Действие антропогенных и природных факторов способствует обогащению грунтов и подземных вод неорганическими и органическими соединениями абиотического и биотического генезиса.

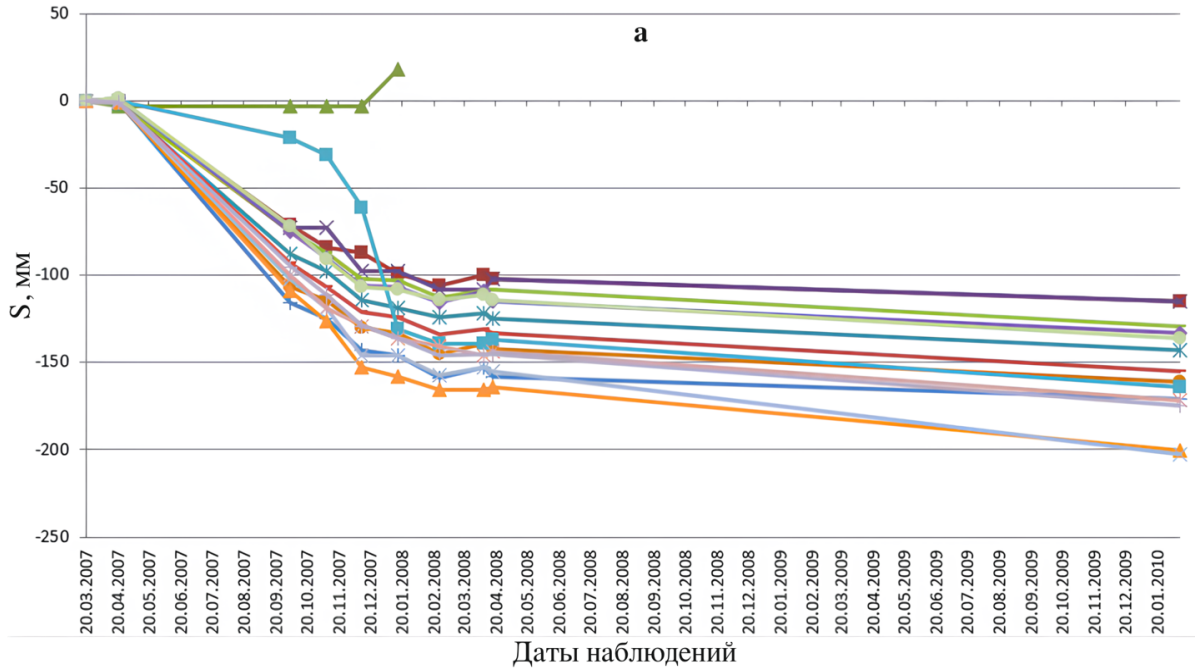
Как уже отмечалось в разделе 1.2, коры химического выветривания формируются при активном участии микроорганизмов, которые до сих пор развиваются и в настоящее время в элювиальных глинистых образованиях.

Следует особо отметить, что проектирование жилого дома осуществлялось в два последовательных этапа. Первоначальный проект предусматривал устройство фундамента из буронабивных свай с железобетонным плитным ростверком. Однако на втором этапе

проектирования было принято решение об изменении конструктивной схемы в пользу фундаментной плиты на естественном основании с формированием «геотехнического» массива путем нагнетания цементно-песчаной смеси в 30 скважинах. Предполагалось, что техническая мелиорация позволит повысить плотность и улучшить механические свойства слабых грунтов. Судя по проектным решениям, нагнетание раствора проводилось под подошву торфяных отложений. Следует отметить, что эффективность данного мероприятия вызывает сомнения. Вероятнее всего, цементно-песчаный раствор растекся по путям наименьшего сопротивления, не создавая в грунтовом массиве зоны с улучшенными свойствами, и ожидаемого эффекта достигнуто не было. Согласно анализу развития деформаций данного жилого дома, выполненному О.Н. Овечкиной, именно такая причина служит одной из определяющих процесс деформирования сооружения [79].

Примечательно, что по невыясненным причинам в верхней части разреза основания были оставлены болотные отложения, представленные торфом высокой степени разложения. Было принято некорректное предположение, что отсыпка слоя щебня мощностью 2-3 м на торф приведет к его активному дренированию и уплотнению.

Наличие такой «подушки» привело к возникновению высоких скоростей деформаций на начальном этапе строительства сооружения, что было зафиксировано в ходе геодезического мониторинга. Скорости осадок по первой и второй секциям здания достигали 12-26 мм/месяц, что объясняется процессом вдавливания торфа в пустотное пространство щебеночной отсыпки. Спустя 12 месяцев после ввода здания в эксплуатацию наблюдалось снижение скоростей деформации до 8,3-16,7 мм/год (рисунок 3.15).



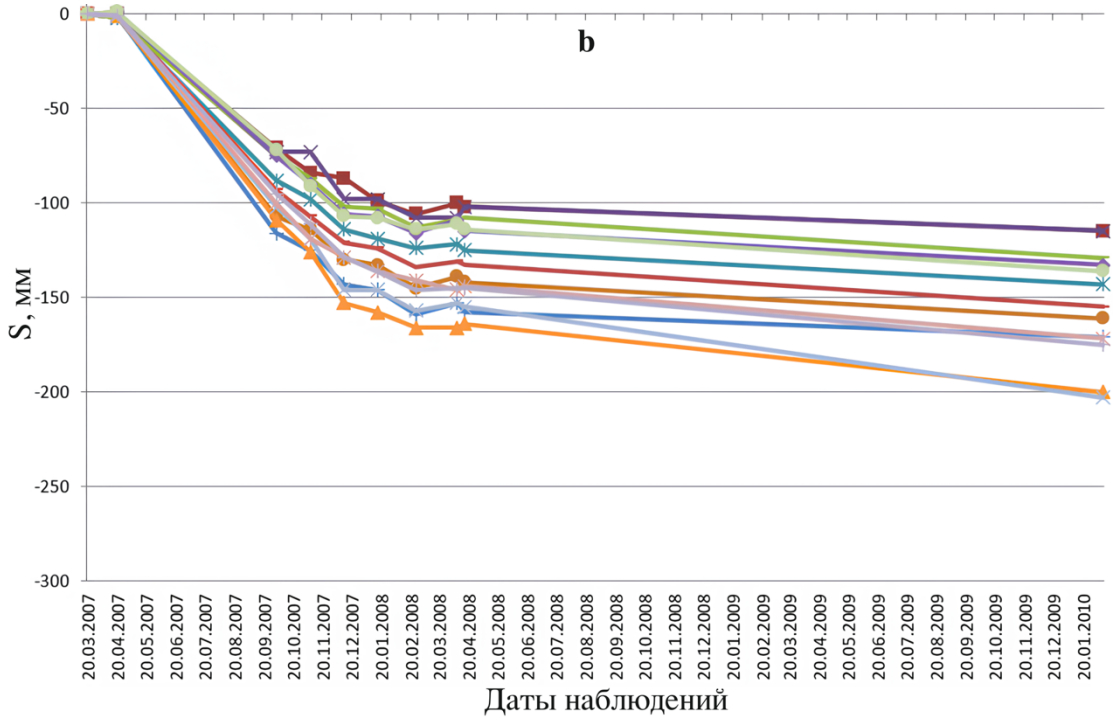


Рисунок 3.15 – График развития осадок: a) секции 1; b) секции 2 (согласно данным проектного института 2021 г.)

В 2021 году была назначена экспертиза с целью разработки проекта стабилизации деформаций и обеспечения сохранности жилого здания для последующей безопасной эксплуатации уже заселенного дома. В рамках проведения экспертных работ был выполнен комплекс исследований, включающий в себя:

1) детальное визуальное обследование подземных и наземных конструкций сооружения с фиксацией дефектов и повреждений;

2) бурение скважин по периметру здания с отбором монолитов грунтов для последующего определения их состава, состояния и физико-механических свойств;

3) статическое зондирование грунтов;

4) систематические геодезические наблюдения за развитием неравномерных осадок по кратковременному периоду наблюдений (результаты представлены в таблице 3.7).

Таблица 3.7 – Наблюдаемые деформации рассматриваемого здания

Вид деформаций	Величина деформаций	Нормативное значение (согласно СП 22.13330.2016)
Относительная величина осадок $(\Delta s/L)_u$	0,006 (2-я секция)	0,0016
Крен (i_u)	0,009	0,004

Выявление причин, определяющих развитие деформаций здания на протяжении более чем 14-летнего периода наблюдений, должно основываться, как и в предыдущем случае, на комплексном анализе, включая возможность протекания процессов фильтрационной консолидации в глинистых грунтах основания сооружения. Важным аспектом является

корректное определение расчетного сопротивления R с использованием параметров сопротивления сдвигу, адекватно отражающих реальное поведение глинистых грунтов в условиях их природного напряженно-деформированного состояния.

В ходе проведения экспертизы параметры сопротивления сдвигу грунтов основания определялись с использованием одноплоскостных срезных приборов по схеме КД. Полученные значения таких характеристик составили: угол внутреннего трения $\varphi = 16°$ и сцепление $c = 0{,}015$ МПа. На основании этих параметров величина расчетного сопротивления основания была рассчитана как $R = 0{,}3$ МПа, что несколько превышало действующее давление от сооружения $p_c = 0{,}27$ МПа. Теоретически, данное соотношение $p_c < R$ должно было обеспечивать работу грунтов в первой стадии деформирования (по Н.М. Герсеванову), характеризующейся затуханием осадок во времени и линейным характером деформирования грунтов основания.

Однако, как показали результаты геодезического мониторинга, процесс деформации здания, протекающий в реальности, отличался от предполагаемого. Исследования установили постоянство скоростей развития осадок в условиях бокового расширения, неравномерное отдавливание грунтов из-под фундамента при нелинейном характер роста осадок.

Опыт исследований водонасыщенных грунтов, контаминированных органическими соединениями абиотического и биотического генезиса, показывает, что в условиях проведения неконсолидированно-недренированных испытаний такие отложения ведут себя как квазипластичные разности. Для таких грунтов несущего слоя при $\varphi \to 0°$, $c = 0{,}19$ МПа первое критическое давление рассчитывается согласно выражению (3.30) и составляет 0,14 МПа, в то время как давление от сооружения $p_c = 0{,}27$ МПа. Соответственно, согласно расчетам, следует вывод о том, что грунты основания работают во II и III стадии развития деформаций. Это положение подтверждается геодезическими наблюдениями, а также фиксацией выпора грунта и крена сооружения.

Величина второго критического давления рассчитывается согласно выражению (3.33) и составляет 0,19 МПа, что также превышает давление от рассматриваемого сооружения [38]:

$$p_2 = (2 + \pi)c + \gamma' h_\phi \qquad (3.33)$$

Встает вопрос о возможности стабилизации деформаций, в том числе ее неравномерности, в основании рассматриваемого жилого дома и стабилизации процесса выпора грунта из-под фундамента. С этой целью возможно использование жесткой железобетонной подпорной стены на глубину зоны отдавливания (формирования поверхности скольжения). С помощью такой конструкции основание жилого дома будет работать по схеме одномерного сжатия в условиях отсутствия фильтрационной консолидации. Соответственно, скорости деформаций в таком случае будут стремиться к нулю. Такое решение может быть реализовано в 2 этапа: 1) погружение шпунтовой стены задавливанием в непосредственной близости от сооружения как

временной конструкции, под защитой которой будет реализован 2-ой этап работ; 2) устройство железобетонной стены в грунте путем проходки узких траншей под защитой тяжелых растворов с последующим их бетонированием на полную глубину зоны выдавливания грунтов с запасом на несколько метров. Согласно проведенным графическим построениям и аналитическим расчетам подошва поверхности скольжения прослеживается на глубине, равной ширине фундамента – 16 м. Необходимо отметить важность вопроса о подборе бетонной смеси, в первую очередь типа цемента, который должен обладать способностью быстро твердеть в условиях наличия контаминированных подземных вод органическими соединениями абиотического и биотического генезиса.

3.5 Оценка длительной устойчивости сооружений промышленной гидротехники, проектируемых по I-му предельному состоянию

Разработка и добыча полезных ископаемых практически повсеместно сопровождается их обогащением для извлечения полезного компонента из горной породы либо созданием концентрата. Применение различных методов обогащения полезных ископаемых диктует необходимость создания сооружений промышленной гидротехники – шламо- и хвостохранилищ, для которых отводятся территории с относительно неблагоприятными инженерно-геологическими условиями с целью сохранения ценных земельных фондов. В зависимости от геоморфологических особенностей местности такие сооружения могут располагаться в пределах водоразделов (равнинные), в долинах рек и ручьев, оврагах, акваториях озер и морей, для складирования отходов используются котлованы и отработанные карьеры. Вполне понятно, что чем меньше содержания полезного компонента в породе, тем обширнее площади возводимых хвостохранилищ, достигающих сотен и тысяч гектар, при этом высота дамб может составлять десятки метров.

Стоит отметить, что за счет непрерывного намыва отходов обогащения система «хвостохранилище – основание» характеризуется постоянным ростом давления на грунты, величина которого обычно ограничивается их несущей способностью, превышение которой приводит к формированию оползневых деформаций в намывных откосах с захватом грунтов основания. Проектирование гидротехнических сооружений в России проводится по первой группе предельных состояний – по несущей способности для обеспечения устойчивости пионерных и намывных дамб и, соответственно, корректного обоснования углов заложения их откосов при отсутствии выдавливания глинистых грунтов в основании и предупреждения формирования единой поверхности скольжения [93, 94].

Согласно существующим отечественным и международным нормативным положениям, безопасность эксплуатации шламо- и хвостохранилищ должна обеспечиваться на протяжении всего цикла их функционирования с учетом сроков разработки месторождения [94, 115, 181].

Однако необходимо отметить, что в таких документах полностью отсутствует необходимость учета преобразования пород и грунтов основания при их постоянном взаимодействии с промышленными стоками, состав которых определяется применяемой технологией обогащения, прежде всего использованием органических и неорганических соединений. Соответственно, проблемы безопасности эксплуатации подобных сооружений, аккумулирующих значительные объемы твердых отходов и промышленных стоков сложного состава, связаны в первую очередь с обеспечением длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности пионерных и намывных дамб в зависимости от несущей способности грунтов основания и трансформации последних во времени в тесном взаимодействии с технологией намыва удаляемой измельченной «пустой» породы и составом жидкой фазы пульпы, которая формирует прудковую зону. Прудок выступает источником формирования техногенного водоносного горизонта в намывных отложениях и источником контаминации подземной среды.

Опыт научно-практических работ, в том числе проведенных экспериментальных исследований и результатов комплексного мониторинга на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, показал, что повышение безопасности строительства, длительной эксплуатации и эксплуатационной пригодности сооружений промышленной гидротехники может быть обеспечено только в условиях междисциплинарного подхода к решению такой проблемы в процессе их проектирования и функционирования [130].

Сравнительная оценка реальных условий обеспечения устойчивости пионерных и намывных дамб хвостохранилищ в различных регионах России, а также за рубежом, дала возможность сделать однозначный вывод о том, что наибольшую опасность с позиции развития аварийных ситуаций представляют сооружения промышленной гидротехники, возведенные на глинистых грунтах различной степени их литификации [115, 141, 181]. Необходимо принимать во внимание высокую степень уязвимости глинистых грунтов к воздействию воды и особенно промышленных стоков, характеризующихся различным составом органических и неорганических соединений и минерализации вплоть до рассолов (обогащение калийных солей). Ведущие факторы, определяющие длительную устойчивость и эксплуатационную пригодность сооружений промышленной гидротехники, возведенных на глинистых отложениях, можно разделить на три группы (рисунок 3.16). В практике проектирования шламо- и хвостохранилищ основное внимание обращено на обеспечение устойчивости сооружений с учетом давления от намытых хвостов при изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) и процессов в грунтах основания без учета негативного воздействия поступающих стоков из прудковой зоны, состав которых зависит от технологии обогащения полезных ископаемых, на грунты и подземные воды основания и прилегающей территории [130].



Рисунок 3.16 – Ведущие факторы длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности сооружений промышленной гидротехники на глинистых грунтах с применением междисциплинарного подхода

Анализ длительного срока эксплуатации хвостохранилищ обогатительных фабрик северо-западной части России, в основании которых залегают относительно слабые глинистые грунты, доказывает правомочность и необходимость такого междисциплинарного подхода для обеспечения их устойчивости и безопасности эксплуатации [130].

Для анализа и оценки безопасности длительной устойчивости рассмотрены хвостохранилища, расположенные в различных физико-географических и структурно-тектонических условиях и намываемые на слабые песчано-глинистые грунты.

Хвостохранилища, служащие одним из таких примеров, относятся к равнинному типу и расположены на участке водораздельной части реки системы Балтийского моря, минимальное расстояние от дренажных канав до уреза воды в реке составило 80 м. Отходы обогатительной фабрики поступали на хвостохранилища в виде пульпы с определенным соотношением твердой и жидкой фаз, первая из которых представлена, в основном, песчаными фракциями различной дисперсности (дробление песчаников), вторая – жидкая – загрязнена реагентами, используемыми при флотационном обогащении: талловыми мылами, нефтепродуктами (соляровым маслом), жидким стеклом, серной кислотой и хлористым кальцием, а также природными соединениями – фосфатами и фторидами, которые присутствуют в обогащаемом полезном ископаемом.

Река в непосредственной близости от сооружений приурочена к погребенной долине в нижнекембрийских «синих» глинах, заполненной четвертичными отложениями. Морена

осташковского оледенения, которая перекрывает нижнекембрийские глины, мощностью 2-4 м выходит на поверхность в южной и юго-восточной части рассматриваемой территории. На морене практически повсеместно залегают озерно-ледниковые отложения максимальной мощностью 6-8 м, которые служат несущим слоем на большей части территории хвостохранилищ (рисунок 3.17). Такие отложения постепенно выклиниваются в южном направлении. Следует отметить заболачивание территории размещения сооружения; перед намывом болотные отложения не удалялись.

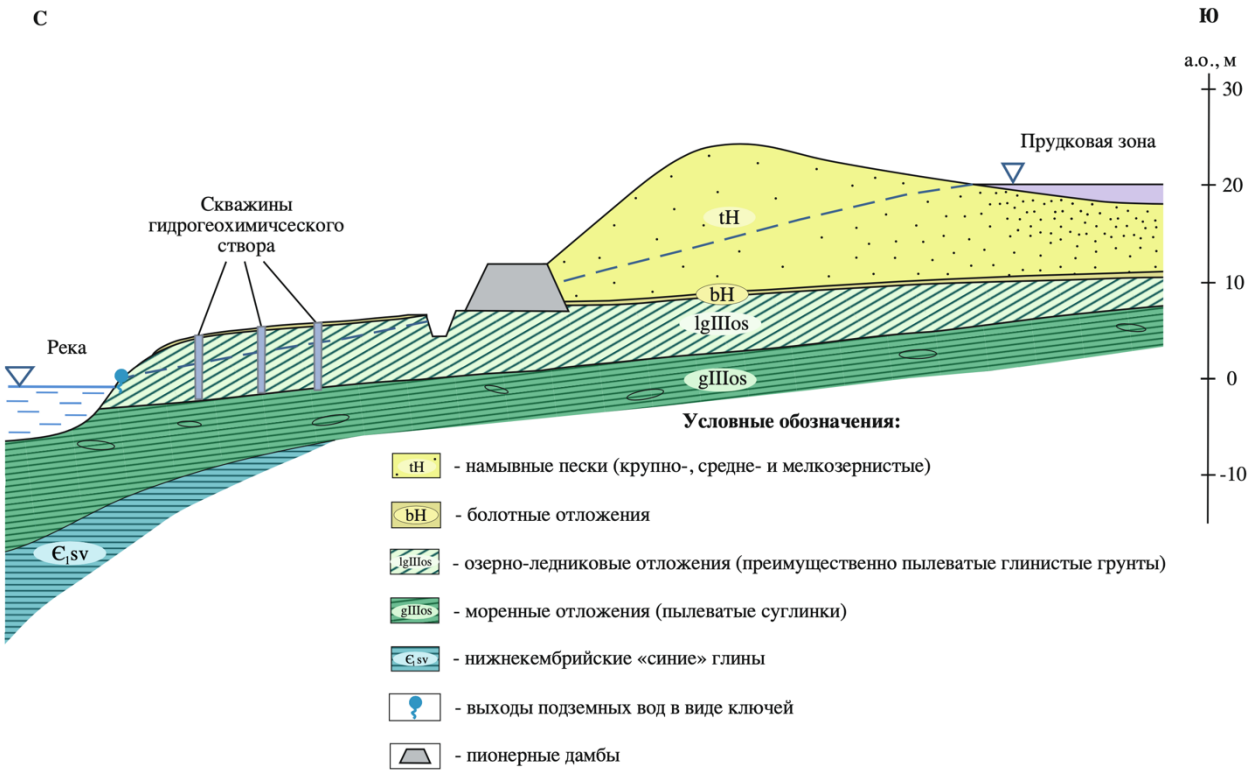


Рисунок 3.17 – Схематический инженерно-геологический разрез хвостохранилища и его основания. Показано положение наблюдательных скважин гидрогеохимического створа

Озерно-ледниковые глинистые отложения различны по своим структурно-текстурным особенностям – от неясно-слоистых в верхней части разреза до ленточных в средней и нижней, что определяет изменчивость и анизотропию их фильтрационных и механических свойств.

К озерно-ледниковым отложениям приурочен сравнительно выдержанный по площади водоносный горизонт, водовмещающими разностями которого выступают песчаные прослои и линзы. Как известно, заболачивание территории оказывает влияние на химический состав подземных вод, их физико-химические и биохимические параметры. До начала эксплуатации хвостохранилищ химический состав подземных вод характеризовался как гидрокарбонатный натриево-кальциевый с минерализацией 0,3-0,6 г/дм^3. За счет влияния болот грунтовые воды содержат легко- и трудноокисляемые органические соединения, при этом окислительно-восстановительный потенциал Eh, mV близок к нулю либо имеет отрицательные значения.

Необходимо выделять важную составляющую болотных вод – содержание различных таксонов микроорганизмов, в основном анаэробных и факультативных форм.

За счет прудковой зоны, состав вод которой близок к флотационным, происходит формирование техногенного водоносного горизонта в намытых песках с непостоянством гидродинамических условий. Такой горизонт следует рассматривать как локальный источник контаминации грунтовых вод и толщи песчано-глинистых отложений в основании и в разрезе прилегающей территории хвостохранилищ неорганическими и органическими соединениями не только абиотического, но и биотического генезиса. Данное положение имеет принципиальное значение при анализе трансформации подземных вод и песчано-глинистых грунтов. Химические особенности прудковых вод предопределяют состав техногенного водоносного горизонта и специфику контаминации грунтовых вод (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Варьирование химического состава прудковых вод за период наблюдений (14 лет) (результаты исследований под руководством Р.Э. Дашко)

Показатель	Диапазон	Среднее значение/Количество определений
$Na^+ + K^+$, мг/дм^3	664-926	785/6
Mg^{2+}, мг/дм^3	4-17	11/6
Ca^{2+}, мг/дм^3	15-31	24/6
HCO_3^-, мг/дм^3	488-2008	1377/6
SO_4^{2-}, мг/дм^3	5-200	89/6
Cl^-, мг/дм^3	60-337	203/6
F^-, мг/дм^3	2,1-6,4	3,9/6
HPO_4^{2-}, мг/дм^3	2,1-37,5	24/6
ХПК, мгO_2/дм^3	129-814	215/6
pH	8,4-9,4	8,8/6
Минерализация, г/дм^3	1,7-5,0	3,2-6

Примечание: Среднее содержание органических флотореагентов составляет, мг/дм^3: таллового мыла – 168,0, нефтепродуктов – 16,9

Среди органических соединений определяющее значение имеют нефтепродукты – соляровое масло, окисление которого формирует физико-химические особенности условий техногенного водоносного горизонта и грунтовых вод. Результаты полевых исследований показывают, что даже относительно невысокое содержание нефтепродуктов снижает показатель Eh (mV) до отрицательных значений. При этом создаются условия для протекания редукции гидроксидов железа $Fe(OH)_3 \cdot n(H_2O)$, цементирующих озерно-ледниковые отложения верхней зоны основания, что сопровождается снижением их прочности и повышением способности к развитию пластических деформаций. В условиях формирования восстановительной среды в

грунтовых водах разрушение относительно жестких структурных связей имеет принципиальное значение при прогнозе безопасной устойчивости пионерных и намывных дамб.

Как уже отмечалось ранее, среди контаминантов следует выделять органику биотического генезиса. При этом в практике изучения и анализа факторов, определяющих устойчивость основания и тела намывных дамб хвостохранилищ, полностью отсутствует исследование деятельности подземных микроорганизмов. Проведенные полевые и лабораторные исследования дали возможность установить основные источники микроорганизмов в подземной среде, которые можно разделить на две группы: *природные* и *техногенные*.

К *природным* источникам следует относить болота, оглеенные и глееватые почвы на прилегающей территории, а также непосредственно подстилающую песчано-глинистую толщу и грунтовые воды, обогащенные болотной микробиотой [37, 121, 128, 152, 171]. При поступлении дополнительных питательных и энергетических субстратов (жидкая фаза пульпы) наблюдается активизация ее деятельности.

Техногенными источниками микробиоты служат нефтепродукты (соляровое масло), используемые во флотационном цикле. Следует подчеркнуть, что анаэробные микроорганизмы содержатся в нефтях и продуктах их перегонки, являясь одновременно источником поступления микробиоценоза и энергетическим субстратом [174]. Соляровое масло легко усваивается и разлагается микроорганизмами болот и глееватых почв, поскольку его структура с длиной углеродной цепи C_{17}-C_{22} близка к строению болотной растительности. Следует подчеркнуть, что прудок, техногенный горизонт и грунтовые воды содержат все необходимые питательные субстраты для активного развития микробиоты, в том числе такие элементы как калий (K^+), кальций (Ca^{2+}), магний (Mg^{2+}), соединения азота, фосфора и серы, а также упоминаемые органические соединения – нефтепродукты и талловые мыла.

Для оценки разнообразия физиологических групп микроорганизмов и их численности были выполнены специальные микробиологические исследования методом посевов на питательные среды. Реальная численность микробиоценоза определялась с использованием корректирующего коэффициента, полученного с помощью люминесцентной микроскопии. Установлено, что при подсчете количества микроорганизмов при переходе от окислительных условий к восстановительным повышающий коэффициент K составляет 10^5, а для анаэробной среды – 10^6 (таблица 3.5).

Таблица 3.9 – Численность таксонов микроорганизмов с учетом корректирующих коэффициентов в различных физико-химических условиях (результаты исследований под руководством Р.Э. Дашко)

Таксоны микроорганизмов	Численность бактерий в		
	озерно-ледниковых грунтах, кл/г	прудковой воде, кл/мл	Примечание
Углеводородокисляющие	10^8-10^9	10^{10}	Переходные условия от аэробных к анаэробным
Денитрифицирующие	10^8-10^9	не определялись	
Сульфатредуцирующие	10^6	10^{11}	Анаэробные условия
Водородобразующие	10^8-10^{12}	10^8	
Метангенерирующие	10^8	10^8	

Среди анаэробных микроорганизмов особо следует выделить газогенерирующие бактерии, метаболизм которых направлен на полную утилизацию органических соединений с образованием биохимических газов. К малорастворимым газам относятся метан (CH_4), молекулярный азот (N_2) и водород (H_2). В газовом потоке происходит перенос микроорганизмов, что приводит к вторичному обогащению микробиотой подстилающих и перекрывающих грунтов. Депонирование малорастворимых газов создает условия для разуплотнения песчано-глинистых грунтов, изменения НДС водогазонасыщенной толщи и, соответственно, снижения их прочности.

Для повышения достоверности прогнозирования изменения грунтов в основании были выполнены полевые двухгодичные исследования негативного преобразования прочности озерно-ледниковых отложений в процессе контаминации грунтовых вод соляровым маслом, содержание которого отвечало реально существующим показателям (таблица 3.8). Одновременно по всему разрезу озерно-ледниковых отложений оценивалось не только изменение прочности с помощью крыльчатки, но и определялось содержание суммарного микробного белка (СБ) по биохимическому методу М. Бредфорда.

По результатам проведенных экспериментов были выделены две зоны по глубине в зависимости от характера снижения прочности глинистой толщи. Следует отметить, что в верхней части разреза отмечалось ожелезнение озерно-ледниковых глинистых грунтов *in situ*, прочность которых составляла более 0,1 МПа (согласно испытаниям крыльчаткой). Через 3 месяца после внесения солярового масла наблюдалась редукция соединений $Fe(OH)_3 \cdot n(H_2O)$, что сопровождалось изменением цвета грунта – от охристых оттенков к серым и резким снижением прочности до 0,04 МПа. Такое изменение прочности (до 70%) связано с преобразованием физико-химических условий: переходом окислительных условий в восстановительные и, соответственно, разрушением жестких структурных связей, о чем

говорилось выше, а также за счет роста численности микроорганизмов при поступлении энергетического субстрата – солярового масла, что фиксировалось ростом величины СБ.

Во второй зоне по глубине в условиях сохранения анаэробной обстановки наблюдается увеличение численности микроорганизмов, что также подтверждается повышением величины СБ и, соответственно, согласно полевым испытаниям, происходит снижение прочности озерно-ледниковых отложений на 35% (с 0,04 МПа до 0,025 МПа).

Выполненные исследования изменения физического состояния и физико-механических свойств глинистых грунтов в основании охарактеризованных хвостохранилищ дали возможность оценить общую тенденцию трансформации тонкодисперсных отложений под действием давления от намытых песков, привноса контаминантов и активизации деятельности микроорганизмов (рисунок 3.18).

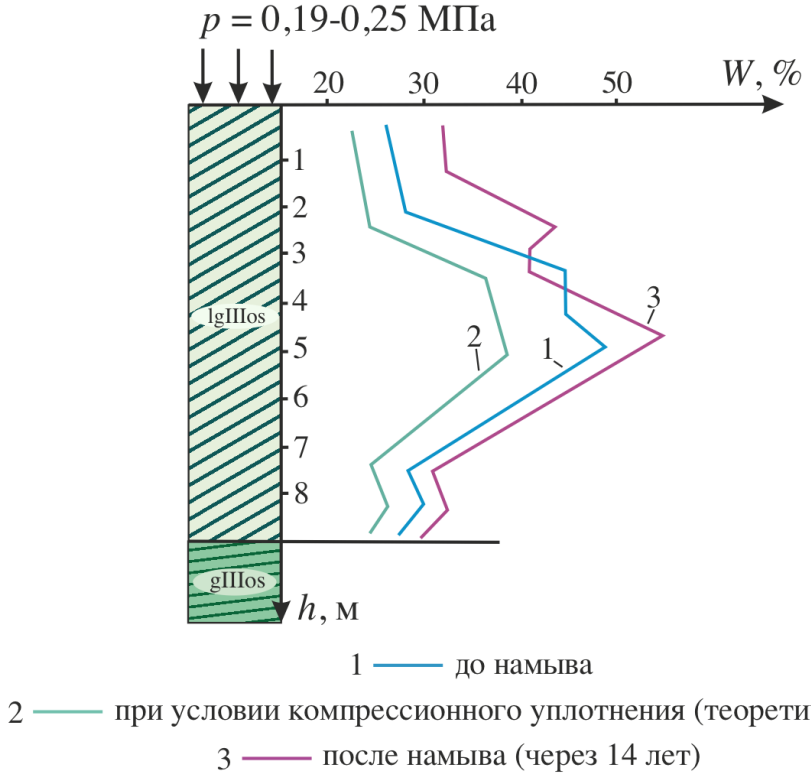


Рисунок 3.18 – Эпюра распределения влажностей W по глубине разреза h в основании хвостохранилищ до и спустя 14 лет после намыва песков [38]

Такие результаты позволяют определить закономерность изменения величины влажности W по глубине разреза h с характерным максимумом в его центре за счет повышенного содержания глинистой фракции M_c в грунтах. Как следует из анализа рисунка 3.9, процесс фильтрационной консолидации не был зафиксирован. Через 14 лет эксплуатации сооружений промышленной гидротехники отмечается некоторый рост W за счет формирования анаэробных условий, что приводит, как уже отмечалось ранее, к редукции соединений железа Fe^{3+} и повышению содержания тонкодисперсной фракции при разрушении агрегатов глинистых

грунтов. Соответственно, закономерным является и некоторое повышение величины W за счет роста гидрофильности грунтов в условиях отсутствия протекания фильтрационной консолидации. Следует отметить, что увеличение гидрофильности связано с повышением содержания глинистой фракции при диспергировании грунтов.

Как уже отмечалось ранее, изменение физико-химических условий и повышение содержания микроорганизмов и продуктов их метаболизма способствует снижению прочности глинистых грунтов согласно выражению:

$$\tau(t) = \tau_0 - \Delta\tau_{\text{стр}} - \Delta\tau_{\text{СБ}} - \Delta\tau_{\text{г}}, \qquad (3.34)$$

где τ_0 – начальная прочность глинистых грунтов; снижение прочности которых происходит за счет: $\Delta\tau_{\text{стр}}$ – преобразования структурных связей в условиях формирования восстановительной обстановки при контаминации грунтовых вод нефтепродуктами и редукции соединений Fe^{3+}; $\Delta\tau_{\text{СБ}}$ – формирования биопленок на твердых частицах за счет клеток микроорганизмов и продуктов их метаболизма; $\Delta\tau_{\text{г}}$ – разуплотнения глинистых грунтов при генерации малорастворимых газов в процессе деятельности анаэробных форм микроорганизмов и утилизации ими органических соединений природного и техногенного генезиса.

Общая тенденция снижения прочности озерно-ледниковых отложений в верхней и нижней частях разреза вне зоны намыва и в пределах действия намытых песков в зависимости от показателя консистенции грунтов I_L приведена на рисунке 3.19.

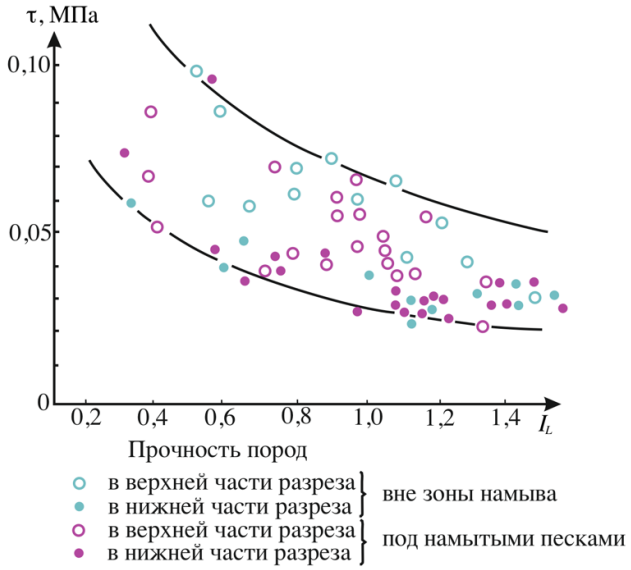


Рисунок 3.19 – Изменение прочности τ озерно-ледниковых глинистых отложений в основании хвостохранилищ и вне зоны намыва в зависимости от показателя их консистенции I_L [38]

Следует отметить, что сравнительная характеристика изменения прочности по результатам полевых испытаний приводится в зависимости от состояния грунтов по показателю консистенции I_L. Результаты таких исследований дают возможность сделать вывод о том, что

наибольшее воздействие на снижение прочности грунтов в основании оказывает преобразование физико-химических условий и, соответственно, деградация структурных связей: цементационное взаимодействие между частицами сменяется на молекулярное.

На первом этапе эксплуатации хвостохранилищ, согласно проектным решениям, была обоснована необходимость обеспечения устойчивости на основе использования принципов фильтрационной консолидации и выполнения расчетов устойчивости пионерных и намывных дамб с применением характеристик сопротивления сдвигу грунтов – угла внутреннего трения φ и сцепления *c*, полученных по схеме консолидировано-дренированных (КД) испытаний. Использование завышенных значений φ привело к формированию оползневых смещений, захватывающих пионерные и намывные дамбы и сопровождающихся выдавливанием слабых глинистых грунтов основания с образованием протяженного вала выдавливания. Опускание гребня намыва ниже отметки зеркала прудковых вод повлекло за собой аварийный сброс загрязненных вод в речную систему Балтийского моря.

Эксплуатация сооружений промышленной гидротехники в условиях междисциплинарного подхода к оценке их устойчивости и обеспечения безопасности функционирования позволила намыть второй ярус хвостохранилища при снижении генерального угла намывных откосов. В расчетах устойчивости намывных и пионерных дамб хвостохранилищ на слабом глинистом основании использовались пониженные характеристики сопротивления сдвигу озерно-ледниковых отложений в условиях формирования анаэробной среды, роста численности микроорганизмов в грунтовой толще и, соответственно, преобразования грунтов в квазипластичное состояние (рисунок 3.20). Расчеты проводились при условии прохождения поверхности скольжения по слабому прослою с учетом анизотропии свойств озерно-ледниковых отложений, для которых характерна ленточная текстура.

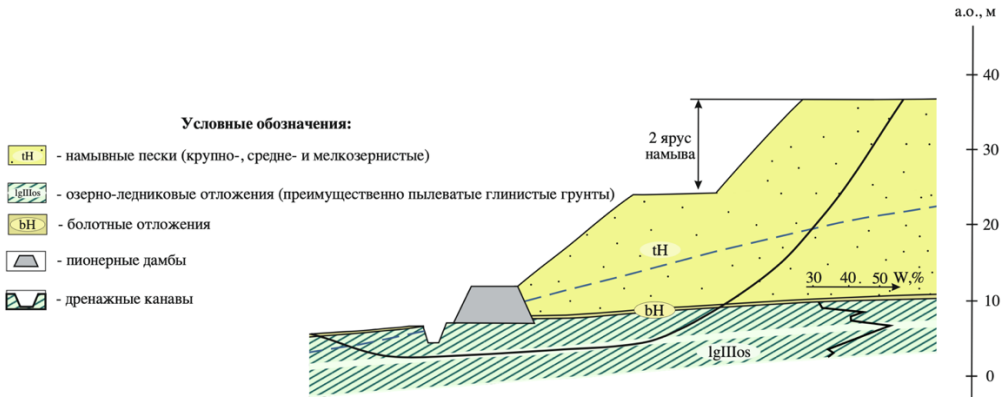


Рисунок 3.20 – Схема к расчету устойчивости хвостохранилищ на слабом основании при намыве второго яруса

Продление сроков эксплуатации хвостохранилищ путем намыва второго яруса сопровождалось реализацией комплексного мониторинга, обеспечивающего получение информации о состоянии грунтов как основания сооружений, деформациях откосов, а также

самоочищения грунтовых вод в процессе протекания физико-химических и биохимических процессов при их разгрузке в речную систему Балтийского моря.

Было доказано, что самоочищение от неорганических соединений связано с активно протекающими процессами сорбции на глинистых частицах. Самоочищение от органических углеводородов – солярового масла – происходит за счет активности полного биохимического разложения и их утилизации микроорганизмами вплоть до генерации газов. Стоит отметить, что разрушение цементационных связей в анаэробных условиях и, соответственно, диспергация глинистых грунтов, с одной стороны, приводит к уменьшению их прочности, а с другой – к увеличению их удельной поверхности, что способствует улучшению сорбционной способности пород и возможности самоочищения. Данное положение подтверждается снижением содержания нефтепродуктов с 6-10 мг/дм^3 в водах дренажной канавы до практически полного их исчезновения (следы) в зоне высачивания грунтовых вод в виде родников в речную систему.

Аналогичный анализ возможности протекания процесса фильтрационной консолидации водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов в основании пионерных и намывных дамб выполнен для хвостохранилища, введенного в эксплуатацию в 60-х годах XX в. на севере Кольского полуострова вне зоны распространения многолетнемерзлых пород. До определенного времени хвостохранилище состояло из двух емкостей для складирования отходов обогатительной фабрики по извлечению полезных компонентов – цветных металлов. После превышения определенной отметки намыва разделительная дамба была затоплена, и в настоящее время хвостохранилище функционирует как единая система. Особенностью расположения объекта выступает его эксплуатация вкрест долины отведенной в канал реки так, что некоторые из створов дамб непосредственно приурочены к ее бывшему руслу (рисунок 3.21).

При этом, как видно на рисунке 3.21, хвостохранилище расположено вблизи второй реки, впадающей в губу Баренцева моря приблизительно в 20 км. Минимальное расстояние между дренажной канавой у Северной дамбы и урезом воды реки составляет всего 10 м. Технологический процесс предусматривает транспортировку отходов обогатительной фабрики в форме пульпы, где твердая фаза представлена продуктами переработки сульфидных медно-никелевых руд в виде псефитовых частиц различного размера. Жидкая составляющая пульпы, аналогично предыдущему случаю, загрязнена реагентами флотационного обогащения, включая комплекс органических и неорганических компонентов, в том числе ксаногенаты и аэрофлоты.

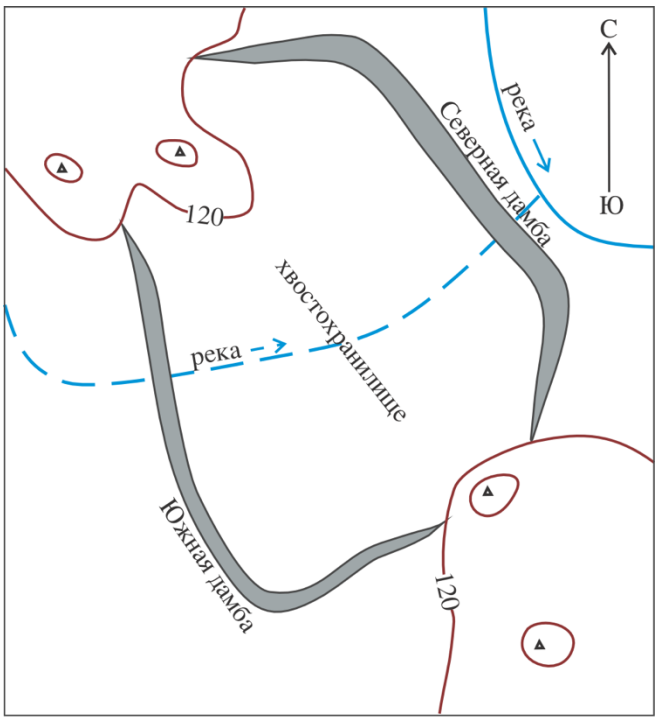


Рисунок 3.21 – Схема размещения хвостохранилища

Гидротехническое сооружение приурочено к долине реки, в разрезе которой прослеживаются диабазы протерозойского возраста, моренные и флювиогляциальные отложения, заполненной толщей аллювиальных, аллювиально-озерных и болотных образований. Из типовых разрезов выделен тот, который представлен преимущественно водо- и водогазонасыщенными глинистыми грунтами (рисунок 3.22).

Диабазы характеризуются развитой системой трещиноватости различной интенсивности, степень которой определяется в том числе и тектонической активностью территории. Комплекс четвертичных отложений различного генезиса характеризуется невыдержанностью по простиранию и по мощности (достигающей более 40-50 метров), что определяет различия в устойчивости отдельных участков пионерных и намывных дамб.

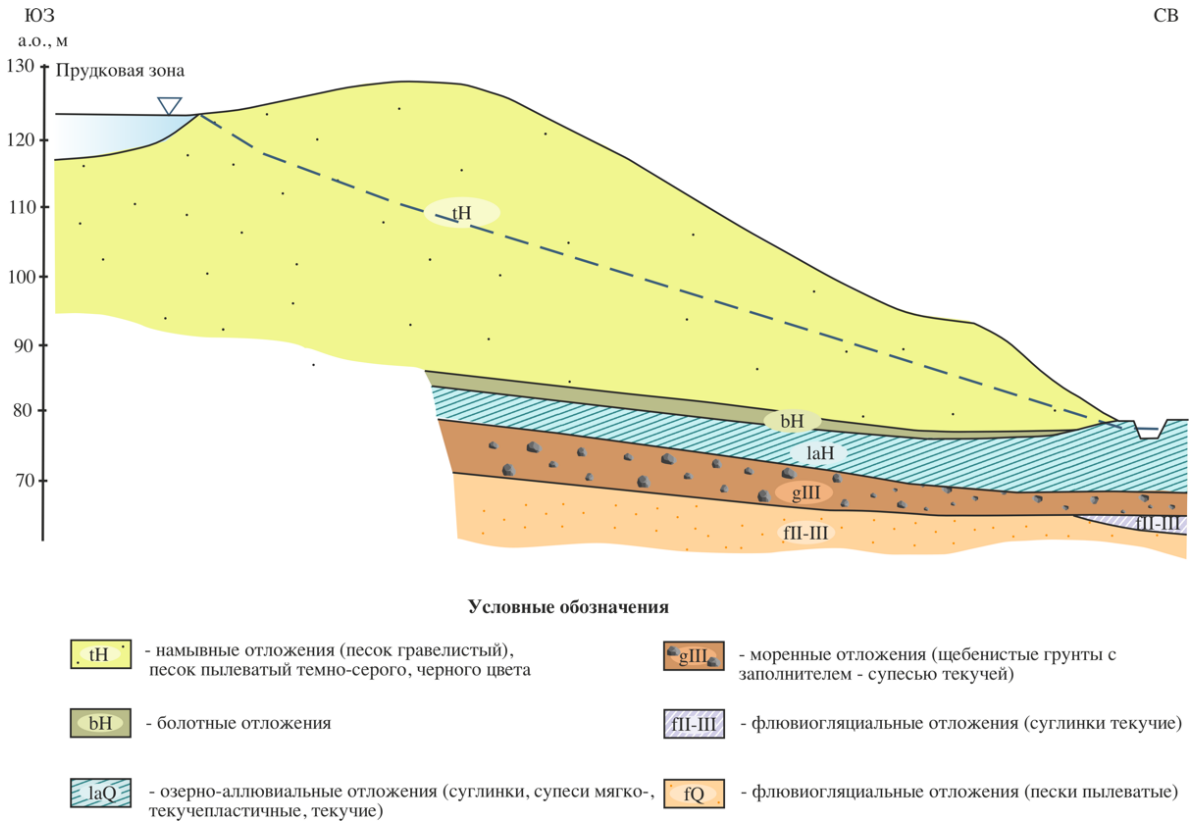


Рисунок 3.22 – Схематический инженерно-геологический разрез хвостохранилища и его основания

Толща моренных и флювиогляциальных отложений, суммарная мощность которых достигает десятков метров, отличается разнообразием состава. В бортах долины реки такие отложения выходят на поверхность. В тальвеге долины данные грунты в случае их глинистого состава преимущественно характеризуются неустойчивыми консистенциями, тогда как на склонах долины, в зонах их выхода на поверхность, они часто имеют твердую консистенцию. В долине эти отложения перекрываются аллювиальными и озерно-аллювиальными разностями, сложенными глинистыми грунтами неустойчивых консистенций – от текучей до текучепластичной, суммарной мощностью до 10 м. Расположение хвостохранилища в долине отведенной реки определяет наличие участков заболачивания и глееватых почв. Соответственно, в поверхностной части разреза распространены болотные отложения – торфы, максимальная мощность которых достигает 5-7 м, чаще составляя 1-2 м. Стоит отметить, что намыв хвостов осуществлялся непосредственно на торфяные отложения – предварительное удаление болот не производилось. Расположение хвостохранилища за полярным кругом не исключает развития богатого микробиоценоза. В болотных отложениях таких территорий установлено наличие не только мезофильных форм микроорганизмов, но и психрофильных, обладающих высокой толерантностью к низким температурам. Устойчивость бактерий к низкотемпературным условиям подтверждена серией канадских исследований, а также работами Р.Э. Дашко при изучении подмерзлотных вод на месторождении «Купол» (Чукотский автономный округ) [41,

160]. Установлено, что содержание анаэробных микроорганизмов в таких водах достигает 10^3-10^7 КОЕ/мл [41].

Гидрогеологические условия района расположения хвостохранилища характеризуются развитием трех водоносных комплексов и горизонтов, находящихся в тесной гидравлической связи. Водоносный комплекс коренных пород, приуроченный к зоне трещиноватых диабазов протерозойского возраста, характеризуется варьированием мощности в пределах первого десятка метров. Водоносный комплекс четвертичных отложений связан с песчано-гравийными прослоями моренных и флювиогляциальных отложений. Стоит отметить влияние болотных вод, обогащенных легко- и трудноокисляемыми органическими соединениями, на данный горизонт. Обстановка характеризуется значениями окислительно-восстановительного потенциала (Eh, mV), приближенными к нулевым или отрицательным величинам. Естественная минерализация водоносного комплекса до начала техногенного воздействия составляла 100-150 мг/дм^3 при их гидрокарбонатно-кальциево-магниевом составе.

Техногенный водоносный горизонт, формируемый в теле намывных песков прудковой зоной, служит постоянным источником контаминации естественных подземных вод и, соответственно, грунтов основания в пределах разреза хвостохранилища и прилегающих территорий. Прудковые воды обогащены органическими и неорганическими соединениями как абиогенного, так и биогенного происхождения, связанными с применением реагентов в цикле флотационного обогащения, а также непосредственно с присутствием компонентов медно-никелевых руд (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Химический состав прудковых (оборотных) вод

Компоненты		Значение
Содержание, мг/дм^3	SO_4^{2-}	907,0
	HCO_3^-	842,4
	Cl^-	138,9
	NO_3^-	5,88
	NO_2^-	0,905
	NH_4^+	1,51
	Fe (общ)	0,351
	Ni^{2+}	0,138
	Cu^{2+}	0,014
	Ксаногенаты	3,63
	Аэрофлоты	3,870
pH		9,6
Сухой остаток, мг/дм^3		2507,0

Повышенная минерализация относительно фоновых значений, характерных для подземных вод в естественных условиях, прослеживается на расстоянии до 300 м от дренажной канавы Северной дамбы, которая аккумулирует воды техногенного водоносного горизонта, формирующегося за счет прудковых (рисунок 3.23).

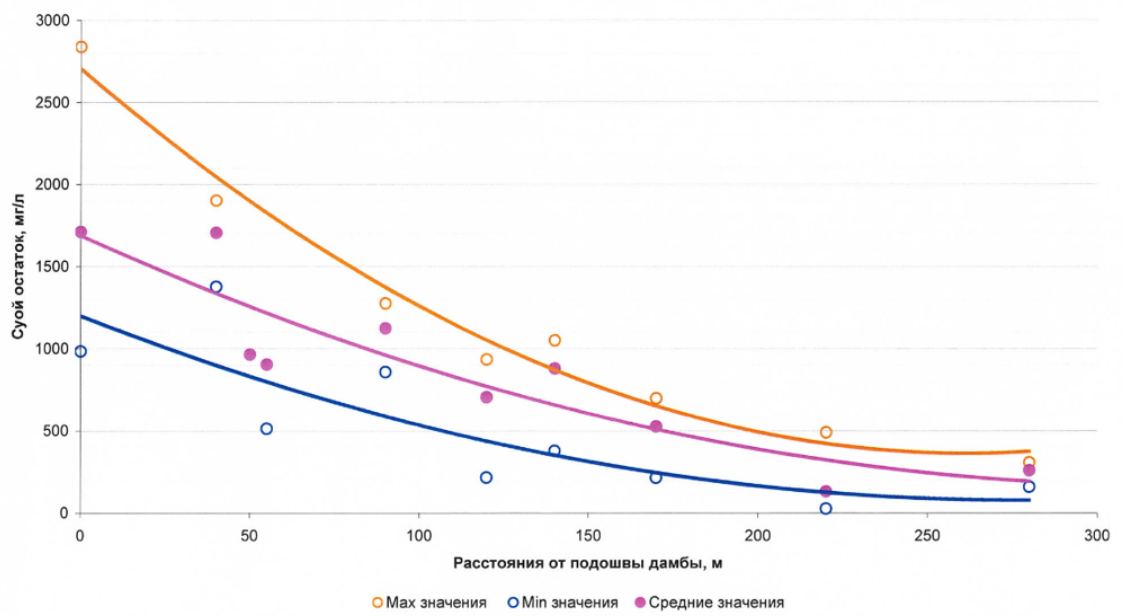


Рисунок 3.23 – Изменение содержания сухого остатка в подземных водах четвертичного водоносного горизонта в зависимости от расстояния до Северной дамбы

Определение количества флотореагентов в грунтовых водах прилегающего разреза к хвостохранилищу показывает закономерность их изменения с концентрацией ионов никеля Ni^{2+} и меди Cu^{2+}. Наблюдаются следующие диапазоны содержания веществ: ксантогенаты 0,015-0,2 мг/дм^3, достигая значений 0,5-0,6 мг/дм^3; аэрофлоты – до 0,01-0,5 мг/дм^3, реже до 2,8 мг/дм^3. Содержание тяжелых металлов варьирует в следующих пределах: никель – 0,02-0,1 мг/дм^3, редко до 0,6 мг/дм^3; медь – 0,01-0,04 мг/дм^3, до 0,1 мг/дм^3.

Следует подчеркнуть, что химический состав, приведенный в таблице 3.5, отражает характеристики вод, физико-химическая обстановка которых соответствует окислительным условиям. Данный вывод подтверждается преобладанием нитратов NO_3^- над нитритами NO_2^- в пробах воды, что характерно для окислительных условий, тогда как накопление NO_2^- свидетельствует о протекании восстановительных реакций. При снижении окислительно-восстановительного потенциала Eh ниже 0 mV в анаэробных условиях полный процесс денитрификации протекает вплоть до образования малорастворимого газа – молекулярного азота N_2. Вполне понятно, что такой процесс – биохимический и обеспечивается деятельностью денитрифицирующих бактерий. Это может быть объяснено тем, что в прудке преобладает формирование восстановительных условий, определяемых присутствием органических веществ. Трансформация восстановительной обстановки в окислительную может быть объяснена отбором, длительной транспортировкой и хранением пробы до начала проведения анализа.

Сульфатредуцирующие бактерии способствуют биохимическому образованию сероводорода H_2S. В аэробной обстановке, возникающей при простое пробы, сероводород

окисляется вплоть до образования сульфатов, чем и объясняется зафиксированное в пробе высокое содержание SO_4^{2-}.

Доказательством существования анаэробных условий и активной деятельности микроорганизмов, в частности сульфатредуцирующих и железовосстанавливающих, служит характерная окраска намытых песков – от темно-серой до черной, что объясняется образованием соединений гидротроиллита $FeS \cdot nH_2O$. Цвет отложений фиксируется в научно-исследовательских отчетах по оценке устойчивости намывных дамб хвостохранилищ без объяснения процессов генерации таких образований.

Проектирование сооружения, а также проведение последующих экспертиз возможности повышения отметки гребня намыва и, соответственно, выполнение расчетов коэффициентов устойчивости для различных профилей намывных откосов, велось на предположении развития и завершения процессов фильтрационной консолидации в глинистых грунтах основания и увеличения параметров сопротивления сдвигу грунтов под действием давления от намытых хвостов. Соответственно, лабораторные исследования для оценки параметров сопротивления сдвигу проводились по консолидировано-дренированной (КД) и консолидировано-недренированной (КН) схемам испытаний. Полученные при этом показатели сопротивления сдвигу водонасыщенных глинистых грунтов основания находились в следующих диапазонах: угол внутреннего трения φ – 24-29°, сцепление *c*: 0,003–0,014 МПа (значения изменялись в зависимости от консистенции грунтов). Активная микробиологическая деятельность в водонасыщенных намывных песках влияет на параметры их сопротивления сдвигу, что объясняется образованием биопленок на дисперсных частицах, снижением угла внутреннего трения φ, а также структурированием поровой воды и, соответственно, уменьшением ее способности к водоотдаче и переходу хвостов в состояние плывунов.

Расчет устойчивости пионерных и намывных дамб выполнялся с использованием указанных характеристик φ и *c*. При этом углы намывных откосов на слабых глинистых грунтах составляли более 15-17°. Согласно выполненным расчетам, устойчивость обеспечивается практически по всем профилям Южной и Северной дамб. Исключением выступает участок Северной пионерной дамбы, который возведен в устье отведенной реки (в месте ее бывшего впадения в существующую реку), где в основании залегают наиболее слабые водонасыщенные глинистые разности. Для таких профилей утверждалось, что устойчивость будет обеспечена после завершения процессов фильтрационной консолидации за счет устройства дополнительного медленно возводимого отсыпного пригруза. Встает вопрос: если фильтрационная консолидация водонасыщенных тонкодисперсных отложений не закончилась за 60 лет, следует ли принимать ее во внимание на последующих десятилетиях эксплуатации данного гидротехнического сооружения?

В настоящее время некорректные проектные решения, базирующиеся на положениях теории фильтрационной консолидации, объясняют отдавливание глинистых грунтов из-под намывных дамб при увеличении угла намывных откосов более 11°.

Проведенный анализ состояния водонасыщенных глинистых грунтов основания аллювиального и озерно-аллювиального генезиса показывает, что, несмотря на действие давления в течение более 60 лет и залегания глинистых разностей различной мощности между дренирующими слоями флювиогляциальных и насыпных песков, отсутствует какая-либо зависимость между величиной действующего давления и состоянием грунтов основания (рисунок 3.24).

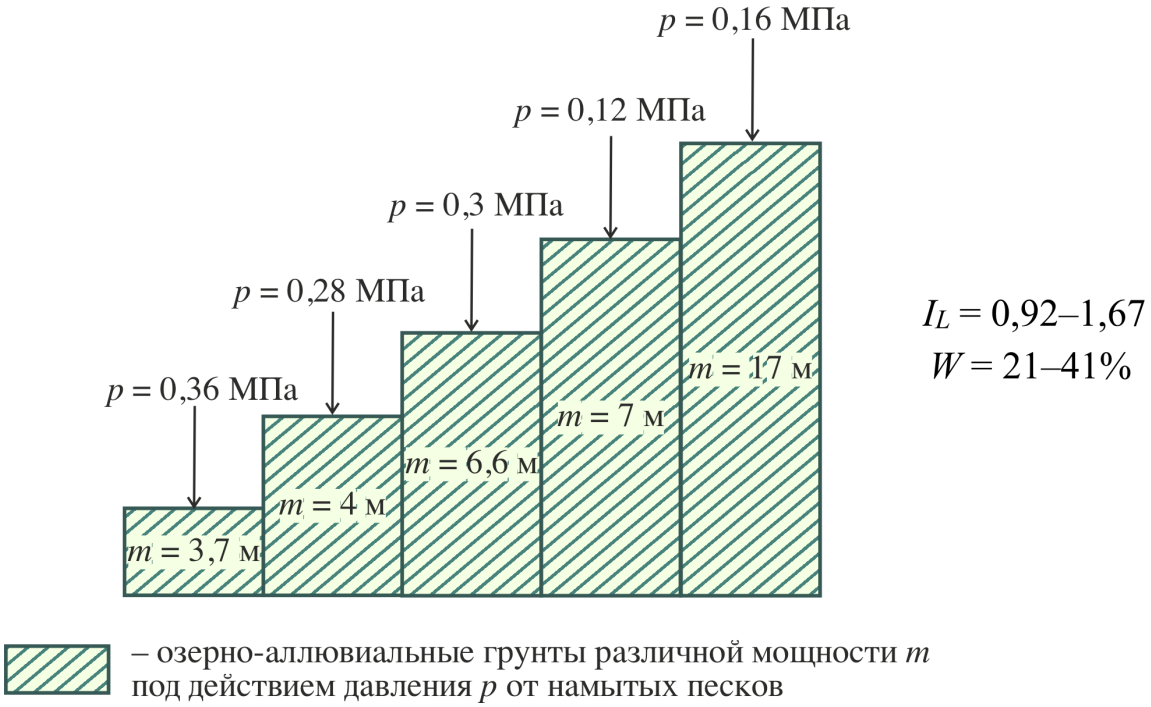


Рисунок 3.24 – Схема озерно-аллювиальных глинистых грунтов различной мощности m под действием давления намывных песков *p*

Отмечается широкий диапазон давлений от намытых песков – от 0,12 до 0,36 МПа. Наиболее высокие значения давлений фиксируются на участках с минимальной мощностью слабых водонасыщенных глинистых грунтов основания, представленных, как было указано ранее, озерно-аллювиальными отложениями. В то время как минимальные давления характерны для участков Южной дамбы хвостохранилища, в пределах которых мощность толщи глинистых грунтов в основании достигает максимальных значений.

Установлено, что водонасыщенные глинистые грунты сохраняют свое естественное физическое состояние, которое было зафиксировано еще при проведении изысканий в 1960-х годах – текучую и текучепластичную консистенцию (I_L = 0,92-1,67) при сохранении влажностей в диапазоне W = 21-41%. Действующие градиенты напора $I_д$ в основании, определяемые мощностью глинистых отложений и величиной порового давления, составляют 1,5-3,5. При этом

градиенты начала фильтрационной консолидации в зависимости от содержания глинистой фракции изменяются в пределах от 25 до 40, что в 10-16 раз превышает значения $I_д$. Выявленные закономерности не соответствуют положениям теории фильтрационной консолидации, согласно которой под действием давления должно наблюдаться уплотнение слоя глинистого грунта с отжатием поровой воды и соответствующим снижением влажности. Следовательно, давление не выступает фактором, определяющим состояние грунтов, хотя в соответствии с теоретическими предпосылками на участках с максимальным давлением и минимальной мощностью слабых глинистых отложений следовало бы ожидать процессы уплотнения за счет оттока поровой воды.

Следовательно, анализ длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности такого сооружения промышленной гидротехники необходимо выполнять с позиций сохранения неконсолидированного состояния водонасыщенных глинистых грунтов и влияния факторов, способных изменять их прочность.

Важным аспектом при изучении факторов, определяющих прочность и устойчивость водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов основания пионерных и намывных дамб хвостохранилища, выступает исследование деятельности микроорганизмов. Рассматриваемая территория в долине рек характеризуется богатыми источниками поступления микробиоты в подземные воды и грунты основания дамб и разреза прилегающих территорий. К *природным* источникам следует отнести существование болот, которые повсеместно перекрывают озерно-аллювиальные отложения, и, соответственно, оглеенные и глееватые почвы, а также подстилающую песчано-глинистую толщу и грунтовые воды, обогащенные таксонами болотных микроорганизмов. Наличие болот на всей территории определяет отсутствие или низкое содержание кислорода во всей нижележащей толще (анаэробную обстановку среды). На участках с мощностью болот более 5-10 м формируется глубоко восстановительная обстановка, в условиях которой прослеживается активная деятельность преимущественно анаэробных форм микроорганизмов, которые необходимо принимать во внимание, особенно генерирующих малорастворимые газы CH_4, N_2, H_2. Следует отметить, что в Академии наук под руководством С.Н. Дедыш функционирует лаборатория, проводящая исследования и изучающая разнообразие и структуру богатых микробных сообществ северных болот, что доказывает необходимость учета данного фактора [121, 131].

Кроме того, как известно, молодые субаквальные грунты как морских, так и пресных водоемов, являясь донными отложениями, всегда обогащены богатым биоценозом. При этом техногенные компоненты, применяемые в цикле флотационного обогащения: соли и эфиры ксаногенатовых кислот, а также аэрофлоты органического происхождения выступают в качестве энергетического субстрата для природного микробиоценоза. Особенность их химической структуры заключается в относительно короткой углеродной цепи. Так, бутиловый ксаногенат

калия содержит 5 молекул углерода (C_5), а натриево-бутиловый аэрофлот (органическая производная дитиофосфорной кислоты) – 8 молекул углерода в цепи (C_8). Энергетические соединения с такой длиной цепи характеризуются как трудноусваиваемые микроорганизмами, вследствие чего их утилизация затруднена и их влияние прослеживается на большие расстояния. Увеличению активности деятельности микробиоты способствует содержание в прудке-накопителе и, соответственно, в техногенном и природных водоносных горизонтах доступных для усвоения питательных субстратов (K^+, Ca^{2+}, соединения азота, серы и др.). Как при обосновании длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности рассмотренных ранее хвостохранилищ, так и в данном случае, важным выступает учет деятельности газогенерирующих таксонов микроорганизмов, что свидетельствует о переходе водонасыщенных разностей в водогазонасыщенные, в которых поровое давление вообще не способно возникать. Поступление контаминантов и активизация микробной деятельности способствуют негативной трансформации состояния, состава и свойств песчано-глинистых грунтов, что уже и было доказано ранее.

Важно отметить, что при анализе грунтов основания необходимо учитывать присутствие моренных глинистых разностей в верхней части разреза на участках без болотных отложений (в бортах долины реки), структурные связи которых образованы соединениями трехвалентного железа Fe^{3+}. Формирование анаэробных условий определяет протекание восстановительных процессов, приводящих к переходу Fe^{3+} в двухвалентную форму Fe^{2+}, в результате чего закономерным будет выступать разрушение цементационных связей и диспергация имеющихся агрегатов, увеличение удельной поверхности водонасыщенных глинистых грунтов и повышение их гидрофильности.

3.6 Анализ условий эксплуатации транспортных сооружений – насыпей

К числу весьма актуальных проблем относится прогнозирование длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности насыпей различной высоты, в основании которых залегают водо- и водогазонасыщенные тонкодисперсные отложения малой и частично средней степени литификации, на автомобильных и железных дорогах.

Как уже было сказано ранее в главе 1, практически повсеместное распространение слабой водо- и водогазонасыщенной глинистой толщи прослеживается не только на территории России, но и в странах Скандинавии, Канады, США и других регионах. Понимание процессов, протекающих в основании транспортных сооружений, имеет особое значение для прогнозирования условий безопасной длительной эксплуатации транспортных сооружений, особенно при широком развитии сети автомобильных дорог высокого класса. Следует отметить, что проектирование транспортных насыпей часто ведется исходя из консолидированного

состояния грунтов основания, без должного учета поведения глинистых отложений неустойчивых консистенций под действием давления от возводимых сооружений.

Выполнен анализ деформаций ленточных глин, слагающих основание десятиметровой автодорожной насыпи в районе Маратами (Квебек, Канада). Мощность ленточных глин достигает 12 метров, отложения подстилаются моренными суглинками. Такие ленточные глины подобны отложениям, залегающим на территории Ленинградской области. Ленточные глины озерно-ледникового генезиса характеризуются ленточной текстурой, выраженной в чередовании пылеватых и тонких глинистых прослоев. Канадские ленточные глины имеют повышенное содержание глинистой фракции и, соответственно, более высокие показатели естественной влажности W и число пластичности I_P по сравнению с теми же генетическими типами Ленинградской области. В озерно-ледниковых отложениях Канады отмечается присутствие карбонатов, которые участвуют в формировании цементационных структурных связей. Верхняя толща мощностью порядка 2-3 м может быть охарактеризована как ожелезненная зона гипергенеза с формированием жестких структурных связей за счет соединений трехвалентного железа Fe^{3+}, что определяет некоторое агрегирование частиц и, соответственно, снижение гидрофильности грунтов. Подобные закономерности упрочнения верхней толщи озерно-ледниковых образований характерны и для Северо-Западного региона России.

Указанные особенности определяют специфические свойства данных пород. С одной стороны, наблюдается сохранение достаточной прочности при высокой влажности, с другой – формируется повышенная чувствительность к внешним давлениям и изменение напряженно-деформированного состояния за счет наличия жестких структурных связей (рисунок 3.25).

Тело насыпи возведено из мелко- и среднезернистых песков с плотностью 2 г/см^3. Тогда максимальное давления, передаваемое на основание, составляет $p_c = 0{,}2$ МПа. Для оценки поведения подстилающих грунтов на глубинах 3,4 м и 6,7 м были установлены гидравлические закрытые пьезометры. Для измерения осадки смонтированы специальные датчики-пластины. Уровень грунтовых вод на момент проведения исследований устанавливался на отметке 0,7 м от дневной поверхности. Соответственно, все нижележащие грунты характеризовались водонасыщенным состоянием.

Восьмимесячные наблюдения позволили зафиксировать отсутствие рассеивания порового давления, что свидетельствует об отсутствии протекания процессов фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов. При этом осадка основания за период строительства составила 20 см, что составляет почти 50% от общей величины. Через 8 месяцев эксплуатации насыпи она достигла 45 см (рисунок 3.26).

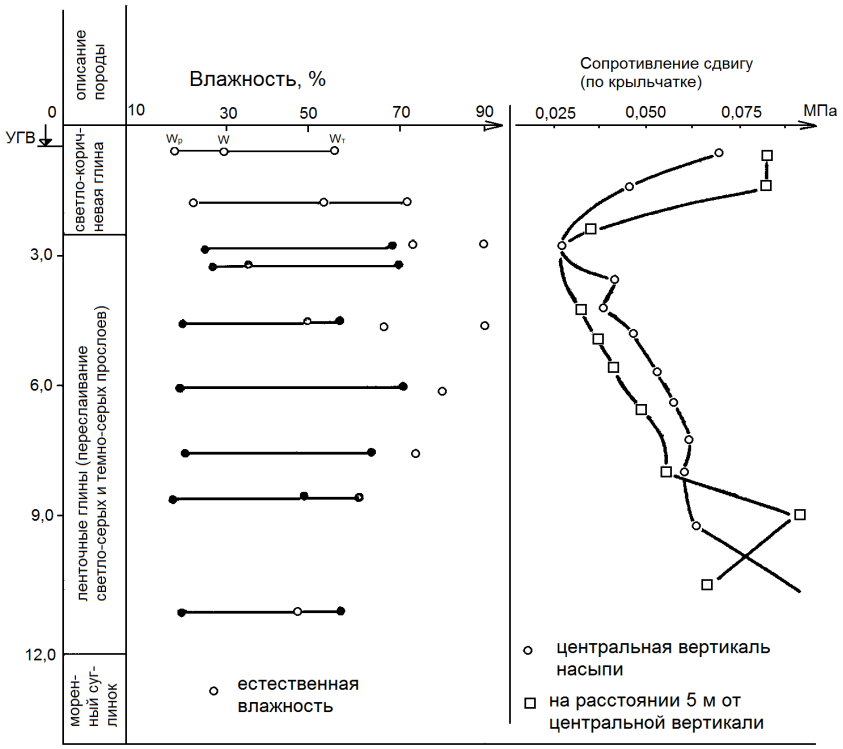


Рисунок 3.25 – Изменение естественной влажности, пределов пластичности и сопротивления сдвигу по данным полевых исследований глинистых грунтов в основании насыпи [35]

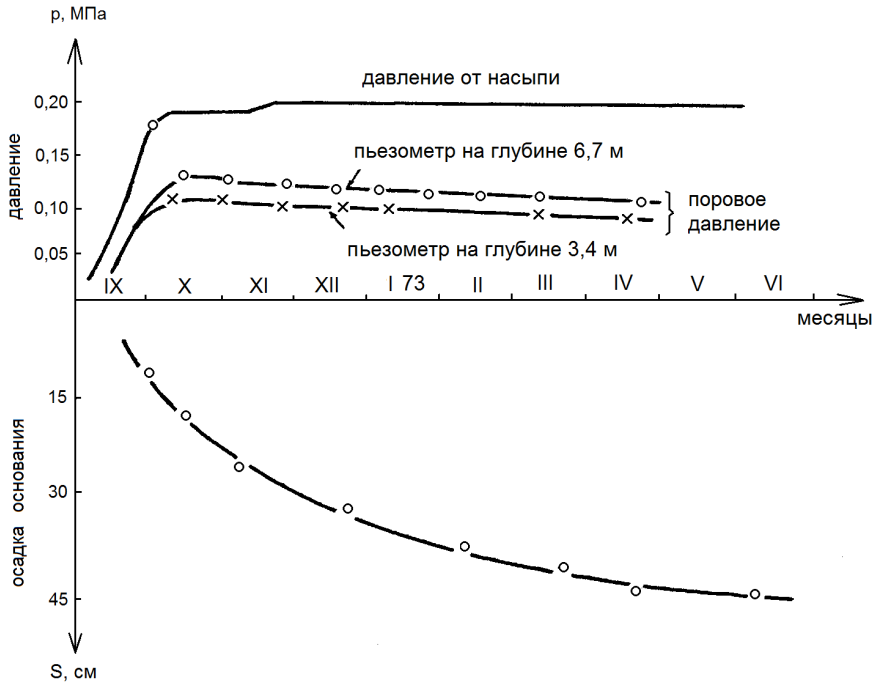


Рисунок 3.26 – Изменение характера давления по установленным датчикам и осадки в основании насыпи в процессе ее строительства и эксплуатации [35]

Перед канадскими исследователями встал вопрос об изменении прочности и, следовательно, несущей способности грунтов, имеющий важное практическое значение для прогноза длительной эксплуатации насыпи на основаниях слабых глин при условии отсутствия

процесса фильтрационной консолидации. При этом ширина насыпи b составляет 50 м, а мощность ленточных глин основания $h = 12$ м, что определяет отношение $h/b = 0{,}24$, то есть, решение одномерной задачи уплотнения.

Наибольшая величина давлений составляла 0,2 МПа. Начало разрушения структурных связей в этих отложениях было зафиксировано при давлениях более 0,075 МПа, а наиболее интенсивное их разрушение начинается при превышении давления 0,1 МПа. При давлениях более 0,1 МПа наблюдается постепенное уменьшение прочности грунтов за счет необратимого разрушения цементационных связей, и характер разрушения становится пластическим. Следует отметить, что максимально действующие градиенты напора $I_д$ в основании сооружения с учетом поровых давлений (за вычетом гидростатического), отнесенных к мощности толщи, не превышают 0,6. Чтобы создать такой градиент в компрессионном приборе, достаточно действия давления всего 0,0006 кгс/см^2. При этом градиент начала фильтрационной консолидации для водонасыщенных тонкодисперсных отложений основания составляет порядка 50-60, что несоизмеримо со значениями $I_д$. При отсутствии фильтрационной консолидации и одновременном действии давлений, превышающих прочность структурных связей, наблюдается уменьшение прочности сцементированных глинистых грунтов во времени.

Следовательно, развитие осадки основания насыпей происходит согласно плоской задаче распределения напряжений за счет развития процесса ползучести глинистых пород под действием нормальных и касательных напряжений, приводящих к постепенному разрушению структурных связей и снижению прочности грунтов. Поверхность скольжения при этом проходит по слабым грунтам с захватом основания, прочность которых оценивается испытаниями крыльчаткой.

Переход транспортного сооружения в непригодное к эксплуатации состояние может сопровождаться выдавливанием более слабых грунтов из-под насыпи при полном отсутствии возможности уплотнения вмещающих разностей во времени.

В качестве примера может быть приведен анализ устойчивости транспортной насыпи, возведенной на слабых глинистых отложениях, содержащих органику, в одном из районов Белоруссии. При проведении изысканий в разрезе глинистых грунтов были зафиксированы прослои заторфованных грунтов, содержащих хорошо разложившуюся органику с влажностью W более 70%, которые характеризовались низкими значениями плотности минеральной части (около 2,25 г/см^3).

Характер развития деформаций насыпи свидетельствовал не о плавно протекающей осадке, а об ее проседании при значительном превышении давления, равного 0,08 МПа, что соответствовало высоте насыпи 6,5 м. Величина осадки насыпи составила 0,25-0,30 от высоты насыпи, причем развитие этого процесса характеризовалось достаточно высокой скоростью – в

течение 2-3 месяцев за счет отдавливания прослоев слабых грунтов в основании насыпи – грунтов, содержащих органику.

Исследования устойчивости насыпи показали, что в основании происходило выдавливание наиболее слабых разностей, а не их уплотнение за счет протекания процесса фильтрационной консолидации, хотя глинистые разности подстилаются крупнозернистыми песками. Данный вывод может быть сделан на основе сопоставления показателей изменения свойств пород до и после возведения насыпи (таблица 3.11).

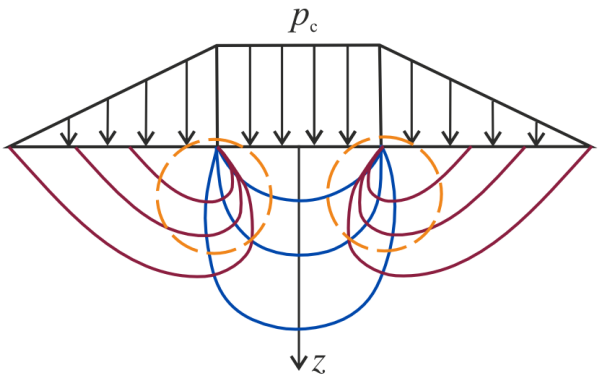
Таблица 3.11 – Изменение показателей физических свойств глинистых отложений в основании насыпи [35]

Показатели физических свойств	Данные исследования свойств		Примечание
	до возведения насыпи	после возведения насыпи	
Плотность, г/см^3	1,48–2,10	1,71–2,05	Геологический разрез основания насыпи: заторфованные водонасыщенные разности мощностью до 6 м, ниже – суглинки и глины мощностью 1,5–5,0 м, подстилающиеся песками крупнозернистыми
Плотность скелета, г/см^3	1,04–1,88	1,33–1,88	
Влажность, %	14,5–81	21,8–63,6	
Число пластичности, %	2–35	11–17	
Плотность минеральной части, г/см^3	2,26–2,96	2,63–2,88	

Согласно данным таблицы 3.6 может быть отмечено значительное сокращение диапазона варьирования числа пластичности, что свидетельствует о выдавливании наиболее легких по составу отложений, обогащенных органикой, как наиболее неустойчивых разностей. Вследствие этого наблюдается изменение интервала плотности минеральной части грунтов и увеличение наименьших значений показателей плотности скелета и естественной влажности. При этом максимальные значения тех же параметров свойств до и после возведения насыпи остались без изменений.

Устойчивость насыпей следует анализировать в соответствии с положениями механики грунтов о распределении напряжений с учетом действия внешнего давления по трапеции, представляющей собой сочетание треугольной и прямоугольной нагрузок. Передача давления от насыпи реализуется по системе «грунт-грунт» и носит гибкий характер.

Вполне понятно, что распределение внешнего давления под треугольными частями трапеции асимметрично, что предопределяет и асимметричный характер распределения нормальных напряжений σ_z в основании, соответственно, изобары распределения напряжений также носят асимметричный характер – они смещены в сторону действия максимального давления в треугольнике в зону, заходящую в прямоугольную часть давления с формированием зоны концентрации напряжений (рисунок 3.27).



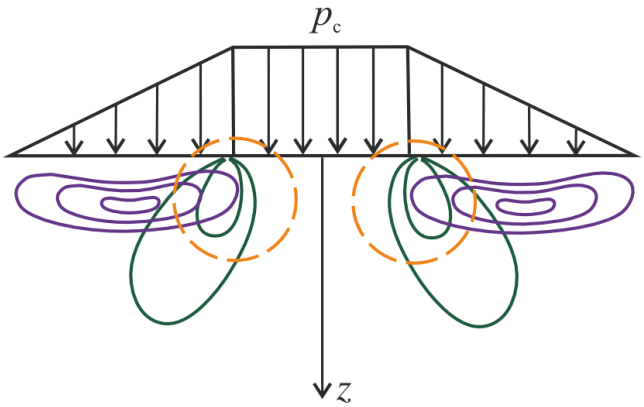
изобары нормальных напряжений σ_z от действия равномерно распределенного постоянного давления

изобары нормальных напряжений σ_z от действия распределенного давления по треугольнику

зоны концентрации нормальных напряжений

Рисунок 3.27 – Характер распределения нормальных напряжений σ_z от действия распределенной трапециевидной нагрузки

При проектировании, строительстве и эксплуатации насыпей на песчано-глинистых грунтах основания игнорирование реального распределения напряжений может привести, как уже было проиллюстрировано ранее, к развитию деформаций выдавливания, при этом возрастающие касательные напряжения τ_{zy} способны спровоцировать разрушение насыпи. Касательные напряжения отсутствуют только в точке на контакте насыпи с основанием, во всей остальной зоне треугольной части нагрузки они присутствуют (рисунок 3.28). Совмещение треугольной и прямоугольной нагрузок также приводит к формированию зоны концентрации напряжений на участке их сочленения.



изобары касательных напряжений τ_{zy} от действия равномерно распределенного постоянного давления

изобары касательных напряжений τ_{zy} от действия распределенного треугольного давления

зоны концентрации касательных напряжений

Рисунок 3.28 – Характер распределения касательных напряжений τ_{zy} от действия распределенной трапециевидной нагрузки

Стоит отметить, что все расчеты устойчивости насыпей на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах должны сопровождаться оценкой достоверности положения поверхности скольжения – в теле насыпи, по контакту и с захватом основания. Последний вариант наиболее вероятен, прежде всего, когда угол внутреннего трения φ грунтов основания меньше, чем φ отложений, слагающих тело насыпи. Согласно трудам В.Г. Фисенко, при φ грунтов основания меньше 13° высока вероятность прохождения поверхности скольжения с захватом основания. При этом достоверность таких расчетов зависит не только от корректности определения напряженно-деформированного состояния грунтов основания, но и достоверностью закладываемых параметров сопротивления сдвигу грунтов – φ и *c*, определение которых должно проводиться по неконсолидированно-недренированной схеме испытаний. Обязательным условием при оценке несущей способности грунтов основания также является учет истории контаминации территории.

3.7 Выводы по главе 3

1. Теория фильтрационной консолидации, широко применяемая в практике инженерной геологии и механики грунтов, базируется на допущении о наличии в водонасыщенных глинистых грунтах свободной воды, фильтрация которой подчиняется закону Дарси. Проведенные экспериментальные исследования, выполненные методом ЯМР, убедительно доказали, что в тонкодисперсных отложениях вода в объеме отсутствует, а поровая вода обладает высокой степенью структурированности, что определяет ее инертность по отношению к действию внешнего давления. Следовательно, уплотнение глинистых разностей под действием давления, рост их плотности и повышение прочности невозможно в условиях отсутствия фильтрационной консолидации.

2. Анализ эксплуатации гражданских и промышленных сооружений, проектируемых по II-й группе предельных состояний, возводимых на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах, показал, что использование завышенных значений угла внутреннего трения φ, определенного по консолидированно-дренированной схеме испытаний, приводит к высоким значениям расчетного сопротивления *R*. При этом в условиях превышения давления от сооружения p_c над значением *R* грунты основания переходят в нелинейную стадию деформирования (II и III фазы согласно кривой Н.М. Герсеванова), что сопровождается развитием незатухающих осадок, неравномерных деформаций и выпором грунта из-под подошвы фундамента. При этом само расчетное сопротивление *R* имеет определенный физический смысл и соответствует такому давлению, при котором глубина зон предельного равновесия ограничивается величиной 0,25*b* при условии линейности развития деформаций и затухания осадок во времени. В связи с этим определение характеристик φ и *c* должно выполняться согласно неконсолидированно-недренированной схеме испытаний в условиях

возможности бокового расширения образцов при сохранении естественной влажности, плотности и консистенции образцов.

3. Формирование и преобразование инженерно-геологических условий определяется также длительностью и направленностью освоения территорий, связанного с деятельностью человека. Соответственно, необходимо учитывать длительную контаминацию грунтов основания органическими и неорганическими соединениями абиотического и биотического генезиса. Привнесение различных источников контаминации в подземное пространство приводит к формированию восстановительной среды (Eh < 0 мВ), активизации деятельности микроорганизмов, разрушению жестких структурных связей за счет редукции соединений Fe^{3+} в форму Fe^{2+}. В результате водонасыщенные глинистые грунты основания способны переходить в квазипластичное состояние, что в первую очередь отражается на снижении их несущей способности и требует учета при оценке устойчивости оснований.

3. Длительная устойчивость и эксплуатационная пригодность сооружений промышленной гидротехники (хвостохранилищ), проектируемых по I-й группе предельных состояний, определяется целым комплексом взаимосвязанных факторов, которые учитывают не только изменение напряженно-деформированного состояния грунтов основания в процессе намыва, но и трансформацию гидрогеологических и инженерно-геологических условий под воздействием гидродинамического давления и контаминации подземной среды промышленными стоками. Так, органические и неорганические компоненты, содержащиеся в водах цикла флотации, способны изменять свойства компонентов подземного пространства, в первую очередь грунтов, что необходимо учитывать при оценке устойчивости сооружений. Анализ эксплуатации в несколько десятилетий двух хвостохранилищ убедительно доказывает, что фильтрационная консолидация водонасыщенных глинистых разностей основания не протекает, а их влажность, плотность и консистенция остаются неизменными.

4. Исследование поведения транспортных насыпей на слабых водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложениях подтверждает, что развитие осадок не происходит за счет протекания процесса фильтрационной консолидации. При этом действующие градиенты напора $I_д$ оказываются значительно ниже показателя начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$, что исключает возможность оттока поровой воды. Определяющее значение для прогноза длительной устойчивости насыпей приобретает учет распределения нормальных и касательных напряжений по трапеции (с учетом действия постоянного давления и давления по треугольнику), определение корректного положения поверхности скольжения и расчет устойчивости с использованием параметров сопротивления сдвигу грунтов, определенных по неконсолидированно-недренированной схеме испытаний.

Глава 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ НА ВОДО- И ВОДОГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ МАЛОЙ И ЧАСТИЧНО СРЕДНЕЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ

4.1 Общие положения нормативной документации о проектировании наземных сооружений различного назначения, возводимых на водонасыщенных тонкодисперсных грунтах

Развитие и совершенствование инженерной геологии как междисциплинарной науки позволяет решить одну из современных, актуальных и важных задач в области повышения безопасности проектирования, строительства, реконструкции и длительной эксплуатации наземных сооружений различного назначения в сложных инженерно-геологических условиях – при наличии в их основании водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных грунтов. Именно с такими отложениями нередко связаны аварии сооружений либо их переход в ограниченно-работоспособное состояние. Известно, что на таких грунтах возводятся не только гражданские и промышленные объекты, но и гидротехнические, в том числе промышленной гидротехники, для которых, как правило, отводятся территории, сложные в инженерно-геологическом и геотехническом отношении. Достаточно остро также стоит вопрос об обеспечении устойчивости насыпей на слабых основаниях при проектировании автомобильных и железных дорог.

Проектирование наземных сооружений различного назначения в России осуществляется на основе системы взаимосвязанных нормативных документов, главными из которых выступают Градостроительный кодекс РФ (№ 190-ФЗ) и Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (№ 384-ФЗ). Они определяюты основные требования к безопасности и порядку градостроительной деятельности.

Под безопасным строительством и последующей эксплуатацией зданий и сооружений, согласно нормативным документам, принято понимать такое состояние объекта, при котором обеспечивается прочность и устойчивость строительных конструкций и основания при отсутствии угрозы причинения вреда жизни и здоровью людей, имуществу, окружающей среде, а также жизни и здоровью животных и растений. Понятие безопасности исключает разрушение сооружения в целом или его части, разрушение несущих конструкций или их элементов, а также деформации недопустимой величины конструкций и основания, деформации земной поверхности прилегающей к объектам территории. Кроме того, при анализе безопасности строительства и эксплуатации сооружений рассматривается повреждение подземных инженерных систем как результат развития деформаций во времени.

Обеспечение безопасности строительства и эксплуатации наземных зданий и сооружений различного назначения реализуется путем соблюдения действующей нормативной документации, в частности направленной на изучение инженерно-геологических условий и оценку их сложности согласно критериям СП 47.13330 [95]. При этом наиболее значимыми факторами в этих документах выступают: геологическое строение (количество слоев, их выдержанность по мощности и по простиранию), гидрогеологическое строение (количество и выдержанность водоносных горизонтов и водоупоров, однородность химического состава подземных вод), наличие многолетнемерзлых и специфических грунтов, а также возможность развития геологических и инженерно-геологических процессов [95]. Стоит отметить, что приведенные критерии недостаточно исчерпывающи и не отвечают современным требованиям к обеспечению безопасности. Разнообразие литологических типов грунта еще не определяет опасность с позиций оценки сложности инженерно-геологических условий. Так, например, даже при наличии нескольких слоев, большинство из них могут характеризоваться как прочные, при этом всего один залегающий слой может оказаться слабым. Более того, одна и та же толща глинистых грунтов может служить надежным основанием для типовых сооружений, но оказаться непригодным для объектов уникального строительства. Сходным образом, единственный выдержанный водоносный горизонт может обладать сложной гидродинамической обстановкой, высокой агрессивностью по отношению к конструкционным материалам, что необходимо учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов. Сложность инженерно-геологических условий необходимо анализировать с позиций взаимодействия проектируемых, реконструируемых и воссоздаваемых зданий и сооружений с толщей грунтов основания, изменением их НДС, а также их преобразования не только под действием давления, но и изменения гидродинамических, физико-химических, тепловых, биохимических и других условий.

Проектирование наземных сооружений различного назначения осуществляется в двух основных направлениях: новое строительство на неосвоенных и освоенных территориях, а также реконструкция, реставрация существующих объектов и воссоздание утраченных. Второй вариант в первую очередь относится к архитектурно-историческим памятникам, но также включает в себя, например, увеличение этажности зданий, расширение промышленного производства, продление сроков эксплуатации сооружений промышленной гидротехники, а также реконструкцию автомобильных и железных дорог (например, при повышении их технической категории).

При новом строительстве на ранее неосвоенных территориях в период проведения исследований, помимо стандартной оценки категории сложности инженерно-геологических условий, необходимо принимать во внимание и другие аспекты. В первую очередь это относится

к строительству на болотах и заболоченных территориях. Как уже отмечалось в разделе 1.6, болотные отложения – торфа характеризуются богатым микробиоценозом, который при инфильтрации вод, содержащих коллоидные частицы органики, переносится в подстилающую толщу, обогащая отложения и подземные воды микроорганизмами, продуктами их метаболизма, а также органическим веществом абиотического генезиса. Такой процесс, как подчеркивалось ранее, может протекать до глубины 30 и более метров, что зависит в большей степени от проницаемости грунтов. Следовательно, распространенная практика снятия слоя торфа не решает проблему улучшения инженерно-геологических условий, поскольку подстилающие грунты характеризуются как неустойчивые при негативном изменении характера структурных связей, с высоким содержанием микроорганизмов анаэробных форм, толща становится газонасыщенной. Более того, существуют методы неполного снятия болотных отложений относительно большой мощности, при которых оставшаяся часть засыпается песком. Такой подход не может быть применим. Необходимо полное удаление торфа, но также и определение правомочности строительства на данных территориях. При отсыпке таких территорий техногенными грунтами необходим тщательный подбор их состава прежде всего по экологическим критериям во избежание привноса биологических и/или радиоактивных контаминантов в подстилающие водо- и водогазонасыщенные толщи. Строительство на заболоченных территориях требует анализа не только с позиций распространения слабых водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных грунтов. Следует учитывать, как уже отмечалось ранее, что заболачивание территорий, в разрезе которых распространены литифицированные глины, приводит к преобразованию их в слабые разности (с позиций влияния НДС) часто при неизменности влажности и консистенции, с обязательным сохранением трещиновато-блочного строения.

При освоении территорий следует также обращать внимание на развитие специфических типов почв – оглеенных, глееватых, торфяных и др. Их образование связано с активной деятельностью микроорганизмов и продуктов их метаболизма в анаэробных условиях. Под такими почвами наблюдается трансформация песчано-глинистых грунтов, как и под болотными отложениями.

Помимо указанных выше природных условий незастроенных территорий, новое строительство наземных сооружений различного назначения может проводиться на участках, ранее отводившихся под складирование промышленных и/или хозяйственно-бытовых отходов, что также необходимо анализировать при проведении инженерно-геологических исследований. В верхней зоне свалочных масс наблюдается деятельность аэробных формы микроорганизмов. Более глубокие зоны с отсутствием доступа кислорода характеризуются наличием обширных анаэробных микробных сообществ, при этом наблюдается их перенос в нижележащие

водоносные горизонты и, соответственно, в толщи песчано-глинистых грунтов на относительно большие глубины. Кроме того, особое влияние оказывают промышленные свалки, так как в их составе присутствуют органические соединения абиотического и биотического генезиса, специфичные для той или иной отрасли промышленности. Как и в случае с болотными отложениями, удаления свалок недостаточно для обеспечения безопасности эксплуатации зданий и сооружений различного назначения. При строительстве в пределах территорий, где осуществлялось складирование промышленных и хозяйственно-бытовых отходов, требуются специальные исследования состояния песчано-глинистых грунтов, которые служили основанием таких свалок. В этих условиях отмечается существенное преобразование физико-химических условий подземной среды, трансформация грунтов и их физико-механических свойств, а также полное преобразование водоносных горизонтов. Общая направленность изменения отложений под свалками заключается в снижении их несущей способности, что связано с переходом грунтов в квазипластичное состояние, а также в развитии коррозионных свойств по отношению к строительным материалам. Личаты промышленных свалок могут иметь и кислый или щелочной состав. При наличии жидкой фазы с низкими значениями $pH < 4$ или высокими $pH = 10\text{-}11$ необходимо рассматривать возможность изменения минеральной составляющей грунтов, что создает основу для коренного пересмотра их состава.

При проведении исследований для реконструкции, реставрации и воссоздания зданий и сооружений, включая архитектурно-исторические памятники, ключевым становится вопрос о преобразовании состава, состояния и физико-механических свойств грунтов основания. В первую очередь следует подчеркнуть, что, как было доказано в главе 3, улучшения свойств грунтов (увеличения их плотности, повышения угла внутреннего трения и др.) в процессе всего периода эксплуатации не происходит. Следует отметить, что для сохранения архитектурно-исторических памятников проводятся не изыскания, а инженерно-геологические исследования, позволяющие применить широкий спектр методов изучения грунтов основания. Особое значение в таком случае приобретает учет исторического аспекта контаминации грунтов на протяжении всего времени функционирования города и даже до его основания.

Как уже отмечалось в разделе 1.6, одним из активнейших источников поступления контаминантов в подземное пространство мегаполисов и городов служат системы водоотведения. Характер воздействия канализационных стоков на песчано-глинистые грунты может быть сравним с воздействием болот, а в ряде случаев он имеет региональный характер и высокую интенсивность во времени. Не следует забывать, что 1 мл канализационных стоков содержит 10^7-10^8 клеток микроорганизмов. Особенно отчетливо трансформация грунтов прослеживается при анализе изменения свойств грунтов, изначально обладавших прочными структурными связями, например, верхней части моренных, озерно-ледниковых и других

отложений. Необходимо учитывать, что при загрязнении подземного пространства канализационными стоками чрезвычайно быстро изменяются окислительно-восстановительные условия на анаэробные. Под действием утечек из канализации грунты со структурными связями за счет соединений Fe^{3+} переходят в квазипластичное состояние с существенным снижением угла внутреннего трения до $\varphi \rightarrow \varphi_{min}$, что определяется редукцией Fe^{3+} в форму Fe^{2+}, которая, как известно, хорошо растворима, и, следовательно, разрушением прочных структурных связей.

Следует отметить, что все преобразования начинаются с водоносных горизонтов – наиболее чувствительного компонента подземного пространства. В дальнейшем подземные воды взаимодействуют с грунтами основания и преобразуют их. Принципиальное значение для обеспечения безопасности строительства и длительной эксплуатации наземных зданий и сооружений различного назначения имеют следующие гидрогеологические факторы:

1. Гидродинамические условия (напорность/безнапорность водоносных горизонтов) – в том числе анализ возможности прорывов подземных вод при проходке котлованов, особенно глубоких;

2. Оценка окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий – должна выполняться не на основе лабораторных определений, а непосредственно в полевых условиях с использованием современной аппаратуры;

3. Возрастающая во времени агрессивность подземных вод по отношению к конструкционным материалам – необходима не только оценка существующей агрессивности (выщелачивающая, общекислотная, магнезиальная, сульфатная, углекислая), но и расширение ее классификации с учетом мировых достижений, принимая во внимание знания об окислительно-восстановительной обстановке, активности деятельности подземной микробиоты и ее метаболитов, включая биогенные газы различной растворимости (H_2S, N_2, H_2, CH_4).

Кроме того, деятельность микроорганизмов и генерация ими малорастворимых газов (N_2, H_2, CH_4) с депонированием их в подземной среде изменяют НДС грунтов за счет возрастания газодинамического давления. При наличии таких газов необходимо предусматривать переход грунтов из водонасыщенного состояния в водогазонасыщенное. Следует также помнить о том, что в песчано-глинистых грунтах газовая составляющая, вследствие особенностей строения порового пространства, ограничена микроскопическими размерами пузырьков. Согласно положениям газодинамики, как уже было сказано ранее, такие газовые образования в грунтах в силу их высокого поверхностного натяжения ведут себя как твердая несжимаемая фаза при передаче внешнего давления и формирования НДС.

В современной практике инженерных изысканий определение состава и количества газов регламентировано в рамках проведения инженерно-экологических исследований согласно СП 502.1325800 [96]. Методика таких исследований подразумевает выполнение газовой съемки

на малой глубине – до 0,8 м в шурфах, а в скважинах – только в пределах толщи техногенных грунтов на всю их мощность с заглублением в подстилающие отложения на 0,5-1,0 м [96]. Необходимо определять газовую составляющую на всю зону основания сооружения. Согласно указанному нормативному документу, в процессе газохроматографического анализа определяется содержание метана CH_4, диоксида углерода CO_2, молекулярного кислорода O_2, водорода H_2 и азота N_2. При этом анализ на наличие сероводорода H_2S, который характеризуется как наиболее агрессивный по отношению к конструкционным материалам, проводится только по специальному требованию заказчика.

Вместе с тем, состав определяемых газов не полностью соответствует биохимическим условиям в грунтах и подземных водах. Так, CH_4, H_2 и N_2 – малорастворимые газы, характерные для анаэробной обстановки, N_2 может генерироваться в факультативной среде, а CO_2 – продукт разложения органики, который может проходить и без участия микроорганизмов. Следовательно, присутствие O_2 в таких условиях возможно лишь в незначительных количествах.

Следует также рассмотреть положение СП 22.13330, согласно которому следует учитывать выделение метана CH_4 и диоксида углерода CO_2 при проектировании сооружений, в основании которых прослеживаются илы [93]. Однако практическое применение данного пункта затруднено, так как отсутствует какая-либо информация о том, как именно учитывать такие газы. Вместе с тем, метан не обязательно связан с распространением илов. Так, в разрезе четвертичных отложений Санкт-Петербурга его проявление, наряду с N_2 и CO_2, наблюдается и в межморенных микулинских отложениях (mIIImg), где содержание CH_4 в газовой смеси достигает 97%. Необходимо подчеркнуть, что такие грунты не только сами являются водогазонасыщенными, но и обогащают газами выше- и нижележащую толщу.

Стоит подчеркнуть, что в рассматриваемом диапазоне глубин газогенерация характеризуется чаще всего как биохимический процесс, определяемый деятельностью микроорганизмов и полного цикла разложения ими органического вещества. Следовательно, изучение необходимо начинать с оценки таксонов микроорганизмов.

Таким образом, необходимым условием является выполнение всестороннего инженерно-геологического прогноза с применением междисциплинарных методов исследований для эксплуатации и длительной устойчивости сооружений, когда в наиболее полной степени проявляется комплексное влияние основных ведущих факторов – действия давления от сооружения и контаминации грунтов основания и подземных вод за счет стоков из различных источников. Устойчивость наземных сооружений различного назначения на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах может быть рассмотрена согласно обобщающей блок-диаграмме, приведенной на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Обобщенная схема инженерно-геологического анализа взаимодействия наземных сооружений различного назначения с водо- и водогазонасыщенными тонкодисперсными грунтами основания с учетом их прочности, деформационного поведения и устойчивости

Согласно представленной блок-диаграмме, кроме анализа влияния давления от сооружения и, соответственно, изменения напряженно-деформированного состояния глинистых грунтов основания раскрывается суть процессов, приводящих к изменению, а в некоторых случаях и полной трансформации физико-химических и биохимических условий подземных вод и тонкодисперсных отложений, за счет воздействия стоков различного генезиса. Нужно отметить, что при негативной трансформации глинистых грунтов происходит изменение размеров активной зоны основания сооружения. Кроме того, переход отложений в более слабые разности может сопровождаться активизацией осадок.

Исходя из результатов экспериментальных исследований структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах, наблюдается ее коренное преобразование в сторону твердообразных свойств по сравнению со структурой свободной воды за счет действия различных соединений, микроорганизмов и продуктов их метаболизма, создающих физические поля различной интенсивности. Рассмотренные в данной работе теоретические и практические положения структурированности поровой воды в сочетании с применением экспериментальных исследований с помощью современного метода – ядерного магнитного резонанса создают

основы для совершенствования физической модели поведения тонкодисперсных отложений при изменении напряженно-деформированного состояния. Структурированность поровой воды создает предпосылки для обоснования расчетной модели глинистых грунтов, в основе которой поровая вода в силу ее твердообразных свойств оценивается как фактор, определяющий вязкость глинистого грунта. Таким образом, рассмотрение водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов следует базировать на их анализе и оценке как среды с различной вязкостью системы.

Для проектирования наземных зданий и сооружений различного назначения при прогнозировании негативного преобразования грунтов основания в результате изменения их окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий испытания необходимо проводить на образцах, состав, состояние и физико-механические свойства которых будут соответствовать условиям эксплуатации будущего сооружения. Следовательно, в расчетах, в том числе при определении расчетного сопротивления R, следует закладывать параметры, отвечающие состоянию трансформированных грунтов. При этом ключевым остается вопрос о выборе схемы лабораторных исследований.

Как уже отмечалось в главе 3, основания сооружений, представленные водонасыщенными песчано-глинистыми грунтами, проектируются по двум группам предельных состояний – I и II. Проектирование по II группе предельных состояний осуществляется для сооружений, критериями устойчивости которых выступает предельно допускаемая величина абсолютной осадки и неравномерность ее развития, устанавливаемая величиной относительной деформации. При этом необходимо обязательно соблюдать условие – затухание осадок во времени в период строительства либо на начальном этапе эксплуатации объекта, то есть деформации должны иметь конечную величину.

Возможность затухания осадок, согласно позициям механики грунтов, происходит в том случае, когда давление от сооружения p_c не превышает расчетного сопротивления грунтов несущего слоя R. Величина R несколько выше первого критического давления p_1, при котором полностью отсутствуют зоны пластических деформаций, скорость осадок стремится к нулю, а деформации грунтов в основании к конечной величине (рисунок 3.6). Как следует из анализа формул 3.26-3.30 при определении параметра R принципиальное значение имеют параметры сопротивления сдвигу глинистого слоя – сцепление c и угол внутреннего трения φ – в условиях стабильности конструктивных особенностей сооружения, размеров фундамента, а также глубины его заложения. Следует отметить, что наибольшее влияние на результат расчета R оказывает угол внутреннего трения φ, который зависит от методики испытания грунтов.

В действующей редакции ГОСТ 12248.1 «Определение характеристик сопротивления сдвигу методом одноплоскостного среза» проведение неконсолидированно-недренированных (НН) испытаний не предусмотрено, поскольку данный нормативный документ предлагает в

качестве единственной регламентированной методики консолидировано-дренированные испытания [20]. Определение параметров φ и *c* с помощью трехосных испытаний выполняется согласно ГОСТ 12248.3 также согласно схеме КД. В рамках исследования образцов грунтов с помощью неконсолидированно-недренированных испытаний определяется единственный параметр c_u, что основано на допущении, при котором в условиях, исключающих дренирование образца, угол внутреннего трения водонасыщенного глинистого грунта принимается равным нулю ($\varphi = 0°$) [21]. Стоит отметить, что данное утверждение справедливо для грунтов нарушенного сложения либо для грунтов с молекулярным типом структурных связей. Как уже отмечалось ранее в главе 1, в теории и практике отечественной инженерной геологии обязательно изучение прочности грунтов при обязательном учете формирования структурных связей, их природы, генезиса и количественных параметров. Наличие структурных связей предопределяет изменение характера перераспределения давления между скелетом и поровой водой в водонасыщенных глинистых грунтах. Следовательно, практика исследований по схеме НН – как в одноплоскостных срезных приборах, так и в стабилометрах – позволяет оценить углы внутреннего трения φ и сцепление *c* для грунтов с постоянными характеристиками влажности *W*, консистенции I_L и плотности ρ. Так, при исследованиях литифицированных глинистых разностей по схеме НН φ могут достигать 18° и выше. При наличии более слабых структурных связей угол внутреннего трения φ снижается до 5-7°, реже ниже.

Основная регламентированная методика проведения испытаний – консолидированно-дренированная – предусматривает уплотнение образцов грунтов за счет оттока воды перед испытанием и дренирование того же образца в процессе испытания под действием нормальных давлений (в случае использования установок одноплоскостного среза). При этом возникает вопрос – существует ли идентичность уплотнения образцов грунтов в лабораторных условиях и в основании реального наземного сооружения? Высота образца в сдвижном приборе составляет 3,5 см, при двухстороннем оттоке воды длина пути фильтрации равна 1,75 см. Соответственно, действующий градиент напора *I* может достигать сотен единиц, что несопоставимо с реальными действующими градиентами напора в основании сооружения, которые ограничиваются лишь первыми единицами $I_д$. Еще раз необходимо отметить важность сравнения $I_д$ с начальным градиентом фильтрационной консолидации $I_{нфк}$. Кроме того, действие различных нормальных давлений $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ в процессе проведения сдвиговых испытаний определяет различие в физическом состоянии образцов по показателям плотности ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) и влажности ($W_1 > W_2 > W_3$). В то же время параметры φ и *c* грунтов должны соответствовать их постоянному физическому состоянию по плотности, влажности и консистенции. Следовательно, определяемую величину φ некорректно принимать за угол внутреннего трения, так как он

представляет собой параметр, отражающий повышение сопротивления сдвигу грунта при его уплотнении.

Известно, что проектирование оснований по II группе предельных состояний (по деформациям) предполагает обязательный расчет осадок с использованием модуля деформации E. Формула для его определения выведена с применением закона уплотнения дисперсной среды за счет уменьшения объема порового пространства (первый множитель), при этом коэффициент сжимаемости a – характеристика только дисперсной среды при одномерном сжатии. Тогда как сам модуль E и коэффициент β получены из закона обобщенного Гука, справедливого для квазисплошной среды [38]:

$$E = \frac{(e_1 + 1)}{a}\beta, \tag{4.1}$$

где β:

$$\beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}, \tag{4.2}$$

Таким образом, дисперсная среда анализируется как сплошная. Модуль деформации E определяется только в условиях сохранения объема образца и линейности развития деформаций при коэффициенте поперечной деформации $\mu \leq 0{,}5$.

В лабораторных условиях определение данного показателя выполняется на основе в основном проведения компрессионных испытаний (ГОСТ 12248.4), а также испытаний трехосного сжатия [22]. При этом следует сразу отметить, что компрессионные испытания, широко проводимые как в отечественной, так и зарубежной практике, не могут обеспечить получение достоверной информации о деформационной способности грунтов. Данный метод основан в первую очередь на применении одномерной задачи уплотнения водонасыщенных грунтов при действии аномально высоких градиентов напора в сочетании с малой высотой испытываемого образца и двухсторонним оттоком поровой воды. При этом действующие градиенты напора могут достигать уже нескольких тысяч, что не сопоставимо с реальностью. Кроме того, при компрессионных испытаниях полностью отсутствует возможность бокового расширения образца, что не отвечает реальной работе грунтов в основании сооружения, о чем неоднократно упоминалось ранее. Основание сооружения не работает по принципу одномерного сжатия. В зависимости от характера передачи внешнего давления (плоская или объемная задача) процесс перераспределения напряжений соответствует двух- или трехмерной задаче развития деформаций. Кроме того, принимая во внимание высокую степень структурирования поровой воды в водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложениях, отличной от свободной, работу многофазного грунта следует рассматривать как единую систему.

Определение модуля деформации E в приборах трехосного сжатия основано на применении схемы, при которой образец дренируется во время проведения испытания, исходя из

предположения о том, что при использовании неконсолидированно-недренированной схемы получение данного параметра невозможно. Данный вывод не представляется корректным. Получение достоверного значения модуля деформации *E* следует выполнять по схеме НН, но при условии линейной зависимости давлений и деформаций.

Полевые исследования модуля деформации *E* выполняются с использованием штамповых испытаний (ГОСТ 20276.1) и радиальных прессиометров (ГОСТ 20276.2) [23, 24]. Следует отметить, что определение деформационных характеристик водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов с применением прессиометрических методов целесообразно лишь при условии отсутствия анизотропии исследуемых отложений (слоистости, ленточности, наличии макро- и микротрещиноватости, в том числе литогенетической).

Расчет осадок основания *S* с использованием модуля деформации *E* согласно СП 22.13330 выполняется методом послойного суммирования согласно расчетной схеме линейно-деформируемого полупространства по формуле [93]:

$$S = \beta \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_{zp,i} h_i}{E_i}, \tag{4.3}$$

где $\sigma_{zp,i}$ – среднее значение дополнительного вертикального нормального напряжения в *i*-м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;

h_i – толщина *i*-го слоя грунта;

E_i – модуль деформации *i*-го слоя грунта.

Коэффициент β в формуле (4.3) принимается как безразмерная величина, равная 0,8 для всех случаев. При этом данное значение соответствует коэффициенту поперечной деформации μ = 0,27, который характерен для крупнообломочных грунтов и литифицированных разностей глин.

Как уже отмечалось в разделе 3.3, при проектировании сооружений по первой группе предельных состояний расчет осадок не выполняется. Определяется такое допускаемое давление, при котором исключается формирование единой поверхности скольжения и выпор грунта из-под подошвы фундамента, ведущие к разрушению сооружения. Данная группа предельных состояний соответствует в том числе случаю, когда в основании залегают водо- и водогазонасыщенные тонкодисперсные грунты, для которых разница между критическими давлениями p_1 и p_2 минимальна. В таких условиях стадия линейного деформирования практически сразу переходит в стадию пластических деформаций, и даже небольшие касательные напряжения способны вызывать формирование локальных зон разрушения. Деформации основания развиваются по нелинейному закону. Таким образом, в данном случае определяющее значение имеет не деформационная способность грунтов в основании, а их прочность, то есть полная несущая способность. В расчетах по первой группе предельных

состояний также принципиально важным выступает заложение корректных параметров сопротивления сдвигу грунтов – угла внутреннего трения φ и сцепления *c*, вопросы определения которых представлены выше.

В СП 22.13330 и в его более ранних версиях содержится важное положение о том, что для медленно уплотняющихся водонасыщенных глинистых грунтов при коэффициенте водонасыщения $S_r \geq 0{,}85$ и коэффициенте консолидации $c_v \leq 10^7$ см^2/год, значение которого диктуется коэффициентом фильтрации $k_ф$, несущую способность основания следует определять с учетом их нестабилизированного состояния за счет наличия избыточного порового давления *u*, развитие которого наблюдается в процессе протекания фильтрационной консолидации грунтов [93].

Схожий подход прослеживается при проектировании гидротехнических сооружений, в том числе шламо- и хвостохранилищ, регламентируемом СП 23.13330 «Основания гидротехнических сооружений» [94]. При оценке устойчивости сооружений на основаниях, представленных пылевато-глинистыми грунтами с коэффициентом водонасыщения $S_r \geq 0{,}85$ и коэффициентом степени консолидации $c^0_v < 4$ предусмотрены два положения по учету нестабилизированного состояния грунта, при этом параметр c^0_v выражается следующим соотношением [94]:

$$c_v^0 = \frac{k(1+e)t_0}{a\gamma_в h_0^2}, \tag{4.4}$$

где t_0 – время возведения сооружения;

h^2_0 – расчетная толща консолидируемого слоя.

Следует отметить, что параметр c^0_v представляет собой «искаженный» фактор времени (формула 3.5), который, по всей вероятности, на начальных этапах разработки нормативного документа рассматривался с позиций совершенствования расчетов. Тем не менее, его значение, так же, как и коэффициента консолидации c_v, в основном определяется значением коэффициента фильтрации.

В первом случае используются характеристики φ и *c*, соответствующие степени консолидации на определенный расчетный момент времени. Во втором случае требуется учет действия избыточного порового давления по поверхности сдвига, при этом применяются параметры $φ_I$ и c_I, определяющие, как уже было сказано ранее, полностью консолидированное состояние грунта.

Следует отметить дополнительное положение в данном нормативном документе о том, что параметры сопротивления сдвигу φ и *c* для нестабилизированного состояния грунтов рекомендуется применять только в *исключительных* случаях для обоснованных расчетных схем. Однако как доказано в предыдущих главах работы, нестабилизированное состояние водо- и

водогазонасыщенных глинистых грунтов следует рассматривать не как исключительное, а постоянное и закономерное.

4.2 Роль реологических процессов в развитии осадок оснований сооружений

Развитие теории фильтрационной консолидации с введением реологических принципов связано с работами В.А. Флорина, учитывающего ползучесть скелета с учетом структурных связей, что приводит к снижению величины порового давления, а также с исследованиями Н.А. Цытовича, З.Г. Тер-Мартиросяна, которые принимали во внимание сжимаемость газов в поровой воде. Как уже отмечалось ранее в разделе 3.1, Ю.К. Зарецкий подчеркивал, что при степени водонасыщения $S_r \leq 0{,}95$ поровое давление в глинистых грунтах не возникает, все деформации протекают только за счет ползучести скелета. Следует подчеркнуть, что согласно нормативным документам к полностью водонасыщенным грунтам относятся уже разности с коэффициентом $S_r > 0{,}8$, что необходимо учитывать при оценке возможности протекания фильтрационной консолидации. При оценке устойчивости оснований гидротехнических и транспортных сооружений, возведенных на водонасыщенных глинистых грунтах, учет реологических принципов в расчетах был предложен А.Л. Гольдиным, Г.М. Шахунянцем. Фундаментальные положения реологии грунтов в расчетах сооружений различного назначения широко использовались в работах С.С. Вялова, С.Р. Месчяна и др. Самостоятельное направление составила релаксационная теория консолидации А.И. Ксенофонтова. Среди зарубежных исследователей следует отметить М. Био и Л. Шукле и др., рассматривающих уже не одномерную задачу, а двухмерную консолидацию водонасыщенных глинистых грунтов.

Исследование деформационных свойств и прочности водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов в условиях изменения их напряженного состояния должно базироваться на реологических принципах, рассматривающих грунты как квазисплошные системы, но состоящих из отдельных фаз, с изменяющейся во времени вязкостью η при действии напряжений.

С понятием вязкости системы грунтов тесно связано определение состояния по консистенции водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных грунтов, отражающего меру подвижности частиц при механическом воздействии в условиях изменения НДС. Согласно положениям механики сплошных сред, переход глинистых грунтов из одного состояния в другое определяется не влажностью (а при ее постоянстве) и соотношением действующих напряжений [11, 74]. При постоянной влажности, но возрастающих напряжениях, грунты могут последовательно переходить из твердого в пластичное и далее в текучее состояния. Известно, что даже скальные горные породы при высоких напряжениях могут деформироваться как пластичные тела. Основную роль при этом играют не нормальные σ, а касательные τ напряжения, поскольку именно они способствуют переходу грунта в состояние разрушения.

Описание такого поведения во времени может быть выполнено с помощью реологических кривых, иллюстрирующих поведение материала, которые отражают зависимость скорости деформации v от прикладываемых касательных напряжений τ. Существуют системы, где зависимость между v и τ линейна ($\tau = v \cdot \eta$, $\eta = \text{const}$) и нелинейна с изменяющимся параметром η. Форма кривой позволяет судить о том, как изменяется вязкость системы в процессе деформирования: η может снижаться или возрастать (рисунок 4.2).

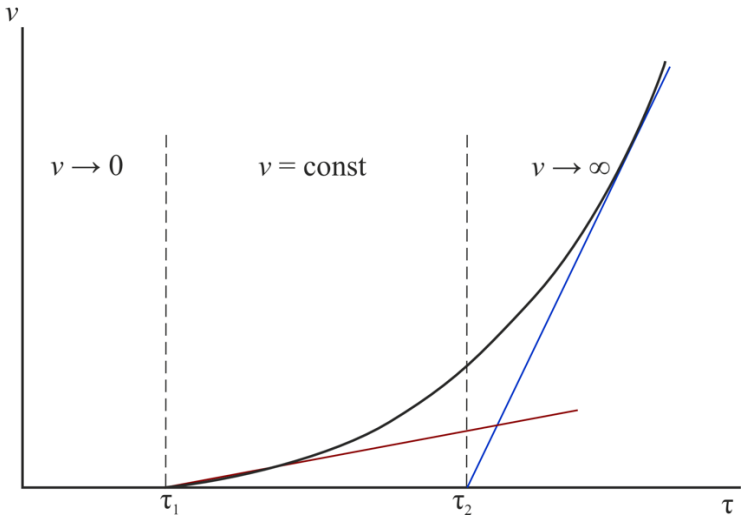


Рисунок 4.2 – Реологическая кривая течения, описываемая уравнением Шведова-Бингама: при касательных напряжениях $\tau < \tau_1$ деформации затухают (скорость деформаций $v \to 0$); при $\tau_1 < \tau < \tau_2$ деформации развиваются с постоянной скоростью; при превышении τ_2 деформации носят незатухающий характер (составлено на основе [11, 74])

Однако следует подчеркнуть, что для глинистых грунтов такие зависимости не являются классическими кривыми течения в их строго реологическом смысле, где рассматривается чистый сдвиг. Исследования для образца грунта реализуются в условиях сложного НДС. Необходимо принимать во внимание действие нормальных напряжений σ, контролирующих в первую очередь сохранность структурных связей (рисунок 4.3).

Для дисперсных систем, к которым относятся глинистые грунты, характерно наличие начального сопротивления сдвигу – предела структурной прочности $\tau_{сп}$. Стоит отметить, что величина $\tau_{сп}$ во многом зависит от степени разрушения структурных связей и закономерно снижается по мере возрастания нормальных напряжений σ. Так как природа $\tau_{сп}$ определяется структурными связями, то в условиях $\tau < \tau_{сп}$ подвижность частиц практически отсутствует.

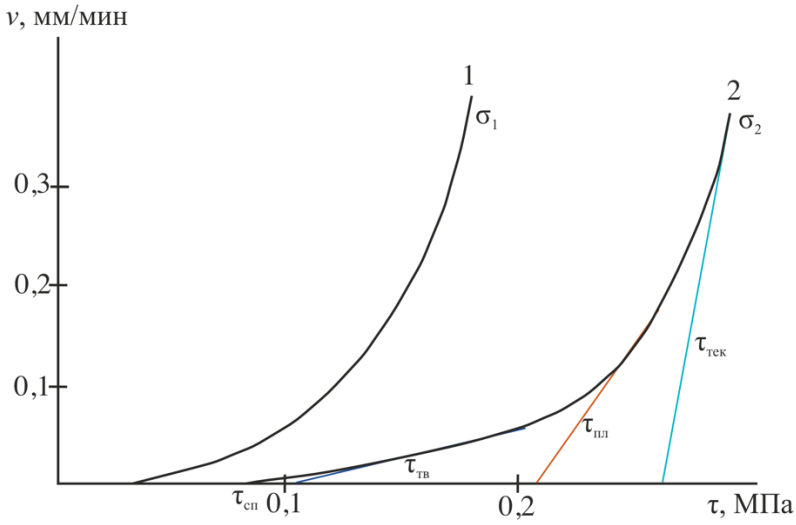


Рисунок 4.3 – Характер развития сдвиговых деформаций в различных глинистых грунтах, определяющих их физическое состояние: 1 – озерно-ледниковые глины при $W = 38\%$; 2 – моренный суглинок при $W = 13\%$ ($\tau_{сп}$ – предел структурной прочности при сдвиге; $\tau_{тв}$, $\tau_{пл}$, $\tau_{тек}$ – величины касательных напряжений, определяющих твердое, пластичное и текучее состояния системы соответственно) [35]

С увеличением касательных напряжений начинает наблюдаться перемещение частиц и переход грунта в стадию пластических деформаций. Предел прочности при сдвиге $\tau_{тв}$ соответствует твердому состоянию системы, при котором скорость деформаций затухает во времени ($v \to 0$). При дальнейшем возрастании напряжений грунт переходит в пластичное состояние. Переход грунтов к состоянию с постоянной скоростью деформаций ($v = \text{const}$) определяется пределом пластичности $\tau_{пл}$. Наконец, превышение предела текучести $\tau_{тек}$ переводит грунты в текучее состояние, при котором скорость деформаций неограниченно возрастает во времени ($v \to \infty$). Следует отметить, что наличие структурных связей, разрушение которых происходит при действии нормальных напряжений σ (при $\sigma > \sigma_{стр}$, где $\sigma_{стр}$ – структурная прочность грунтов при сжатии), расширяет диапазон напряжений, в котором наблюдается последовательный переход грунта из одного состояния в другое. В то же время при длительном действии касательных напряжений τ, наряду с разрушением связей, происходит постепенная переориентация плоскопараллельных глинистых частиц в зоне развития сдвиговых деформаций.

С точки зрения проектирования сооружений по II-му предельному состоянию для прогноза длительной устойчивости и эксплуатационной пригодности наземных зданий и объектов различного назначения, необходимо обеспечение таких условий, при которых вязкость η водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов основания должна определять затухание скорости развития деформаций ($v \to 0$). Такое состояние должно быть достигнуто уже в период строительства либо на начальном этапе эксплуатации сооружения.

Известно, что развитие деформации грунтов в основании сооружений происходит как под действием нормальных, так и касательных напряжений. Их роль при анализе осадки сооружений на глинистых грунтах зависит от ряда факторов, основными из которых выступают следующие: 1) соотношение действующего (проектного) давления от сооружения p_c с давлением, определяющим несущую способность глинистых грунтов в основании сооружений при их проектировании по II-му предельному состоянию; 2) особенности работы грунтов – решение одно-, двух- или трехмерной задачи; 3) тип глинистых грунтов с позиций степени их литификации, определяющей их физическое состояние, характер и природу структурных связей.

При проектировании сооружений по II группе предельных состояний (по деформациям) главное внимание должно быть уделено условию необходимости затухания деформаций во времени. При этом следует учитывать, что прочность грунтов в основании уже в период эксплуатации сооружений может изменяться под действием различных факторов, включая возможность разрушения и/или трансформацию прочности структурных связей при действии напряжений еще в период строительства, контаминации компонентов подземного пространства неорганическими и органическими соединениями абиотического и биотического генезиса.

Известно, что при одномерном сжатии деформации грунтов в основании протекают только под действием нормальных напряжений, закономерности развития которого изучаются экспериментально в компрессионных приборах. При этом в практике механики грунтов вопрос о значении градиентов напора, под действием которых развивается двухсторонний отток воды из образца толщиной 2 см, не рассматривается. Впервые наиболее детально этот процесс был исследован в работах Р.Э. Дашко. Изучение роли градиентов напора при уплотнении водонасыщенных глинистых грунтов было выполнено в последней четверти XX в. с помощью измерения порового давления системой иглодатчиков в процессе проведения компрессионных испытаний в средней части образцов [39]. Как уже отмечалось ранее, такие исследования проводились в связи с возведением земляных дамб защитных сооружений Санкт-Петербурга для оценки возможности консолидации водонасыщенных глинистых грунтов малой степени литификации в их основании [39].

При действующих в компрессионном приборе градиентах напора $I_д$ развитие порового давления в различных по гранулометрическому составу глинистых грунтах малой степени литификации подчиняется зависимости, характер которой представлен на рисунке 4.4.

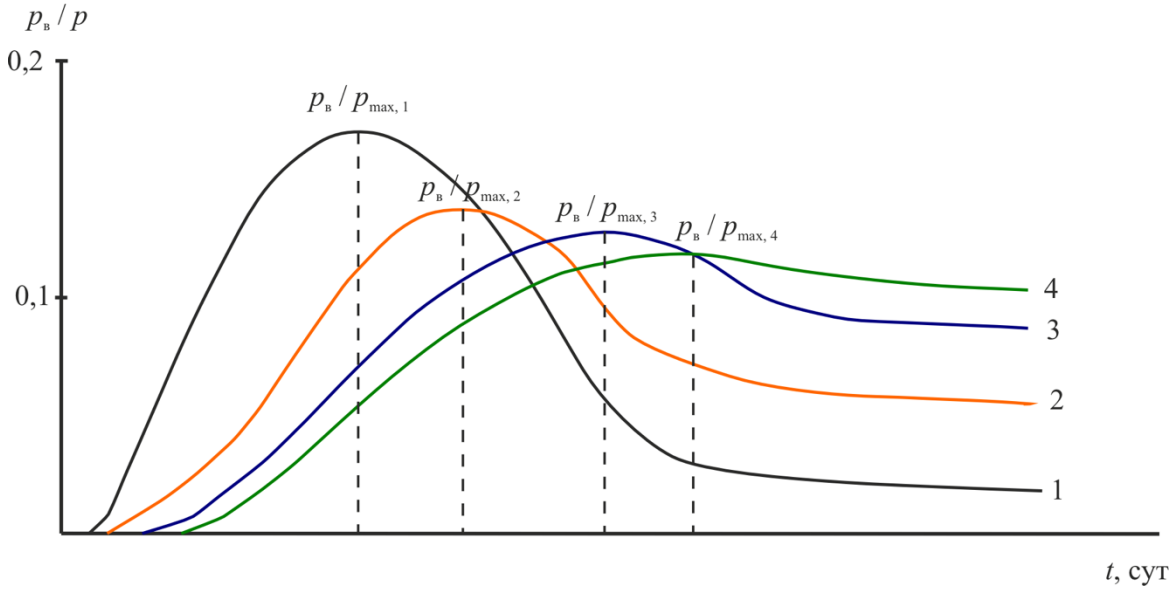


Рисунок 4.4 – Характер изменения коэффициента порового давления $p_в / p$ во времени t при постоянном давлении в различных типах глинистых грунтов малой степени литификации при одномерном уплотнении (1 – M_c = 8%; 2 – M_c = 25%; 3 – M_c = 44%; 4 – M_c = 64%)

Было установлено, что характер развития порового давления в условиях компрессионного сжатия для таких глинистых отложений зависит от содержания глинистой фракции, которая определяет активность физических полей и отражает степень гидрофильности грунта и структурированности поровой воды по сравнению с водой в объеме. Чем выше содержание глинистой фракции M_c, тем медленнее развивается поровое давление и тем меньше его максимальное относительное значение $p_в / p_{max}$.

Минимальный градиент напора I_{min} действует на глубине $h / 2$, где h – толщина образца грунта, и определяется как величина, зависящая от порового давления $p_в$, замеренного иглодатчиками. При этом максимальные значения порового давления составляли лишь 15-20% от величины внешнего давления, что существенно ниже теоретически предполагаемых значений согласно теории фильтрационной консолидации. Вполне понятно, что уменьшение $p_в$ приводит и к снижению градиентов напора $I_д$ вплоть до некоторой остаточной величины, при которой отток поровой воды из образца прекращается. С ростом содержания M_c отмечается увеличение остаточного порового давления, что согласуется со значениями начального градиента фильтрации $I_н$. Экспериментально был определен градиент начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$, который фиксирует возможность оттока поровой воды из образца грунта при передаче давления штампом (фундаментом, телом насыпи). Его величина рассчитывается по формуле (3.12) и зависит от содержания тонкодисперсной фракции в грунте. Сравнительная оценка величин действующих градиентов с градиентами начала фильтрационной консолидации показывает, что при уплотнении в компрессионном приборе величина $I_д$ оказывается выше $I_{нфк}$ (таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Сравнение действующего градиента напора $I_д$ на глубине образца h / 2 и градиента начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$

Тип глинистого грунта	Действующий градиент напора в начальный период фильтрации $I_д$	Градиент начала фильтрационной консолидации $I_{нфк}$
Супесь тяжелая (M_c = 8%)	170	28
Суглинок тяжелый (M_c = 25%)	140	50
Глина (M_c = 44%)	125	66
Глина тяжелая (M_c = 64%)	115	80

Примечание: глинистая фракция грунтов представлена минералами группы гидрослюды; испытания проводились на образцах нарушенного сложения

Замеры порового давления в цилиндрическом образце в условиях одноосного сжатия (с возможностью бокового расширения) показывают нулевые значения. Создание порового давления водой в приборах трехосного сжатия не соответствует формированию реального НДС при передаче давления от фундамента либо через грунтовую толщу.

Необходимо принимать во внимание, что в основании проектируемого (строящегося или эксплуатируемого) наземного сооружения грунты работают в условиях двух- или трехмерного развития деформаций в зависимости от решаемой задачи распределения напряжений (плоской или пространственной). При двухмерной постановке задачи возникает три составляющих напряжений (σ_z, σ_y, τ_{xy}), при трехмерной – шесть (σ_z, σ_y, σ_x, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}). В таком случае вопрос о перераспределении давления между скелетом и водой вообще возникать не может.

Как уже было сказано ранее, расчет осадок основания S выполняется согласно СП 22.13330 методом послойного суммирования по расчетной схеме линейно-деформируемого полупространства с использованием модуля деформации E [93]. Вывод формулы S базируется на анализе одномерного сжатия грунтов, выделенных в расчетных слоях (рисунок 4.5).

При расчете осадок каждый расчетный слой основания определяется средним значением действующего напряжения $\sigma_{zp,i}$ и рассматривается согласно закономерности одномерного сжатия. С глубиной от подошвы фундамента или тела земляного сооружения до нижней границы активной зоны величина $I_д$ закономерно снижается по мере уменьшения действующих напряжений $\sigma_{zp,i}$ и, соответственно, поровых давлений, при одновременном возрастании мощности расчетного слоя z_i. Следует отметить, что мощность расчетных слоев в основании реального сооружения зависит от ширины фундамента, однородности грунтов, глубины их положения и на порядки превышает зону фильтрации в компрессионном приборе (1 см). Таким образом, реальные значения градиентов $I_д$ в $n \cdot 10^2$ раз выше, чем такой параметр в компрессионных приборах.

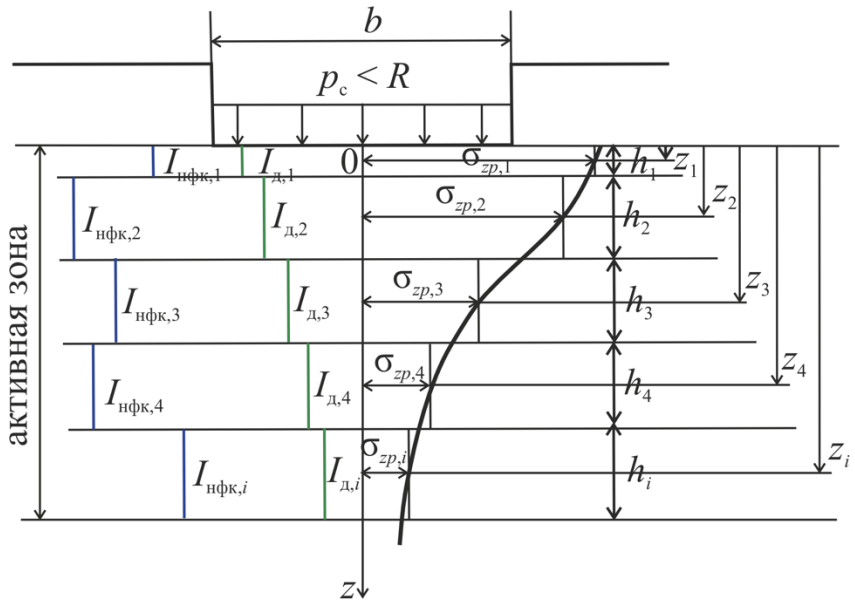


Рисунок 4.5 – Схема для расчета осадки по методу линейно-деформируемого полупространства (с дополнениями гидродинамического фактора возможности движения воды в зоне основания)

При этом значения $I_{нфк}$ остаются постоянной величиной для каждого расчетного слоя, поскольку зависят от содержания глинистой фракции M_c. Соответственно, условие $I_д << I_{нфк}$ полностью исключает возможность оттока поровой воды из тонкодисперсных отложений даже в присутствии дренирующих слоев. Это подтверждает отсутствие изменений состояния водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложений оснований, что и было доказано на различных примерах в главе 3. Задача одномерного сжатия не отражает реальной картины развития деформаций грунтов. Деформации каждого расчетного слоя определяются развитием бокового распора в условиях двух- или трехмерных задач распределения напряжений. Основным показателем деформационных свойств служит модуль деформации грунтов E, однако его определение по результатам компрессионного сжатия должно быть исключено. Следует использовать модуль деформации, полученный только в приборах трехосного сжатия по неконсолидированно-недренированной схеме испытаний в условиях сохранения объема образца при действии нормальных и касательных напряжений, задающих формоизменение, либо по результатам полевых исследований.

Исследование НДС тонкодисперсных отложений в основании сооружений во времени должно проводиться с учетом характера развития процессов ползучести и их влияния на изменение сопротивления сдвигу грунтов. Под ползучестью понимают процесс деформирования грунта во времени при одновременном действии нормальных и касательных напряжений. В зависимости от величины напряжений τ и типа глинистых грунтов может наблюдаться затухающая и незатухающая ползучесть.

Характер развития ползучести определяется режимом загружения под действием постоянных давлений (период эксплуатации) либо в условиях их ступенчатого роста (период строительства). При быстрых темпах строительства грунты основания постоянно находятся в зоне неустановившейся ползучести, характеризующейся интенсивным разрушением структурных связей в условиях отсутствия их восстановления. При медленных темпах строительства, когда каждая ступень давления прикладывается в условиях разрушения-восстановления структурных связей, возможно достижение кратковременной стадии установившейся ползучести, при которой скорость деформаций постоянна ($v \to \text{const}$). При допускаемой величине проектного давления от сооружения p_c должно соблюдаться условие $p_c < R$, при котором скорость деформаций стремится к нулю ($v \to 0$), что достигается только при условии, когда сопротивление сдвигу грунтов τ не превышает предела длительной прочности τ_∞.

Поскольку именно под действием касательных напряжений происходит развитие незатухающих деформаций ползучести, что не допускается в основании наземных сооружений, то основное внимание должно быть уделено изучению реологических процессов под действием вышеуказанных напряжений. Как отмечалось Н.Н. Масловым, недоучет роли касательных напряжений в работе грунтов в основании сооружений может привести к серьезным последствиям.

Развитие сдвиговых деформаций определяет более опасную с точки зрения устойчивости сооружений ситуацию, и поэтому именно на эти области деформирования в основании сооружения должно быть обращено особое внимание. Ограничение зон предельного равновесия по глубине при проектировании гражданских и промышленных сооружений по второму предельному состоянию зачастую не означает, что роль сдвиговых деформаций становится подчиненной, особенно при рассмотрении глинистых отложений. В этих грунтах даже сравнительно небольшие по величине касательные напряжения могут вызывать длительно незатухающие во времени деформации, которые определяют как величину осадки сооружения, так и неравномерность ее развития. Сопротивление сдвигу грунта должно быть больше величины касательных напряжений, возникающих в краевых зонах фундамента и составляющих максимально $\tau \le 0{,}32 p_c$, где p_c – давление от сооружения [38, 107]. В объемной задаче распределения напряжений величина касательных напряжений составляет не более 15% от значения p_c и быстро затухает с глубиной [38, 107]. Такое положение анализируется для глинистых грунтов, характеризующихся трением и сцеплением.

Как уже отмечалось в разделе 3.3, для глинистых грунтов, характеризующихся как квазипластичная среда с низкими значениями угла внутреннего трения ($\varphi \le 5\text{-}7°$), сопротивление сдвигу определяется только сцеплением, зоны пластических деформаций возникают непосредственно в основании по всей ширине фундамента, и граница такой зоны представляет

собой полуокружность, диаметром которой служит ширина фундамента *b* (рисунок 3.7). Внутри зоны происходит медленное отдавливание грунтов из-под фундамента. Характер такого деформирования во времени определяется типом структурных связей, степенью уплотненности и влажностью исследуемых пород. В этом случае обязательным условием является ограничение давления от сооружения p_c величиной, меньшей, чем p_1 (по формуле Л. Прандтля, (3.32)).

Реологические свойства водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов проявляются также при исследовании их длительной прочности τ_∞. При этом значение сопротивления сдвигу отложений должно быть гарантировано на определенный промежуток времени. Следует еще раз подчеркнуть, что критерием безопасности длительной эксплуатации зданий и сооружений различного назначения служит условие $\tau_\infty > \tau$, где τ – действующие касательные напряжения в основании сооружения. Его соблюдение обеспечивает затухающий характер развития деформаций ползучести.

Следует различать проявление длительной прочности τ_∞ для различных типов водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов (рисунок 4.6).

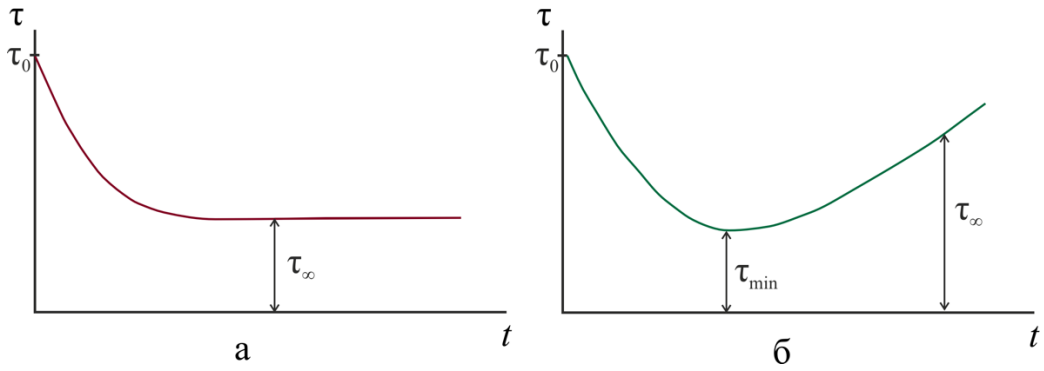


Рисунок 4.6 – Характер проявления длительной прочности грунтов с различными типами структурных связей а) жесткими цементационными (необратимо-разрушающимися) и б) при отсутствии жестких цементационных (в условиях возможности восстановления), где τ_0 – условно мгновенная прочность; τ_∞ – длительная прочность; τ_{min} – минимальная прочность [11, 35, 74]

Так, согласно рисунку 4.6, а, при отсутствии компенсации структурных связей – как за счет их восстановления, так и за счет перестройки сложения грунта в зоне сдвига, которая приводит к некоторому упрочнению, – длительная прочность грунтов $\tau_\infty = \tau_{min}$ достигается во времени постепенно, снижаясь от условно мгновенной прочности τ_0.

Рисунок 4.6, б иллюстрирует изменение прочности во времени слабых тонкодисперсных разностей при отсутствии жестких структурных связей. В этом случае прочность во времени сначала снижается до минимальных значений τ_{min}, а затем способна возрастать за счет переориентации и слипания частиц, перестройки сложения до τ_∞. Следует отметить, что значение τ_{min} характерно для быстрых темпов строительства, тогда как τ_∞ достигается при медленных.

Энергетическое обоснование такого процесса может быть дано на основе теории ДЛФО, описывающей суммарную энергию взаимодействия дисперсных частиц как результат наложения ван-дер-ваальсового притяжения и электростатического отталкивания перекрывающихся двойных электрических слоев (ДЭС) (рисунок 4.7) [51, 80].

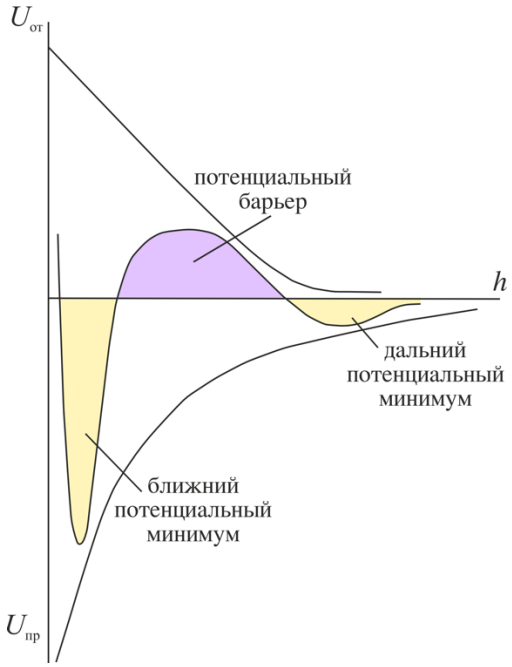


Рисунок 4.7 – Зависимость энергий взаимодействия двух частиц от расстояния h между ними: $U_{от}$ – энергия электростатического отталкивания; $U_{пр}$ – энергия молекулярного притяжения [51, 80]

Минерализация поровых вод (растворов электролитов) влияет на особенности развития ДЭС и тем самым определяет глубину и положение локальных потенциальных минимумов на совместной кривой энергий отталкивания $U_{от}$ и притяжения $U_{пр}$ [51, 80]. Плоскопараллельные частицы, сблизившиеся до расстояния, соответствующего этому минимуму, удерживаются в нем, образуя контакты.

Как уже было сказано в разделе 4.1, при оценке деформационных характеристик грунтов целесообразно применение приборов трехосного сжатия с возможностью бокового расширения. Проведение таких испытаний позволяет исследовать влияние объемного напряженного состояния $\sigma_{вс}$ на изменение модуля общей деформации E. Следует подчеркнуть, что определение параметра E должно проводиться только при линейной зависимости между давлением и развитием деформации на стадии их затухания. При этом всестороннее давление $\sigma_{вс}$ не должно превышать значений, при которых грунты переходят в состояние пластических деформаций. Стоит отметить следующую закономерность изменения значения E в диапазоне напряжений, возникающих в основании сооружения (рисунок 4.8):

- в интервале давления от 0 до $\sigma_{стр}$ (где $\sigma_{стр}$ – структурная прочность грунтов на сжатие) прослеживается постоянство и некоторое увеличение параметра E;

- при превышении $\sigma_{стр}$ происходит постепенное снижение этого параметра.

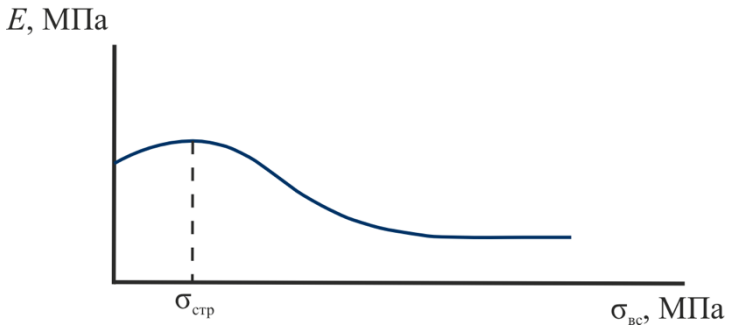


Рисунок 4.8 – Характер изменения модуля деформации *E* слабых глинистых грунтов в зависимости от объемного напряженного состояния $\sigma_{вс}$

Постоянство значения *E* отмечается на линейной стадии деформирования грунтов основания в условиях сохранения структурных связей. При переходе глинистых разностей в пластичное состояние модуль деформации *E* снижается.

Примечательно, что при проведении испытаний в условиях одномерной задачи уплотнения без возможности бокового расширения – в приборах компрессионного сжатия наблюдается обратная тенденция: с ростом давления параметр *E* возрастает, поскольку грунт уплотняется за счет оттока поровой воды.

Как было показано в разделе 3.4, обратные расчеты подтверждают корректность определения модуля деформаций *E* по результатам трехосных испытаний по схеме НН, а полученные значения отвечают реальной работе глинистых грунтов в основании.

Кроме того, возможно дополнительно учитывать относительно небольшие деформации, возникающие под действием касательных напряжений τ. Зависимость между τ и соответствующими сдвиговыми деформациями описывается законом, аналогичным закону Гука. Существует формула, связывающая напряжения τ и относительные деформации (угол сдвига δ) при сдвиге, в которой коэффициентом пропорциональности выступает модуль сдвига *G*:

$$\tau = G \cdot \delta, \tag{4.5}$$

где *G* определяется с учетом коэффициента боковой деформации μ и составляет часть от модуля деформации *E* [38]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \tag{4.6}$$

Стоит отметить, что объем тела при чистом сдвиге остается постоянным. Однако в реальных условиях работы грунтов основания наблюдаются не только сдвиговые деформации, а сложное напряженное состояние, при котором происходит и сжатие грунта, и изменение его формы.

4.3 Выводы по главе 4

1. Повышение уровня безопасности на этапах проектирования, строительства, реконструкции, а также длительной эксплуатации наземных сооружений различного назначения, в разрезе оснований которых прослеживаются водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты становится возможным в условиях совершенствования положений инженерной геологии, гидрогеологии и механики грунтов как междисциплинарных областей знаний. Решение такой задачи следует дополнять развитием действующей нормативной документацией. В настоящее время они ориентированы преимущественно на такие схемы испытаний, которые отвечают положениям фильтрационной консолидации, что не отражает реального поведения тонкодисперсных отложений в основании реальных объектов различного назначения.

2. Показано, что обеспечение устойчивости наземных сооружений на водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложений требует комплексного подхода, учитывающего как влияние давления от сооружения, приводящее к изменению напряженно-деформированного состояния грунтов основания, так и влияние контаминации компонентов подземного пространства неорганическими и органическими соединениями, в частности стоков различного происхождения.

3. Обоснована необходимость определения параметров сопротивления сдвигу (φ и c) и модуля деформации E водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов по неконсолидированно-недренированной схеме испытаний в приборах трехосного сжатия при сохранении влажности, плотности и консистенции образцов. Показано, что действующие градиенты напора в компрессионных приборах и приборах одноплоскостного среза на порядки превышают реальные градиенты в основании сооружений.

4. Предложено рассматривать водо- и водогазонасыщенные глинистые грунты как квазисплошные многофазные системы с изменяющейся вязкостью. Состояние грунта по консистенции следует оценивать не по влажности, а согласно соотношению действующих напряжений, что отражает меру подвижности частиц, с обязательным учетом не только нормальных σ, но и касательных напряжений τ, поскольку именно они способствуют переходу грунта в состояние разрушения.

5. Раскрыта роль реологических процессов в развитии деформаций оснований, что определяется совместным действием нормальных σ и касательных τ напряжений. Применение реологических моделей адекватно описывает реальное поведение оснований, сложенных водо- и водогазонасыщенными глинистыми грунтами, при прогнозировании устойчивости наземных сооружений различного назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования сделаны следующие выводы:

1. Проведение научно-практического анализа формирования состава, состояния и физико-механических свойств, прежде всего прочности и деформационной способности водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложений в пределах освоенных и неосвоенных территорий подтверждает необходимость учета не только природно-генетических факторов, но и контаминации подземной среды в историческом аспекте. При этом определяющее влияние на изменение физико-химических и биохимических условий в подземной среде оказывает привнесение неорганических и органических соединений абиотического и биотического генезиса, состав которых зависит от технологии эксплуатации конкретных объектов, природной обстановки территории – наличие заболачиваемости, болот и прочее, а также ранее существующих источников контаминации.

2. Многофазный состав водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов определяет наличие системы энергетически активных центров (эпитаксиальных и поляризующих), присущих всем составляющим грунта – твердой, жидкой и газообразной – как абиогенного, так и биогенного происхождения. Наличие таких активных центров имеет принципиальное значение при анализе и оценке упрочения структуры поровой воды в рассматриваемых грунтах.

3. Проведенные экспериментальные исследования с применением ЯМР-релаксометра ЭХО-12 позволили установить закономерности послойного изменения структуры поровой воды в глинистых грунтах в зависимости от содержания тонкодисперсной фракции, а также биогенной фазы, представленной микроорганизмами и их основным метаболитом – белками. Экспериментально доказано, что наибольший вклад в упрочнение структуры поровой воды вносит присутствие биогенного аморфного кремнезема микроводорослей в грунтах.

4. Упрочнение структуры поровой воды водо- и водогазонасыщенных тонкодисперсных отложений подтверждает ее инертность по отношению к действию давления от наземных сооружений различного назначения и, соответственно, изменению НДС грунтов. Установлено, что глинистые грунты основания сохраняют свое физическое состояние, развитие деформаций сооружений происходит в условиях развития деформаций формоизменения в основании.

Перспективы последующих исследований связаны с изучением изменения структуры поровой воды не только в глинистых, но и в песчаных грунтах при их обогащении соединениями прежде всего биотического генезиса. Такие экспериментальные работы могут послужить основой для создания критериев перехода водонасыщенных песков различного гранулометрического и минерального состава в состояние плывунов. Актуальным направлением

может быть также исследование структурирования поровой воды в различных дисперсных грунтах под действием всего широкого спектра микроорганизмов и их метаболитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнаутов, А. И. Оценка и прогноз изменения геологического строения промышленного пласта Кашпирского месторождения горючих сланцев / А. И. Арнаутов // Записки Горного института. – 1988. – Т. 118. – с. 70-74.

2. Бактериальная палеонтология / Рос. акад. наук, Палеонтол. ин-т ; Моск. гос. ун-т, Каф. палеонтологии ; под ред. А. Ю. Розанова. – Москва : ПИН РАН, 2002. – 188 с. ISBN 5-201-15405-0.

3. Бежаев, М. М. Юрские отложения восточного склона Урала и Сибирского Зауралья / М. М. Бежаев. – Тюмень : [б. и.], 1970. – 203 с. – (Труды / М-во нефтедобывающей пром-сти СССР. Гос. науч.-исслед. и проектный ин-т «Гипротюменнефтегаз» ; вып. 15).

4. Белоусов, П. Е. Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья / П. Е. Белоусов, В. В. Крупская // Георесурсы. – 2019. – 21(3). – с. 79-90.

5. Берг, Л. С. Климат и жизнь / Л. С. Берг. – Москва : Государственное издательство, 1922. – 199 с.

6. Бернал, Дж. Структура воды и ионных растворов / Дж. Бернал, Р. Фаулер // Успехи физических наук. – 1934. – Т. 14. – №5. – с. 586-644.

7. Бушинский, Г. И. Геология бокситов / Г. И. Бушинский. – Москва : Недра, 1971. – 368 с.

8. Вайнштейн, Б. К. Современная кристаллография. Том 2. Структура кристаллов / Б. К. Вайнштейн, В. М. Фридкин, В. Л. Инденбом. – Москва : Наука, 1979. – 363 с.

9. Вендская система. Историко-географическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы. – Москва : Наука, 1985. – 240 с.

10. Волкова, А. В. Инженерно-геологические критерии устойчивости богатых железных руд в подземных выработках Яковлевского месторождения КМА : автореф. дис. … канд. инж. – геол. наук : 25.00.08 / Волкова Анастасия Валерьевна – Санкт-Петербург, 2006. – 22 с.

11. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов : учеб. пособие для строительных вузов / С. С. Вялов. – Москва : Высшая школа, 1978. – 447 с.

12. Гегузин, Я. Е. Пузыри / Я. Е. Гегузин. – Москва : ИД Интеллект, 2014. – 160 с. ISBN 978-5-91559-178-2.

13. Гидроэлектростанции России / научн. редактор В. Д. Новоженин. – Москва : «Институт Гидропроект», 1998. – 466 с.

14. Гинзбург, И. И. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала. Ч. 2. Геохимия и геология древней коры выветривания на Урале / И. И. Гинзбург // Труды Института

геологических наук. – Москва : Изд-во АН СССР, 1947. – Вып. 81. – 140 с. – (Серия Уральской комплексной экспедиции АН СССР ; вып. 2).

15. Гладковский, А. К. О вещественном составе, происхождении и изменении бокситов Тихвинского района / А. К. Гладковский, И. Н. Ушатинский // Труды Горно-геологического института. 1961. – вып. 56. – № 5. – с. 109-135.

16. Гольдберг, В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов. – Москва : Недра, 1986. – 160 с.

17. Гончар, Н. В. Оптимизация техногенно-минеральных образований при разработке медно-порфировых руд Томинского рудного поля Урала / Н. В. Гончар, О. М. Гуман, И. И. Косинова, В. А. Бударина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: геология. – 2024. – № 1. – с. 89-101.

18. Горская, В. А. Инженерно-геологический анализ исторического аспекта освоения и контаминации подземного пространства Санкт-Петербурга : дис. … канд. инж. – геол. наук : 25.00.08 / Горская Валентина Алексеевна. – Санкт-Петербург, 2017. – 250 с.

19. Горькова, И. М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород различной степени уплотнения и литификации / И. М. Горькова. – Москва : Наука, 1965. – 128 с.

20. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. – Москва : Стандартинформ, 2020.

21. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. – Москва : Стандартинформ, 2020.

22. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. – Москва : Стандартинформ, 2020.

23. ГОСТ 20276.1-2020. Грунты. Метод испытания штампом. – Москва : Стандартинформ, 2020.

24. ГОСТ 20276.2-2020. Грунты. Метод испытания радиальным прессиометром. – Москва : Стандартинформ, 2020.

25. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – Москва : Стандартинформ, 2020.

26. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Москва : Стандартинформ, 2016.

27. Грим, Р. Е. Минералогия и практическое использование глин / Р. Е. Грим. – Москва : МИР, 1967. – 510 с.

28. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский [и др.] ; под ред. В. Т. Трофимова. – 6-е изд. Москва: Издательство МГУ, 2005. – 1024 с. – ISBN 5-211-04848-2.

29. Дашко, Р. Э. Анализ и оценка повышения безопасности захоронения низкоактивных отходов в нижнекембрийских синих глинах западной части Ленинградской области / Р. Э. Дашко, А. А. Еремеева // Записки Горного института. – 2002. – Т. 154. – с. 131-135.

30. Дашко, Р. Э. Безопасность проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения на водонасыщенных глинистых грунтах: инженерно-геологические и геотехнические аспекты / Р. Э. Дашко, **Д. Л. Колосова** // Геотехника. – 2023. – Т. XV. – № 1. – с. 54-67.

31. Дашко, Р. Э. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ / Р. Э. Дашко, Г. А. Лохматиков // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – с. 180-190.

32. Дашко, Р. Э. Геомеханический анализ коренных глин Санкт-Петербурга как трещиновато-блочной среды / Р. Э. Дашко, А. В. Волкова // Записки Горного института. – 2004. – Т. 156. – с. 118-122.

33. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обоснование реконструкции и реставрации Храма Пресвятой Троицы в г. Санкт-Петербурге / Р. Э. Дашко, В. А. Горская // Инженерная геология. – 2016. – № 4. – с. 30-38.

34. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологические процессы как результат деятельности микроорганизмов (на примере подземного пространства Санкт-Петербургского региона) / Р. Э. Дашко, А. Г. Карпенко, **Д. Л. Колосова** // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2023. – № 5. – с. 3-16.

35. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений / Р. Э. Дашко. – Санкт-Петербург : Институт «Георекнструкция», 2015. – 383 с. – ISBN 978-5-9904956-9-2.

36. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологическое обоснование развития города Моа в условиях освоения его подземного пространства. (Республика Куба) / Р. Э. Дашко, Е. Вильтрес Милан // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Дербент, 28–29 марта 2024 года. – Москва: Геоинфо, 2024. – с. 142-147.

37. Дашко, Р. Э. К вопросу о необходимости изучения влияния болот как биогеоценозов на изменение инженерно-геологических условий / Р. Э. Дашко, А. Г. Карпенко // Инженерная геология. – 2021. – Т. XVI. – № 2. – с. 32-41.

38. Дашко, Р. Э. Механика горных пород / Р. Э. Дашко. – Москва : Недра, 1987. – 264 с.

39. Дашко, Р. Э. Механика грунтов в инженерно-геологической практике / Р. Э. Дашко, А. А. Каган. – Москва : Недра, 1977. – 237 с.

40. Дашко, Р. Э. Многокомпонентный состав сапропелей как основа для совершенствования техники и технологии их дегидратации / Р. Э. Дашко, Д. Ю. Власов, З. В. Пушина, Т. Г. Утенкова, С. Л. Иванов // Russian Journal of Earth Sciences. – 2023. – Т. 23. – № 2.

41. Дашко, Р. Э. Некоторые случаи биокоррозии крепей в подземных выработках различных климатических зон / Р. Э. Дашко, Д. Ю. Власов, И. С. Романов // Технология металлов. – 2023. – № 4. – с. 23-29.

42. Дашко, Р. Э. О природе прочности ленточных отложений / Р. Э. Дашко // Записки Горного института. – 1964. – Т. 48. – № 2. – с. 117.

43. Дашко, Р. Э. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р. Э. Дашко, О. Ю. Александрова, П. В. Котюков, А. В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 1. – с. 1-47.

44. Дашко, Р. Э. Структура поровой воды в системе: глинистый грунт – ионы – газ – микроорганизмы на основе ядерно-магнитного резонанса – практика применения в гидрогеологии / Р. Э. Дашко, **Д. Л. Колосова** // Подземная гидросфера : материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), Екатеринбург, 21–28 июня 2024 года. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2024. – с. 101-107.

45. Дашко, Р. Э. Теоретическое и научно-практическое обоснование возможности развития фильтрационной консолидации в водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах / Р. Э. Дашко, **Д. Л. Колосова** // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 29 ноября – 02 декабря 2022 года. – Москва: Геомаркетинг, 2022. – с. 56-63.

46. Дашко Р. Э. Трещиноватость глинистых пород как ключевой фактор при их геотехнической оценке в качестве оснований сооружений / Р. Э. Дашко, Г. А. Лохматиков // Геотехника. – 2021. – Т. XIII. – № 3. – с. 20-31.

47. Дашко, Р. Э. Физико-химическая природа набухания и осмотической усадки глинистых пород в основании сооружений по результатам экспериментальных исследований / Р. Э. Дашко, А. В. Шидловская // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – с. 193-200.

48. Дашко, Р. Э. Ядерный магнитный резонанс как метод ревизии теории и практики фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов / Р. Э. Дашко,

Д. Л. Колосова, А. С. Мазур, А. В. Иевлев // Записки Горного института. – 2025. Т. 276. – с. 67-76. – EDN VSGJYK.

49. Дерягин, Б. В. Новые свойства жидкостей / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – Москва : Наука, 1971. – 176 с.

50. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – Москва : Наука, 1985. – 398 с.

51. Дерягин, Б. В. Теория устойчивости сильно заряженных лиофобных золей и слипающихся сильно заряженных частиц в растворах электролитов / Б. В. Дерягин, Л. Д. Ландау // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1941. – Т. 11, вып. 2. – с. 802-821.

52. Дистлер, Г. И. Дальнодействие активных центров кристаллических поверхностей / Г. И. Дистлер, С. А. Кобзарева // Доклады Академии наук. – 1967. – Т. 172. – № 5. – с. 1069-1071.

53. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала. Ч. 1. Типы и морфология древней коры выветривания / И. И. Гинзбург, А. А. Кац, И. З. Корин [и др.] // Труды Института геологических наук. – Москва : Изд-во АН СССР, 1946. – Вып. 80. – 155 с. – (Серия Уральской комплексной экспедиции АН СССР ; вып. 1).

54. Жемчужников, Ю. А. Сезонная слоистость и периодичность осадконакопления / Ю. А. Жемчужников. – Москва : изд-во АН СССР, 1963. – 72 с.

55. Зарецкий, Ю. К. Теория консолидации грунтов / Ю. К. Зарецкий. – Москва : Наука, 1967. – 270 с.

56. Захаров, С. Д. Структурные перестройки в водной фазе клеточных суспензий и белковых растворов при светокислородном эффекте / С. Д. Захаров, В. А. Иванов, Е. Б. Вольф [и др.] // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33 – № 2. – с. 149-162.

57. Злочевская, Р. И. Состояние воды в глинистых породах / Р. И. Злочевская, В. А. Королев, З. А. Кривошеева [и др.] // Вестник Московского университета. Геология. – 1986. – № 6. – с. 39-53.

58. Каган, А. А. Моренные отложения Северо-Запада СССР / А. А. Каган, М. А. Солодухин. – Москва : Недра, 1971. – 136 с.

59. Киселев, И. И. Геология и полезные ископаемые Ленинградской области / И. И. Киселев, В. В. Проскуряков, В. В. Саванин. – Санкт-Петербург, 1997. – 206 с.

60. Королев, В. А. Теоретическая оценка масштабного эффекта в дисперсных грунтах / В. А. Королев // Вестник Московского университета. Геология. – 2017. – № 6. – с. 77-86.

61. Ксенофонтов, А. И. Об учете начального градиента напора и «активной зоны фильтрации» при решении задач по консолидации / А. И. Ксенофонтов // Труды МИИТа. – Москва, 1973. – Вып. 432. – с. 78-86.

62. Ксенофонтов, А. И. Одномерная задача консолидации водонасыщенного глинистого грунта с учетом вязкости «скелета» грунта и поровой воды / А. И. Ксенофонтов // Труды МИИТа. – Москва, 1972. – Вып. 397. – с. 68-79.

63. Ксенофонтов, А. И. Решение задач консолидации грунтов с учетом различных комбинаций их свойств с помощью реологических моделей / А. И. Ксенофонтов, М. И. Войцеховский // Труды МИИТа. – Москва, 1972. – Вып. 397. – с. 55-67.

64. Кузьмин, А. В. Условия формирования и закономерности изменения физико-механических свойств поздне- и послеледниковых морских глин / А. В. Кузьмин // Записки Горного института. – 1970. – Т. 62. – № 2. – с. 118-122.

65. Кульнева, Н. Г. Микрофлора свеклосахарного производства: проблемы и пути решения / Н. Г. Кульнева, А. И. Шматова, Ю. И. Манько // Вестник ВГУИТ. – 2014. – № 1. – с. 193-196.

66. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В. Т. Трофимова, В. А. Королева. – 3-е изд. – Москва : КДУ, Университетская книга, 2017. – 654 с. – ISBN 978-5-91304-724-3.

67. Лессовые грунты Монголо-Сибирского региона / Т. Г. Рященко, В. В. Акулов, Н. Н. Ухов [и др.] ; отв. ред. К. Г. Леви ; РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. – Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2014. – 241 с. – ISBN 978-5-902754-86-2.

68. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1984. – 511 с.

69. Лохматиков, Г. А. Коренные глины Санкт-Петербургского региона как основание или вмещающая среда для уникальных сооружений : дис. … канд. геол.-мин. наук : 1.6.7. / Лохматиков Георгий Алексеевич. – Санкт-Петербург, 2022. – 181 с.

70. Лысак, Л. В. Бактериальные сообщества городских почв : автореф. дис. … д-ра биол. наук : 03.02.03 / Лысак Людмила Вячеславовна – Москва, 2010. – 47 с.

71. Малышев, М. В. Механика грунтов, основания и фундаменты (в вопросах и ответах) / М. В. Малышев, Г. Г. Болдырев. – 4-е изд.– Пенза : ПГУАС, 2000. – 412 с. – ISBN 978-5-9282-0575-1.

72. Маслов, Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н. Н. Маслов. – 2-е изд. – Москва : Высшая школа, 1968. – 631 с.

73. Мдивнишвили, О. В. Активные центры глинистых минералов (Монтмориллонита и каолинита) : автореф. дис. … канд. хим. наук : 00.11 / Мдивнишвили Отар Михайлович – Киев, 1972. – 32 с.

74. Месчян, С. Р. Реологические процессы в глинистых грунтах (с учётом особых воздействий) / С. Р. Месчян ; науч. ред. Б. К. Карапетян. – Ереван : Айастан, 1992. – 395 с. : ил. – ISBN 5-540-00826-X.

75. Мецик, М. С. Свойства тонких пленок между пластинками слюды / М. С. Мецик – В сборнике докладов IV конференции по поверхностным силам: Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. – Москва : Наука, 1972. – 328 с.

76. Милло, Ж. Геология глин (выветривание, седиментология, геохимия) / Ж. Милло ; под ред. А. Г. Коссовской. – Ленинград : Недра, 1968. – 359 с.

77. Назаров, М. М. Исследование диэлектрической функции водных растворов глюкозы и альбумина методом импульсной терагерцевой спектроскопии / М. М. Назаров, О. П. Черкасова, А. П. Шкуринов // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – № 6. – с. 488-495.

78. Новожилов, В. Н. Инженерно-геологическая характеристика нижнекаменноугольных пород центральной части Тихвинского горнопромышленного района / В. Н. Новожилов // Записки Горного института. – 1964. – Т. 48. – № 2. – с. 123.

79. Овечкина, О. Н. Анализ результата применения геотехногенного массива в сложных инженерно-геологических условиях города Екатеринбурга / О. Н. Овечкина // Известия Уральского государственного горного университета. – 2024. – № 1(73). – с. 121-136.

80. Осипов, В. И. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств / В. И. Осипов, В. Н. Соколов. – Москва : ГЕОС, 2013. – 576 с. – ISBN 978-5-89118-617-0.

81. Осипов, В. И. Микроструктура глинистых пород / В. И. Осипов, В. Н. Соколов, Н. А. Румянцева. – Москва : Недра, 1989. – 211 с. – ISBN 5-247-00473-6.

82. Осипов, В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород / В. И. Осипов. – Москва : Издательство Московского университета, 1979. – 235 с.

83. Осипов, Ю. Б. Магнетизм глинистых грунтов / Ю. Б. Осипов. – Москва : Издательство Московского университета, 1968. – 159 с.

84. Партон, В. З. Механика разрушения: От теории к практике / В. З. Партон. – Москва : Наука, 1990. – 240 с. – ISBN 5-02-014287-5.

85. Петров, Т. Г. Выращивание кристаллов из растворов / Т. Г. Петров, Е. Б. Трейвус, Ю. О. Пунин, А. П. Касаткин. – 2-е изд. – Ленинград : Недра, 1983. – 200 с.

86. Подковыров, В. Н. Литогеохимия и условия формирования отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-запада Балтийской моноклинали / В. Н. Подковыров, Л. Н. Котова // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2020. – № 65(3). – с. 600-619.

87. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия : избранные труды / П. А. Ребиндер. – Москва : Наука, 1978. – 368 с.

88. Родникова, М. Н. Отрицательная гидратация ионов / М. Н. Родникова // Электрохимия. – 2003. – Т. 39. – № 2. – с. 214-219.

89. Рухин, Л. Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах / Л. Б. Рухин. – 2-е изд. – Ленинград : Гостоптехиздат, 1961. – 778 с.

90. Рычагов, Г. И. О ледниковой стратиграфии и палеогеографии центра Восточно-Европейской равнины / Г. И. Рычагов, Н. Г. Судакова, С. И. Антонов // Вестник Московского университета. География. – 2012. – № 1 – с. 36-44

91. Рычагов, С. Н. Минералообразование на Восточно-Паужетском термальном поле (Южная Камчатка) как отражение влияния глубинного щелочного флюида и эпитермальной рудообразующей системы / С. Н. Рычагов, Е. И. Сандимирова, М. С. Чернов [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. – № 2. – с. 255-279.

92. Самойлов, О. Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов / О. Я. Самойлов. – Москва : Изд-во АН СССР, 1957. – 182 с.

93. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – Москва : Стандартинформ, 2016.

94. СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений. – Москва : Стандартинформ, 2018.

95. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2016.

96. СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – Москва : Стандартинформ, 2021.

97. Справочник по литологии / под ред. Н. Б. Вассоевича, В. Л. Либровича, Н. В. Логвиненко [и др.]. – Москва : Недра, 1983. – 509 с.

98. Сущенко, Р. З. Диатомовые почв и пирокластических отложений вулканов юга Камчатки (Россия) / Р. З. Сущенко, В. Б. Багмет // Ботанический журнал. – 2024. – Т. 109. – № 3. – с. 227-243.

99. Сырьевая база бентонитов СССР и их использование в народном хозяйстве / гл. ред. В. П. Петров. – Москва : Недра, 1972. – 288 с.

100. Таловина, И. В. Геохимия гипергенных никелевых месторождений Урала : автореф. дис. … докт. инж. – геол. наук : 25.00.09 / Таловина Ирина Владимировна – Санкт-Петербург, 2012. – 38 с.

101. Татаринова, Л. Л. Инженерная петрология кремнисто-глинистых пород палеогена и оценка их как оснований сооружений : на примере пород Урала : автореф. дис. … канд. геол. – мин. наук : 04.00.07 / Татаринова Лидия Леонидовна – Ленинград, 1978. – 24 с.

102. Терцаги К. Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Пек. – Москва : Госстройиздат, 1958. – 607 с.

103. Ухов, С. Б. Скальные основания гидротехнических сооружений / С. Б. Ухов. – Москва : Энергия, 1975. – 264 с.

104. Флорин, В. А. Основы механики грунтов (в двух томах) / В. А. Флорин. – Москва: Госстройиздат, 1961.

105. Фролов, В. Т. Генетическая типизация морских отложений / В. Т. Фролов. – Москва : Недра, 1984. – 222 с.

106. Хорн, Р. Морская химия / Р. Хорн. – Москва : МИР, 1972. – 400 с.

107. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – 4-е изд. – Москва : Госстройиздат, 1983. – 288 с.

108. Чижик, В. И. Определение структуры водных растворов электролитов с помощью ядерной магнитной релаксации : дис. … канд. физ. – мат. наук / Чижик Владимир Иванович. – Ленинград, 1966. – 115 с.

109. Чураев, Н. В. Свойства смачивающих пленок жидкости / Н. В. Чураев. – В сборнике докладов V конференции по поверхностным силам: Поверхностные силы в тонких пленках и устойчивость коллоидов. – Москва : Наука, 1974. – 296 с.

110. Шаевич, Я. Е. Некоторые вопросы терминологии и методики выделения циклов субаэральных пород / Я. Е. Шаевич // Труды института геологии и геофизики. – 1980. – Вып. 457. – с. 64-77.

111. Шашкин, А. Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А. Г. Шашкин. – Москва : Издательство “Академическая наука” – Геомаркетинг, 2014. – 352 с. – ISBN 978-5-905138-10-2.

112. Шашкин, А. Г. Развитие подземного пространства мегаполиса / А. Г. Шашкин, В. Н. Зенцов, В. М. Улицкий // Жилищное строительство. – 2018. – № 9. – с. 30-36.

113. Шпилевая, Д. В. Геологическое строение, минеральный состав и эколого-экономические аспекты освоения трубки Архангельская: месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова : автореф. дис. … канд. инж. – геол. наук : 25.00.11 / Шпилевая Дарья Владимировна – Москва, 2008. – 25 с.

114. Япаскурт, О. В. Литология / О. В. Япаскурт. – 2-е изд. – Москва : Инфра-М, 2016. – 359 с. – ISBN 978-5-16-011054-7.

115. Adamo, N. Dam safety: Monitoring of tailings dams and safety reviews / N. Adamo, N. Al-Ansari, V. Sissakian, J. Laue, S. Knutsson // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 11. – No. 1. – p. 249-289.

116. Ariosa-Iznaga, J. D. Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental / J. D. Ariosa-Izgana, C. W. Lavaut, P. S. Bergues-Garrido, R. D. Martínez // Minería y Geología. – 2003. – No. 1-2. – p. 19-36.

117. Arunan, E. Defining the hydrogen bond: An account (IUPAC Technical Report) / E. Arunan, G. R. Desiraju, R. A. Klein [et al.] // Pure and Applied Chemistry. – 2011. – Vol. 83, No. 8. – p. 1619-1636.

118. Attari, Y. Evaluation of Pile Driving Effects on Slope Stability in Clay / Y. Attari, H. P. Jostad, G. Grimstad [et al.] // Geotechnical and Geological Engineering. – 2023. – 42(3). – p. 1-16.

119. Ayala-Torres, C. Zeta potential as a measure of the surface charge of mycobacterial cells / C. Ayala-Torres, N. Hernández, A. Galeano // Annals of Microbiology. – 2014. – Vol. 64. – p. 1189-1195.

120. Bayer, J. V. Proton nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry in soil science applications / J. V. Bayer, F. Jaeger, G. E. Schaumann // The Open Magnetic Resonance Journal. – 2010. – Vol. 3. – No. 1. – p. 15-26.

121. Belova, S. E. Hydrolytic Capabilities as a Key to Environmental Success: Chitinolytic and Cellulolytic Acidobacteria from Acidic Sub-arctic Soils and Boreal Peatlands / S. E. Belova, N. V. Ravin, T. A. Pankratov [et al.] // Frontiers in Microbiology. – 2018. – Vol. 9. – p. 1-14.

122. Bernal, J. D. A Theory of Water and Ionic Solution, with Particular Reference to Hydrogen and Hydroxyl Ions / J. D. Bernal, R. H. Fowler // The Journal of Chemical Physics. – 1933. – Vol. 1. – No. 8. – p. 515-548.

123. Bjerrum, L. Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays / L. Bjerrum // Géotechnique. – 1954. – Vol. 4, No. 2. – p. 49-69.

124. Blatt, H. Petrology. Igneous, sedimentary and metamorphic / H. Blatt, R. J. Tracy. – 2nd edition – New York : W. H. Freeman and Company, 1996. – 530 p. – ISBN 0-7167-2438-3.

125. Bowron, D. T. Decyltrimethylammonium Bromide Micelles in Acidic Solutions: Counterion Binding, Water Structuring, and Micelle Shape / D. T. Bowron, K. J. Edler // Langmuir. – 2017. – Vol. 33. – No. 1. – p. 262-271.

126. Brax, M. Potential of NMR relaxometry to unravel the properties of mucilage in several pore sizes / M. Brax, M. Köhne, E. Kroener, G. E. Schaumann // Geoderma. – 2019. – Vol. 340. – p. 269-278.

127. Chizhik, V. I. Magnetic Resonance and Its Applications / V. I. Chizhik, Yu. S. Chernyshev, A. D. Donets [et al.]. – Cham : Springer Cham, 2014. – 782 p.

128. Christiansen, N. A. Bacterial communities in peat swamps reflect changes associated with catchment urbanisation / N. A. Christiansen, T. J. Green, K. A. Fryirs [et al.] // Urban Ecosystem. – 2022. – 25(5). – p. 1455-1468.

129. Collins, K. D. The behavior of ions in water is controlled by their water affinity / K. D. Collins // Quarterly Reviews of Biophysics. – 2019. – Vol. 52. – e11.

130. Dashko, R. E. Interdisciplinary Approach as Basis for Enhancing Construction and Operation Safety of Industrial Hydraulic Structures / R. E. Dashko, **D. L. Kolosova**. – Sustainability. – 2025. – No. 17(12). – p. 5244.

131. Dedysh, S. N. Planctomycetes in boreal and subarctic wetlands: diversity patterns and potential ecological functions / S. N. Dedysh, A. A. Ivanova // FEMS Microbiology Ecology. – 2019. – Vol. 95, No. 2. – fly227.

132. Dębowski, M. Technological Effectiveness of Sugar-Industry Effluent Methane Fermentation in a Fluidized Active Filling Reactor (FAF-R) / M. Dębowski, M. Zieliński // Energies. – 2020. – Vol. 13. – p. 6626.

133. Distler, G. I. Orientational and long range effects in epitaxy / G. I. Distler, V. P. Vlasov, V. M. Kanevsky // Thin Solid Films. – 1976. – Vol. 33. – No. 3. – p. 287-300.

134. Finney, J. L. The structure of water: A historical perspective / J. L. Finney // The Journal of Chemical Physics. – 2024. – No. 160(6). – 060901.

135. Fonken, G. S. Chemical oxidations with microorganisms / G. S. Fonken, R. A. Johnson. – New York : M. Dekker, 1972. – 312 p. – ISBN 0-8247-1211-0.

136. Frédérique, T-A. The 2016 landslide at Saint-Luc-de-Vincennes, Quebec: geotechnical and morphological analysis of a combined flowslide and spread / T-A Frédérique, A. Locat, S. Leroueil [et al.] // Canadian Geotechnical Journal. – 2020. – 58(2). – p. 295-304.

137. Germain, A. Hydrogeology of a complex Champlain Sea deposit (Quebec, Canada): implications for slope stability / A. Germain, N. L. Young, J-M. Lemieux [et al.] // Canadian Geotechnical Journal. – 2020. – 58(11). – p. 1611-1626.

138. Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids / A. A. Griffith // Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character. – 1921. – Vol. 221. – p. 163-198.

139. Gregory, K. P. Understanding specific ion effects and the Hofmeister series / K. P. Gregory, G. R. Elliott, H. Robertson [et al.] // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2022. – Vol. 24, No. 21. – p. 12682-12718.

140. Gudkov, O. I. Dielectric properties of mica at shf / O. I. Gudkov, M. S. Metsik // Soviet Physics Journal. – 1973. – Vol. 16. – No. 5. – p. 664-667.

141. Guimarães, R. N. History of tailings dam failure: Impacts on access to safe water and influence on the legislative framework / R. N. Guimarães, V. R. Moreira, J. R. Cruz [et al.] // Science of The Total Environment. – 2022. – Vol. 852. – p. 158536.

142. Hayamizu, K. Dynamic ionic radius of alkali metal ions in aqueous solution: a pulsed-field gradient NMR study / K. Hayamizu, Y. Chiba, T. Haishi // RSC Advances. – 2021. – Vol. 11. – No. 33. – p. 20252-20257.

143. Jäger, A. The relation of structural mobility and water sorption of soil organic matter studied by ^{1}H and ^{13}C solid-state NMR / A. Jäger, M. Bertmer, G. E. Schaumann // Geoderma. – 2016. – Vol. 284. – p. 144-151.

144. Juvik, E. S. Settlements of spread footing foundations on quick clay stabilized with lime and cement / E. S. Juvik, B. K. F. Bache, S. S. Berre // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 710. – 18th Nordic Geotechnical Meeting 18-19 January 2021, Helsinki, Finland. – 2021. – p. 012048.

145. Kaczmarek, Ł. Triaxial creep tests of glacitectonically disturbed stiff clay – structural, strength, and slope stability aspects / Ł. Kaczmarek, P. Dobak, T. Szczepański, K. Kiełbasiński // Open Geosciences. – 2021. – 13(1). – p. 1118-1138.

146. Kerckhof, F. From biogas and hydrogen to microbial protein through co-cultivation of methane and hydrogen oxidizing bacteria / F. Kerckhof, M. Sakarika, M. Van Giel [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2021. – Vol. 9. – p. 733753.

147. King, F. H. Principles and Conditions of the Movements of Ground Water / F. H. King // U.S. Geological Survey. – Washington : U.S. Government Printing Office, 1899. – Part II. – 326 p.

148. Koroleva, T. Hydrothermal Synthesis of Kaolinite Group Minerals / T. Koroleva, B. Pokidko, I. Morozov [et al.] // Materials. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – p. 472.

149. Lavaut, C. W. Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental / C. W. Lavaut // Minería y Geología. – 1998. Vol. XV. – No. 1. – p. 9-16.

150. Low, P. F. Viscosity of Interlayer Water in Montmorillonite / P.F. Low // Soil Science Society of America Journal. – 1976. – Vol. 40. – No. 4. – p. 500-505.

151. Löfroth, H. Challenges in slope stability assessment of contaminated fibrous sediments along the northern Baltic coast of Sweden / H. Löfroth, M. O'Reggan, I. F. Snowball [et al.] // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 289(3). – p. 106190.

152. Mellado, M. Microorganisms that participate in biochemical cycles in wetlands / M. Mellado, J. Vera // Canadian Journal of Microbiology. – 2021. – 67(11). – p. 771-788.

153. Metsik, M. S. Splitting of mica crystals and surface energy / M. S. Metsik // The Journal of Adhesion. – 1972. – Vol. 3. – p. 307-314.

154. Meyer, M. Determination of quantitative pore-size distribution of soils with ^{1}H NMR relaxometry / M. Meyer, C. Buchmann, G. E. Schaumann // European Journal of Soil Science. – 2018. – Vol. 69. – Issue 3. – p. 393-406.

155. Michaelides, A. Ice nanoclusters at hydrophobic metal surfaces / A. Michaelides, K. Morgenstern // Nature Materials. – 2007. – Vol. 6. – p. 597-601.

156. Mojid, M. A. Estimating the fully developed diffuse double layer thickness from the bulk electrical conductivity in clay / M. A. Mojid, H. Cho // Applied Clay Science. – 2006. – Vol. 33. – No. 3-4. – p. 278-286.

157. Moritsugu, N. Molecular Mechanism of Acceleration and Retardation of Collective Orientation Relaxation of Water Molecules in Aqueous Solutions / N. Moritsugu, T. Nara, S. Koda [et al.] // The Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 124. – No. 51. – p. 11730–11737.

158. Ning, Z. Anaerobic digestion of lipid-rich swine slaughterhouse waste: Methane production performance, long-chain fatty acids profile and predominant microorganism / Z. Ning, H. Zhang, W. Li [et al.] // Bioresource Technology. – 2018. – Vol. 269. – p. 426-433.

159. Okur, H. I. Beyond the Hofmeister Series: Ion-Specific Effects on Proteins and Their Biological Functions / H. I. Okur, J. Hladílková, K. B. Rembert [et al.] // The Journal of Physical Chemistry B. – 2017. – Vol. 121. – No. 9. – p. 1997-2014.

160. Onstott, T. C. Microbial Communities in Subpermafrost Saline Fracture Water at the Lupin Au Mine, Nunavut, Canada / T. C. Onstott, D. J. McGown, C. Bakermans [et al.] // Microbial Ecology. – 2009. – Vol. 58, No. 4. – p. 786-807.

161. Panagopoulou, A. Protein and water dynamics in bovine serum albumin – water mixtures over wide ranges of composition / A. Panagopoulou, A. Kyritsis, N. Shinyashiki, P. Pissis // The Journal of Physical Chemistry B. – 2012. – Vol. 116. – No. 15. – p. 4593-4602.

162. Pant, D. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review / D. Pant, A. Adholeya // Bioresource Technology. – 2007. – Vol. 98. – No. 12. – p. 2321-2334.

163. Park, J. S. Transfer of the small diatoms Thalassiosira proschkinae and T. spinulata to the genus Minidiscus and their taxonomic re-description / J. S. Park, S. W. Jung, J-S Ki [et al.] // PLOS One. – 2017. – 12(9). – p. e0181980.

164. Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond / L. Pauling. – 3rd ed. – Ithaca, New York : Cornell University Press, 1960. – 644 p.

165. Pashley, R. M. Surface forces in adsorbed multilayers of water on quartz / R. M. Pashley, J. A. Kitchener // Journal of Colloid and Interface Science. – 1979. – Vol. 71. – No. 3. – p. 491-500.

166. Pereiro, I. Nip the bubble in the bud: a guide to avoid gas nucleation in microfluidics / I. Pereiro, A. Fomitcheva-Khartchenko, L. Petrini, G. V. Kaigala // Lab on a Chip. – 2019. – Vol. 19. – No. 14. – p. 2296-2314.

167. Rapaport, D. C. Hydrogen bonds in water: Network organization and lifetimes / D. C. Rapaport // Molecular Physics. – 1983. – Vol. 50, No. 5. – p. 1151-1162.

168. Rosenqvist, I. Th. Considerations on the Sensitivity of Norwegian Quick-Clays / I. Th. Rosenqvist // Géotechnique. – 1953. – Vol. 3, No. 5. – p. 195-200.

169. Ruggeri, P. Characterization of the recent soft silty clay deposit in the Ravenna port area (Italy) / P. Ruggeri, V.M.E. Fruzzetti, G. Scarpelli // Proc., 6th Int. Conf. on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation. London : International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021.

170. Saarenketo, T. Electrical properties of water in clay and silty soils / T. Saarenketo // Journal of Applied Geophysics. – 1998. – Vol. 40. – No. 1-3. – p. 73-88.

171. Samoilova, E. The structure of microbial communities in redoximorphic microsites of Gleysol / E. Samoilova, V. Tejnechy, J. Kopecky [et al.] // European Journal of Soil Science. – 2023. – 74(3). – p. e13369.

172. Sanabria-León, R. Chemical and biological characterization of slaughterhouse wastes compost / R. Sanabria-León, L. A. Cruz-Arroyo, A. A. Rodríguez // Waste management. – 2007. – Vol. 27. – No. 12. – p. 1800-1807.

173. Selormey, G. K. A review of anaerobic digestion of slaughterhouse waste: effect of selected operational and environmental parameters on anaerobic biodegradability / G. K. Selormey, B. Barnes, F. Kemausuor, L. Darkwah // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. – 2021. – Vol. 20. – No. 4. – p. 1073-1086.

174. Sivaramakrishnan, R. Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield / R. Sivaramakrishnan, S. Shanmugam, M. Sekar [et al.] // Fuel. – 2021. – 291. – p. 120136.

175. Terzaghi, K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage / K. Terzaghi. – Vienna : Publisher of F. Deuticke, 1925.

176. Vedamuthu, M. Properties of Liquid Water: Origin of the Density Anomalies / M. Vedamuthu, S. Singh, G. W. Robinson // The Journal of Physical Chemistry. – 1994. – Vol. 98, No. 9. – p. 2222-2230.

177. Vestberg, B. Settlement and pore pressure behaviour and predictions of test embankments on an organic clay / B. Vestberg, M. Andersson // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2022. – 16(9). – p. 1049-1067.

178. Vinh, N. Q. Dielectric spectroscopy of proteins as a quantitative experimental test of computational models of their low-frequency harmonic motions / N. Q. Vinh, S. J. Allen, K. W. Plaxco // Journal of the American Chemical Society. – 2011. – Vol. 133. – No. 23. – p. 8942-8947.

179. Wernet, Ph. The Structure of the First Coordination Shell in Liquid Water / Ph. Wernet, D. Nordlund, U. Bergmann [et al.] // Science. – 2004. – Vol. 304, No. 5673. – p. 995-999.

180. Wilhelm, M. J. Determination of bacterial surface charge density via saturation of adsorbed ions / M. J. Wilhelm, Gh. M. Sharifian, T Wu [et al.] // Biophysical Journal. – 2021. – 120(12). – p. 2461-2470.

181. Williams, D. J. Lessons from tailings dam failures—Where to go from here? / D. J. Williams // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – p. 853.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка об использовании результатов кандидатской диссертации

GRF
ГЕОРЕКОНСТРУКЦИЯ
Общество с ограниченной ответственностью
«Институт архитектурно-строительного проектирования, геотехники и реконструкции»
(ООО «ПИ Георекнструкция»)
геотехника, изыскания и обследования, архитектурно-строительное проектирование
190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., д. 4, пом. 414
тел.: +7 (812) 339-35-87
ОКПО 96719055 ОГРН 5067847179440
ИНН/КПП 7839339252/783901001
факс: +7 (812) 575-36-25
E-mail: mail@georec.spb.ru www.georec.spb.ru

Утверждаю
Генеральный директор
ООО «ПИ Георекнструкция»
Д.г.-м.н.
Шашкин Алексей Георгиевич
«10» июня 2025 г.

СПРАВКА
об использовании результатов
кандидатской диссертации
Колосовой Дарьи Леонидовны
по научной специальности 1.6.7 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Комиссия Научно-технического совета института в составе: председатель д.т.н. Парамонов В.Н.; члены комиссии: д.т.н., профессор Сахаров И.И., к.т.н., Васенин В.А. составили настоящую справку о том, что результаты диссертации на тему «Инженерно-геологическое обоснование длительной устойчивости наземных сооружений на водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтах», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в научно-практической деятельности ООО «ПИ Георекнструкция» при **обосновании методологии исследований глинистых водо- и водогазонасыщенных глинистых грунтов малой и частично средней степени литификации, которые служат основанием проектируемых зданий и сооружений различного назначения, в том числе реставрируемых, реконструируемых и воссоздаваемых архитектурно-исторических памятников** в виде:

– Развития теоретических основ процесса фильтрационной консолидации, которые была предложены К. Терцаги и совершенствовались

отечественными учеными (В.А. Флориным, Н.А. Цытовичем, З.Г. Тер-Мартиросяном и др.);

– Дополнения базируются на обязательном учете прочности структурных связей, а также на экспериментальных исследованиях изменения структуры воды в дисперсных грунтах под воздействием активных центров различных фаз глинистых грунтов, в том числе твердой (минеральной), обменных катионов в диффузном слое, микроорганизмов, которые образуют биопленки на поверхности частиц водонасыщенных грунтов. Кроме того, изучено влияние генезиса минеральной части (абиотической и биотической). На базе выполненных исследований с применением ядерного магнитного резонанса показано, что наибольше воздействие на структуру поровой воды в дисперсных грунтах оказывают биогенный кремнезем, глинистые частицы монтмориллонитового состава и клетки микроорганизмов.

Использование указанных результатов позволяет:

– Повысить достоверность ряда расчетных параметров на основе разработанной методологии обоснования повышения степени инертности поровых вод дисперсных грунтов при проектировании сооружений в сложных инженерно-геологических и геотехнических условиях;

– Особое значение такие результаты имеют в случаях, когда проектирование, строительство, реставрация, реконструкция или воссоздание сооружений ведется в районах (регионах) длительного исторического периода контаминации.

Результаты внедрялись при выполнении договорных работ по темам:

1.Приспособление Ансамбля «Новая Голландия» в Санкт-Петербурге для современного использования.

2. Реставрация и приспособление для современного использования здания Санкт-Петербургской консерватории им. Н.А.Римского-Корсакова.

3. Инженерно-геологические изыскания и геотехническое обоснование строительства стадиона «СКА Арена» в Санкт-Петербурге.

Председатель комиссии

Технический директор, д.т.н., профессор В.Н.Парамонов

Члены комиссии:

Главный научный консультатнт, д.т.н., профессор И.И.Сахаров

Зам.генерального директора, к.т.н. В.А.Васенин

10.06.2025