

Санкт-Петербургский государственный университет

МАЛКОВА Юлия Леонидовна

Выпускная квалификационная работа

**Инженерно-геологический анализ особенностей изменения свойств
водонасыщенных песчаных грунтов в условиях длительного загрязнения
нефтяными углеводородами**

Уровень образования: магистратура

Направление: 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа: ВМ.5798 «Гидрогеология и инженерная геология»

Научный руководитель:

старший преподаватель кафедры

инженерной геологии и гидрогеологии

Института наук о Земле СПбГУ

к. г.-м. н. Еремеева Анастасия Александровна

Рецензент:

главный геолог, ООО «КТПИ «Газпроект»,

к. г.-м. н. Александрова Ольга Юрьевна

Санкт-Петербург

2024

Содержание

Введение	3
Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТАМИ	4
1.1 Характеристика и свойства нефтяных углеводородов	4
1.2 Особенности распространения, преобразования и механизмы миграции нефтепродуктов в природных средах	8
1.3 Влияние нефтепродуктов на формирование свойств дисперсных грунтов..... (обзор публикаций и анализ результатов).....	22 22
Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА, СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЗУТОМ	36
2.1 Постановка экспериментальных исследований.....	36
2.2 Методика изучения физических и физико-механических свойств песков.....	36
Глава 3. ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЗУТОМ НА СВОЙСТВА ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В МАССИВЕ	40
3.1 Характеристика инженерно-геологических условий района работ	40
3.2 Особенности формирования свойств природных песчаных грунтов.....	47
3.3 Изменение показателей свойств песчаных грунтов в условиях их длительного загрязнения мазутом в массиве	48
3.4 Основные выводы, перспективные исследования и их значение для решения инженерных задач	75
Заключение.....	80
Список литературы.....	82
Приложения	87

Введение

Углеводородные загрязнители, образующиеся в результате крупномасштабных утечек из трубопроводов и системы хранения топлива, неправильного управления утилизацией нефтяных отходов, растущей вероятности аварий на различных этапах транспортировки и т.д., являются одним из наиболее распространенных загрязнителей грунтов.

По статистике, общие потери твердых и жидких углеводородов могут превышать 2,5 тонны и 140,0 тонн в год соответственно при эксплуатации резервуарных батарей и заправке автозаправочных станций. Поступление такого количества углеводородов в грунт, в верхней части которого расположены преимущественно песчаные грунты, приводит к изменению их состава, физико-механических и гидрофизических свойств.

Изучение физических и механических свойств грунтов имеет решающее значение при оценке инженерно-геологических условий территорий, особенно в случае загрязненных грунтов. Изменение свойств песчаных грунтов в результате длительного воздействия нефтепродуктов приводит к ряду рисков для строительства и эксплуатации сооружений.

Для обеспечения безопасности сооружений, возводимых на загрязненных песчаных грунтах, требуется разработка специальных инженерных решений, что может быть затруднено в виду отсутствия нормативной базы с точки зрения эксплуатационной надежности сооружений, проектируемых на подобных грунтах.

Цель. Анализ изменений свойств водонасыщенных песчаных грунтов в условиях их длительного загрязнения нефтяными углеводородами в массиве.

Задачи:

- 1) характеристика форм миграции нефтепродуктов и их трансформация в геологической среде;
- 2) определение влияния нефтепродуктов на свойства грунтов;
- 3) оценка инженерно-геологических условий района работ – территории мазутного загрязнения;
- 4) инженерно-геологические исследования свойств песчаных грунтов, загрязненных нефтяными углеводородами лабораторными методами.

Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

1.1 Характеристика и свойства нефтяных углеводородов

По статистическим данным нефть и природный газ с середины 1960-х гг. начинают играть ведущую роль в мировой энергетике (Агибалова, 2020).

В 2022 году в России добыли около 535 млн. т. нефти.

Нефть представляет собой сложную смесь углеводородов и органических соединений серы, азота и кислорода. Нефть имеет консистенцию маслянистой жидкости, обычно темно-бурого цвета, реже встречаются и светлые.

Содержание углерода в нефти обычно варьируется в пределах 82-87%, а водорода 12-14%. Во всех нефтях присутствуют также сера, кислород и азот, на долю которых приходится обычно 1-5 %. Чаще всего встречается в нефти сера, и ее количество может достигать 5—6 %. Содержание азота и кислорода обычно составляет несколько десятых процента, но иногда может достигать 1,5—2 % (Рябов, 2009).

В очень малых количествах в нефтях присутствуют различные металлы, такие как ванадий, никель, железо, магний, хром, титан, кобальт, калий, кальций, натрий и др.

Следовательно, основными соединениями, входящими в состав нефти, являются углеводороды (Рябов, 2009).

На состав углеводородов нефти влияет ряд факторов:

- особенности исходного органического вещества осадков;
- геохимические условия (pH) при преобразовании органического вещества в осадках;
- степень катагенетического (термического) превращения исходного для нефти органического вещества в зоне повышенных температур;
- вторичные изменения нефти в процессе образования ее залежей и при дальнейшем их существовании в течение длительного геологического времени (физическая дифференциация углеводородов в процессе миграции, длительное воздействие повышенной температуры, окислительные процессы в залежах вблизи от земной поверхности и т.п) (Агибалова, 2020).

Более 90-95 % нефти составляют углеводороды четырех гомологических рядов: парафиновые (алканы), нафтеновые (циклоалканы), ароматические (арены) и гибридные – парафино-нафтено-ароматические. Общее число углеродных атомов в нефтяных углеводородах изменяется от C₁-C₄ (газы) до C₆₀. Кроме химического состава, различают и фракционный состав нефти, получаемый в результате ее перегонки (бензины, керосины, дизельные топлива, котельные топлива, масла разнообразного назначения) (табл. 1). (Дашко, 2017).

Таблица 1. Основной фракционный состав нефти (Дашко, 2017)

Фракция нефти	Основные соединения	Длина углеводородной цепи
Бензины	Парафины, нафтены, арены	C ₃ -C ₁₀
Керосины	Парафины, нафтены, арены, непредельные углеводороды	C ₁₀ -C ₁₆
Соляровые масла	Парафины, нафтены, арены	C ₁₇ -C ₂₅
Мазуты	Высокомолекулярные парафины, полициклические арены, гибридные парафино-нафтено-ароматические углеводороды	>C ₂₅

Как уже было отмечено, в нефтепродуктах наряду с углеводородами содержатся также соединения серы, азота и кислорода. Однако процессы фракционирования, вторичной переработки и очистки приводят к существенному перераспределению группового углеводородного состава в различных видах нефтепродуктов, к изменениям в количестве и составе углеводородных компонентов, а также появлению новообразований (Гольдберг, 1984).

Содержание органических соединений серы, кислорода, азота в бензиновых, керосиновых, дизельных топливах обычно не превышает 1 %, а смол – десятых и даже тысячных долей процента. Котельные топлива в зависимости от назначения вырабатываются на основе дистиллятных продуктов, остатков прямой перегонки нефти и крекинг-остатков. В котельных топливах заметно возрастает содержание гетероорганических соединений, превышая их содержания в исходной нефти, для этих топлив также характерно обогащение смолами и асфальтенами, на которые приходится существенная доля их состава (Гольдберг, 1984).

На миграцию нефти и нефтепродуктов в породах и подземных водах, условия их нахождения в водоносном горизонте существенно влияют физические и физико-химические свойства нефтепродуктов (плотность, вязкость, температура кипения, сорбируемость, растворимость и др.) (табл.2) (Гольдберг, 1984).

Таблица 2. Основные физические свойства нефтепродуктов (Гольдберг, 1984)

Фракции нефти	Плотность, г/см ³	Вязкость, мм ² /с	Растворимость в воде при T=20 ⁰ С и атмосферном давлении, мг/дм ³	Температура кипения, ⁰ С
Бензины	0,700-0,780	0,66-0,80	9-505	40-200
Керосины	0,775-0,800	1,05-1,5	2-5	200-300
Соляровые масла	0,795-0,850	2,5-8,0	8-22	300-400
Мазуты	0,879-1,030	296-1021	–	>400

Плотность зависит главным образом от молекулярного строения. Нефть и большинство нефтепродуктов имеют плотность, меньшую единицы; исключение составляют мазуты, смазочные масла (плотность 0,879 – 1,030 г/см³).

Нефть растворяется в органических растворителях, в нормальных условиях может образовывать эмульсии с водой. Прежде всего, растворимость связана с химическим составом нефтепродуктов и увеличивается в ряду ароматические углеводороды > циклопарафиновые > парафиновые.

Вязкость нефти зависит от фракционного и группового состава нефтепродуктов: чем тяжелее состав, тем вязкость выше. И наоборот, вязкость снижается при увеличении лёгких фракций или растворённых газов. В целом вязкость нефтей и нефтепродуктов больше вязкости воды (принимаемой равной 1), в особенности это относится к маслам, котельным топливам, тяжелым нефтям. (Гольдберг, 1984).

Бензиновая фракция нефтей и конденсатов представляет собой сложную смесь углеводородов (до C11) различного строения (Плотникова, 2012).

Эта фракция используется для получения различных видов и сортов топлива для двигателей внутреннего сгорания. Она представляет собой смесь различных углеводородов, в том числе неразветвленных и разветвленных алканов. Поэтому бензиновую фракцию нередко подвергают термическому риформингу, чтобы превратить неразветвленные молекулы в разветвленные (Плотникова, 2012).

Дальнейшая перегонка нефти приводит к получению керосиновой фракции, имеющей еще более сложный состав. Керосиновая фракция обычно представлена углеводородами,

имеющими от 9 до 16 атомов углерода. Наряду с парафинами, моноциклическими нафтенами и углеводородами ряда бензола она содержит в своем составе бициклические — нафтеновые, ароматические и нафтено-ароматические углеводороды. Содержание углеводородов различных классов, также, как и при получении бензинов, зависит от состава исходной нефти (Плотникова, 2012).

Групповой и элементный состав солярового масла также в значительной степени определяется составом исходной нефти. Согласно ГОСТ 305-2013 соляровое масло вырабатывается из сернистых нефтей.

Мазут – жидкий продукт темно-коричневого цвета, остаток после выделения из нефти или продуктов ее вторичной переработки бензиновых, керосиновых и газойлевых фракций, выкипающих при температуре около 350...360С. представляют собой смесь углеводородов (молекулярной массой 500...3000 и более), асфальтенов, карбенов, карбоидов и органических соединений, содержащих металлы (V, Ni, Fe, Mg, Na, Ca). Физико-химические свойства мазута зависят от химического состава исходной нефти, степени отгона дистиллятных фракций и характеризуются показателями: вязкость 8...80 мм²/с (при 100 С), плотность 890...1000 кг/м³ (при 20С), температура застывания 10...40С, содержание серы 0,5...3,5%, золы до 0,3%, низшая теплота сгорания 39,4 ... 40,7 МДж/кг.

Мазуты применяют в качестве топлива для паровых котлов, котельных установок и промышленных печей.

Топочные мазуты представляют собой одну из основных разновидностей тяжелого жидкого топлива, включающего также флотский мазут и мазут, используемого в качестве топлива мартеновских печей (печное топливо). Котельные топлива применяют в стационарных паровых котлах и промышленных печах. Тяжелые моторные и судовые топлива используют в судовых энергетических установках (Уханов, 2022).

В соответствии с ГОСТ 10585-2013 в зависимости от назначения установлены следующие марки мазута:

- флотский Ф5;
- топочный 40;
- топочный 100.

К котельным топливам относят топочный мазут марок 40 и 100 (в мазут марки 40 для снижения температуры застывания до 10°С добавляют 8...15% среднедистиллятных фракций, в марку 100 – дизельные фракции не добавляют), к тяжелым моторным топливам – флотские мазуты Ф5 (Уханов, 2022).

1.2 Особенности распространения, преобразования и механизмы миграции нефтепродуктов в природных средах

Процессы миграции вещества в подземных водах определяются множеством факторов, которые принято разделять на две основные группы: гидродинамические, не затрагивающие межфазовые взаимодействия и химические процессы в растворе, и физико-химические, которые связываются с взаимодействиями в системе «вода-порода» и/или химическими реакциями внутри водной фазы (Румынин, 2020).

К главным гидродинамическим формам переноса и рассеивания компонентов в подземных водах относят: конвекцию под влиянием гидравлического или плотностного градиента, продольную и поперечную гидродисперсию, объединяемую в ряде задач с молекулярной диффузией. Также существует широкий спектр физико-химических и биологических (с участием микроорганизмов) взаимодействий, способных не только контролировать общую интенсивность миграции в водоносных пластах, но и обуславливать глубокую метаморфизацию исходного состава загрязняющих растворов. При этом выделяются: 1) процессы межфазового взаимодействия, которые реализуются на границе раздела жидкости и минерального скелета, и 2) внутрифазовые процессы (реакции), протекающие в объеме поровой жидкости. К первым относятся нелинейные сорбционные взаимодействия (ионный обмен, поверхностное комплексообразование), осаждение/растворение, выщелачивание, ко вторым – деструкция, реакции комплексообразования и некоторые другие (Румынин, 2020).

Конвективный перенос обусловлен перепадами (градиентами) гидравлического напора и контролируется структурой фильтрационного потока. Конвекция является одним из главным фактором, определяющим загрязнение водоносных горизонтов зоны активного водообмена. Соответствующие модели (расчетные схемы), характеризующиеся резкой границей раздела между вытесняющей и вытесняемой жидкостью (перемешивания нет), получили название «поршневого вытеснения» (Румынин, 2020).

При плановой фильтрации в однородном пласте двух жидкостей с одинаковой плотностью фронт вытеснения нормален к поверхности напластования. Ситуация, однако, заметно усложняется, если плотности жидкостей различны: фронт вытеснения, в частности, отклоняется от нормали к напластованию – более тяжелая жидкость занимает вблизи фронта нижнюю часть пласта (Мироненко, 2001).

Основные механизмы массопереноса в подземных водах обобщаются в дисперсионной модели, предназначенной для описания диффузно-дисперсионных явлений в водоносных горизонтах.

Диффузионно-дисперсионные явления при миграции вещества приводят к размытию контакта взаимно вытесняющих растворов.

К данным явлениям относятся молекулярная диффузия и механическая дисперсия, которые в совокупности составляют гидродисперсионный перенос вещества в подземных водах.

Дисперсия вещества зависит в общем случае от скорости фильтрации, а параметр, ее определяющий складывается из гидродинамической и молекулярно-диффузионной компонент.

Молекулярно-диффузионный перенос особенно важен при малых скоростях фильтрации, в первую очередь – при переносе через слабопроницаемые образования. При миграции вещества в стратифицированных пластах, представленных элементами с различной проницаемостью (прослоями и линзами глин в песчаных отложениях, пористыми блоками и трещинами), молекулярная диффузия действует как фактор, направленный на выравнивание концентраций, обуславливая отток вещества из более проницаемых элементов (по которым идет основной конвективный перенос) к менее проницаемым. В результате она способствует образованию на фронте вытеснения одного раствора другим переходной зоны, с постепенно меняющейся концентрацией, и снижает скорость его перемещения (Румынин, 2011).

Результаты лабораторных опытов показывают, что коэффициенты диффузии зависят от средних размеров пор и от их пространственного распределения.

При малых скоростях фильтрации конвекция имеет подчиненное значение, а диффузия становится главным механизмом, определяющим перенос вещества в горных породах (Румынин, 2020).

По такому внешнему проявлению с молекулярной диффузией ассоциируется еще один механизм переноса вещества – механическая дисперсия. Механическая дисперсия складывается из механических дисперсий в продольном и поперечном направлении. (Мироненко, 2001).

Продольная дисперсивность отражает геометрию порового или трещинного пространства. Величина коррелирует с размером элементарных составляющих фильтрующей породы (Румынин, 2011).

Поперечная дисперсия идет вкрест основного направления переноса и приводит к формированию двух- и трехмерных ореолов рассеивания.

Как отмечается, поперечная гидродисперсия является (наряду с молекулярной диффузией и временными флуктуациями поля скоростей) важнейшим фактором рассеивания вещества, относительная роль которого возрастает с увеличением масштаба переноса (боковой поверхности мигрирующего ореола) (Румынин, 2011).

Попадая в почвенный слой, а затем в зону аэрации, нефтяные углеводороды мигрируют первоначально в субвертикальном направлении под действием гравитационной силы.

Транспортировка таких несмешивающихся жидкостей в недрах в значительной степени зависит от силы тяжести и капиллярных сил, обусловленных характеристиками сети пор. Капиллярные силы также удерживают впоследствии в поровом пространстве жидкие углеводороды в виде отдельных мелких включений, образующих плохо связанные между собой агломераты, в неподвижном состоянии (Румынин, 2020).

Более того, органические химические вещества, содержащиеся в нефти, подвергаются естественному разложению, такому как сорбция, испарение и биodeградация, при миграции через зону аэрации (Rivett и др., 2011).

Поведение загрязняющих веществ в зоне аэрации сложнее, чем в насыщенной зоне, из-за процессов разделения между несколькими фазами (т.е. воздух–вода–нефтяные углеводороды – почва) при различных метеорологических условиях (т.е. осадках и испарении) (An S и др., 2023).

Благодаря испарению время существования нефтепродуктов в жидкой фазе в зоне аэрации ограничено, однако полного самоочищения пород не происходит, в виду того, что органические вещества переходят в газовую фазу и адсорбируются (Румынин, 2020).

Характеристики пор в зоне аэрации, определяющие поведение нефти, могут варьироваться в зависимости от нескольких факторов. Общий объем пор и размер отдельных пор использовались для определения проводимости флюида в ненасыщенной зоне. Verisso и др. (Verisso, 2012) показали, что уменьшение общей пористости в результате уплотнения приводит к значительному снижению относительной газопроницаемости, вызывая значительное распространение бескислородной области.

Обнаружено, что на многих загрязненных участках опасные органические соединения задерживаются в зоне аэрации из-за сорбции минеральными и органическими веществами почвы, что приводит к замедлению их дальнейшего прохождения через водную или газовую фазу (An S. и др., 2023).

Попадая в подземную среду, нефтяные углеводороды (УВ) подвергаются сорбции органическими и минеральными компонентами грунта. Органические химические вещества низкой полярности, такие как углеводороды, преимущественно сорбируются органическим веществом, связанным с грунтами. При высоком содержании органического вещества усиливается сорбция и значительно снижается доступность нефтяных углеводородов для биodeградации. Интенсивность накопления нефтяных углеводородов в грунте также связана со структурой

грунтов. В песчаных грунтах выявлены слабые уровни накопления этих соединений. Исследования показывают, что на характер сорбции влияют масса и морфология органического вещества, а также состав гумуса.

В то же время нефтяные углеводороды могут проникать в нанопоры грунта, где их доступность для микроорганизмов снижается (Геннадиев, 2015).

Растворенные компоненты нефти под землей разлагаются относительно быстро, пока доступно достаточное количество растворенного молекулярного кислорода. Там, где это не так, разложение происходит анаэробно с использованием кислорода нитратов и сульфатов. Образуется хорошо известный, так называемый восстановленный тип грунтовых вод, который снова превращается в окисленный тип в той степени, в какой загрязненная вода смешивается с кислородсодержащими грунтовыми водами (Schwille, 1981).

Биодеградация нефтяных УВ интенсивнее протекает в присутствии кислорода, а в водонасыщенных грунтах разложение этих веществ замедляется. При загрязнении грунтов комплексом нефтяных УВ биологической деградации в первую очередь подвергаются цепочечные компоненты, затем ароматические соединения, а смолы и асфальтены оказываются наиболее устойчивыми. Разложение многих компонентов сырой нефти и дизельного топлива может происходить в широком диапазоне температур. При низких температурах их разлагают психрофильные микроорганизмы. При этом на деятельность микроорганизмов, разлагающих нефтяные УВ, влияет агрегатный состав почв (Геннадиев, 2015).

Можно отметить, что в зоне аэрации значительна бактериальная активность из-за анаэробных условий, а также роль испарения, как механизма удаления загрязняющих веществ.

Многие химические соединения, находящиеся в жидком состоянии, не смешиваются с водой. При миграции в горных породах они, занимая часть порового пространства (или трещинного), формируют самостоятельную фазу, находящуюся в контакте с водной или воздушной (если процесс протекает в зоне аэрации или на поверхности потока грунтовых вод) фазами. При этом процесс сопровождается межфазовым массообменом, что приводит к формированию ореолов загрязнения подземных вод растворенными компонентами, входящими в состав несмешивающихся с водой жидкостей и мигрирующими за пределами границы раздела фаз подобно обычным солевым загрязнителям. В таких ситуациях приходится рассматривать миграцию многофазных жидкостей (Румынин, 2020).

Описание миграции несмешивающихся с водой жидкостей (НВЖ) отличается целым рядом особенностей, обусловленных различиями в фазовых проницаемостях и плотностях, капиллярными эффектами, межфазовыми переходами отдельных компонентов и др.

Миграция нефтяных углеводородов (наиболее характерные представители НВЖ) может осуществляться в нескольких формах: в виде исходной жидкой фазы, тонкодисперсной эмульсии, а также истинного раствора. Наиболее часто распространение нефтяных веществ происходит в виде однофазного жидкого слоя и/или молекулярного (истинного) раствора (Бочаров, 2000).

Существование на границе зоны аэрации и водонасыщенной толщи, а в некоторых случаях, зоны капиллярной каймы, некоторого «порогового» давления, наряду с низкой плотностью углеводородов по отношению к воде (для большинства плотность $<1 \text{ г/см}^3$), приводит к формированию линзы с избыточным содержанием нефтяных углеводородов.

Образовавшиеся скопления (линзы) на поверхности грунтовых вод вблизи источников загрязнения, мигрируют под действием градиента естественного фильтрационного потока, а более тяжелые углеводородные соединения очень медленно опускаются к подошве горизонта, и процесс контролируется не только гидродинамикой фильтрационного потока, но и морфологией нижнего водоупорного основания (Румынин, 2020).

На дне и вокруг нефтяного пятна часть компонентов нефти растворяется в грунтовых водах или образует эмульгированную нефть и мигрирует на расстояние с потоком грунтовых вод из-за потока грунтовых вод (Lingling, 2009).

Течение в водоносном горизонте сначала происходит под действием силы тяжести в виде совместного двухфазного потока, пока несмешивающаяся жидкость в поровом пространстве больше не присутствует в виде когезионной фазы, а рассеивается на большое количество изолированных капель и достигает остаточного насыщения. Таким образом, эти жидкости становятся практически неподвижными при нормальных условиях и в дальнейшем могут мигрировать только в зависимости от их растворимости в грунтовых водах, которая, как правило, слабая. Для такой транспортировки в растворимой форме применяются модели адвекции и гидродинамической дисперсии (Schwille, 1981).

В результате лишь небольшая часть загрязняющих веществ поступает непосредственно в водоносный горизонт, а большая часть будет находиться в жидкой фазе внутри зоны колебания уровня грунтовых вод и выше нее и преимущественно будет распространяться через зону аэрации, а не через зону ниже уровня грунтовых вод. Процесс непрерывного выщелачивания и эрозии поверхностных вод и атмосферных осадков нефтяные загрязняющие вещества попадают в грунтовые воды в течение длительного периода.

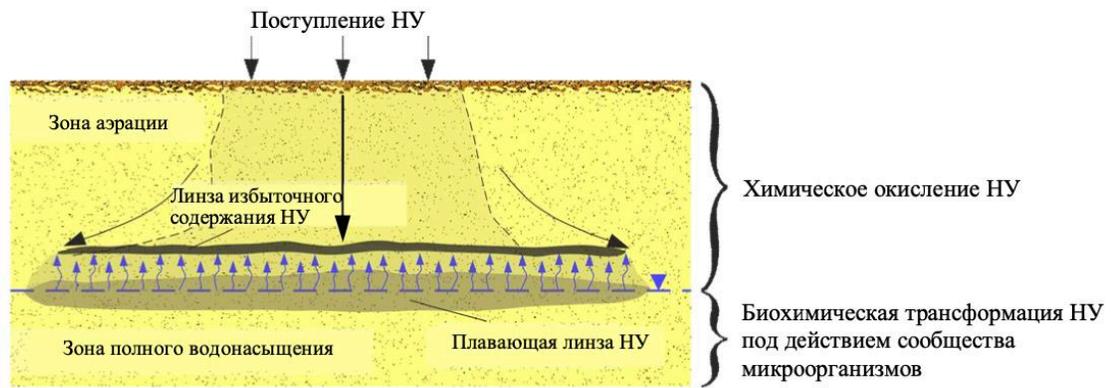


Рисунок 1. Схема формирования линзы избыточного содержания нефтяных углеводородов во времени t_1-t_2 (Велин, 2018)

Возникновение углеводородной линзы обычно происходит в грунтах с относительно невысокой водопроницаемостью. По данным Schwille (Schwille, 1981) способность к удержанию нефти в грунтах с высокой водопроницаемостью составляет 3-5 л/м³, а самое большое 30-50 л/ м³ в средах низкой проницаемостью.

При оценке углеводородного загрязнения грунтов и подземных вод плавающая линза углеводородов, чаще всего, представляет собой главное ядро загрязнения, для которого характерны следующие особенности: возможность увеличения мощности и площади распространения при непрерывном поступлении углеводородов; смещение вдоль зеркала грунтовых вод, как по направлению потока, так и в противоположном направлении; перемещение в вертикальном направлении за счет колебания уровня грунтовых вод (повышение уровня приводит к увеличению мощности линзы в результате дополнительного загрязнения грунтов зоны аэрации и смещения газообразных нефтепродуктов, понижение – к уменьшению за счет сорбции части углеводородов на поверхности грунтов) и др. (Велин, 2018).

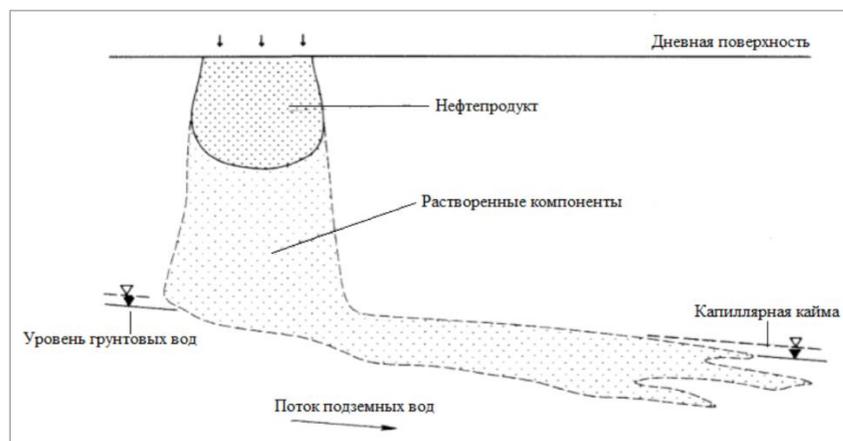


Рисунок 2. Аккумулированные в зоне аэрации нефтепродукты и их растворенные компоненты

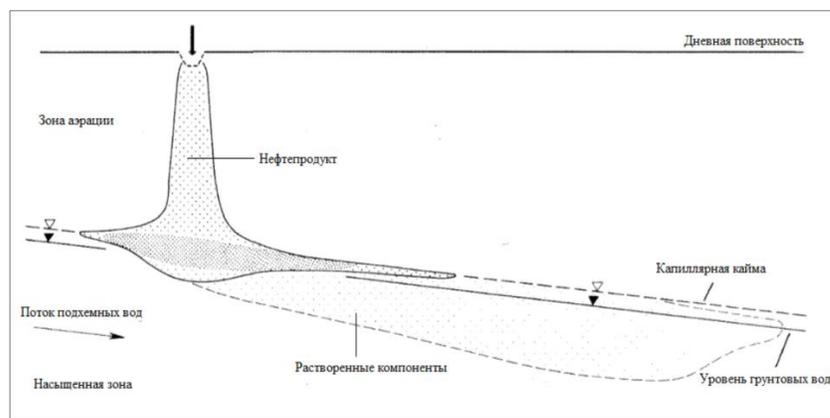


Рисунок 3. Распространение жидкого нефтепродукта и его растворенных компонентов

Как только нефтяные углеводороды достигает верхней границы зоны насыщения, которая находится внутри края капилляра, оно растекается сначала вниз, а также в стороны, степень распространения зависит от давления жидкости (рис. 3). Но боковое растекание быстро становится доминирующим. При снижении давления жидкости нефть, которая была вытеснена под уровень грунтовых вод, пытается снова достичь поверхности зоны насыщения. Тенденция нефти "всплывать" на поверхность настолько сильна, что даже нефть, закачиваемая под уровень грунтовых вод, не остается в зоне насыщения, за исключением той части, которая соответствует остаточному насыщению (Schwille, 1981).

В результате сезонных колебаний грунтовых вод подвижная нефть, все еще находящаяся в стадии растекания, распределяется по вертикали до тех пор, пока, в конечном счете, при определенном размере нефтяной линзы не достигается стадия остаточного насыщения и, таким образом, неподвижности нефти (рис. 4) (Schwille, 1981).

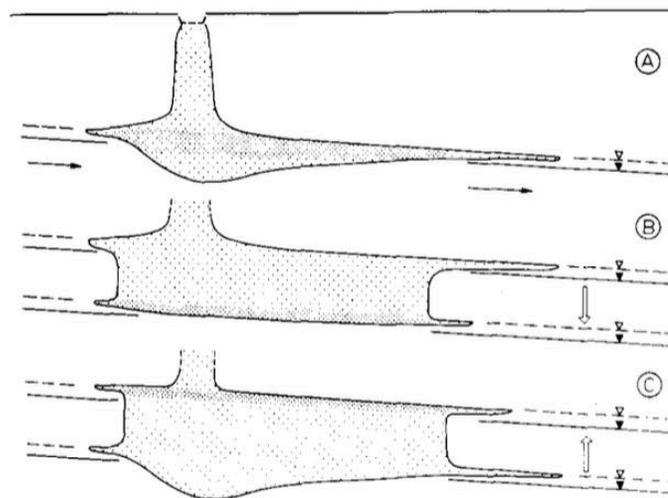


Рисунок 4. Перераспределения нефти в зоне колебаний уровня грунтовых вод.

Данная форма нахождения легких нефтепродуктов в геологической среде является первичной, все остальные формы легких нефтепродуктов в геологической среде являются его производными.

Водорастворенное состояние легких нефтепродуктов весьма подвижно, его можно охарактеризовать как скапливание и перемещение водорастворенных углеводородов и некоторых содержащихся и нефтепродуктах неуглеводородных ингредиентов в подземных водах и в питающих их сточных водах технологического и атмосферного происхождения (Гольдбер, 2001).

При растворение нефтяных углеводородов в воде под крупной плавающей линзой происходит движения от нижней границы углеводородной линзы к поверхности грунтовых вод при этом идет постепенное уменьшение количества углеводородов в эмульгированной форме и увеличение водорастворимых фракций до некоторого максимума концентрации, после чего их дальнейшая миграция происходит под действием градиента концентрации, т.е. происходит диффузия растворимых углеводородов из области их большего содержания в зону меньших концентраций, характерных для нижележащих грунтовых вод. Миграция растворенных веществ происходит по законам гидродинамической дисперсии.

В целом нефтепродукты плохо растворяются в воде. Но это правило не распространяется на абсолютно все группы составляющих их углеводородных соединений. Оно не относится к ароматическим и, в меньшей степени, к циклопарафиновым углеводородам. Следовательно, чем выше их содержание в контактирующих с водой товарных видах нефтепродуктов, тем больше концентрация данных компонентов в подземных водах (Гольдберг и др, 2001).

Газообразное состояние представляет собой скапливание и последующее перемещение летучих углеводородов, перешедших из жидкой в газовую фазу при испарении с поверхностей подземных скоплений жидких нефтепродуктов, в пустотном пространстве грунтов, не занятом водой, или же в собственно воде, насыщающей данное пространство (Гольдберг и др., 2001).

Как отмечается в работе Schwille (Schwille, 1981) испарение под землей выгодно, с одной стороны, поскольку оно вносит значительный вклад в уменьшение содержания фазы в зоне аэрации, поскольку газ частично выделяется на поверхность. С другой стороны, газовая фаза в поровом пространстве приводит к дополнительному контакту с фильтрационной водой, посредством чего снова может быть загрязнена соответственно большая площадь грунтовых вод.

Особое внимание следует уделить особенностям миграции в грунтовых водах тяжелых углеводородов (плотность выше единицы), входящих в состав тяжелых мазутов и различных индустриальных масел. Поступление указанных веществ в подземные воды возможно только в том случае, если на поверхности земли развит рыхлый почвенный покров, зона аэрации имеет небольшую мощность и представлена высокопроницаемыми грунтами. В противном случае, тяжелые углеводородные фракции скапливаются на поверхности почв и в верхней части зоны аэрации (Велин, 2018).

Поступая в грунтовые воды, сильновязкие, практически несмешивающиеся с водой углеводороды под действием сил гравитации накапливаются в нижних частях водоносного горизонта. При этом с момента их поступления в грунтовые воды начинают развиваться процессы разделения поступающих углеводородов. Легкие, менее плотные компоненты всплывают к поверхности грунтовых вод с образованием или дополнением углеводородной пленки, происходит переход части нефтяных веществ в растворимую форму (прежде всего, это относится к ароматическим, циклопарафиновым и другим углеводородам, содержание которых в составе различных мазутов и масел может достигать порядка 40 %).

Также, если на пути миграции нефтепродуктов по подошве горизонта встречаются морфологические депрессии, то тяжелые углеводороды будут стремиться заполнить их, при этом тяжелая жидкость может прекратить свое субгоризонтальное перемещение по напластованию, и дальнейшее загрязнение подземных вод будет происходить за счет поступления в них растворенных компонентов с поверхности обособленных тел (Румынин, 2020).

Наиболее тяжелые и вязкие компоненты достигают подошвы грунтовых вод и накапливаются на подстилающем водоупоре. Приведенный механизм миграции тяжелых углеводородов в грунтовых водах возможен только в однородной, высокопроницаемой толще, в свою очередь, если в разрезе водонасыщенной толщи находятся слабопроницаемые отложения, то их

наличие, так же, как и в зоне аэрации, способно изменить направление миграции углеводородов. В результате этого большая часть наиболее плотных и вязких углеводородов концентрируется на поверхности слабопроницаемых прослоев, не достигая подошвы водоносного горизонта (Велин, 2018).

Особенности миграции нефтяных углеводородов в подземных водах во многом предопределяются спецификой строения и свойств грунтов зоны аэрации. Тесная взаимосвязь подземных вод с грунтами зоны аэрации имеет особое значение при рассмотрении вопроса миграции нефтяных линз и/или плёнок, эмульгированных и растворенных углеводородов при колебании уровня грунтовых вод. Так, при повышении уровня грунтовых вод под действием природных и техногенных факторов происходит их взаимодействие с грунтовой толщей зоны аэрации, которое может иметь следующие результаты:

- если распространение НУ не достигло зеркала грунтовых вод и подземные воды имеют относительно чистый, свободный от углеводородов, химический состав, то при повышении уровня происходит их загрязнение нефтяными веществами различных форм, содержащихся в грунтах зоны аэрации.

- при условии, что миграция НУ достигла зеркала грунтовых вод и загрязненными оказываются как зона аэрации, так и грунтовые воды, то в результате повышения уровня может происходить как одновременное увеличение степени их контаминации, так и загрязнение только одной из указанных зон. Стоит отметить, что результатом такого загрязнения может быть выход углеводородов нефти на земную поверхность, особенно в условиях наличия естественных или техногенных понижений рельефа (в том числе в заглубленных частях зданий и сооружений – подвалах, коробах и коллекторах подземных инженерных коммуникаций и др.).

- в случае, если контаминация грунтовой толщи произошла на некотором локальном участке и привела к формированию различных форм нефтяного загрязнения подземных вод, перемещенных под действием динамики водного потока на некоторое расстояние, то повышение уровня грунтовых вод приведет к контаминации ранее незагрязненных грунтов зоны аэрации (Велин, 2018).

Загрязнение почвенного покрова нефтяными углеводородами приводит к образованию профиля углеводородного загрязнения, закономерности формирования которого, обусловлены многокомпонентностью состава и особенностями строения почвенного профиля – системой почвенно-геохимических барьеров и их свойствами, количеством и формой почвенной влаги. Миграция углеводородов в зоне аэрации носит сложный многофазный характер и представлена в виде системы взаимодействий: нефтяные углеводороды – грунт – воздух, учитывающей

специфику строения и свойств углеводородов и вмещающих грунтов, а также наличие некоторого «порогового» давления, определяющего возможность их дальнейшей миграции в водонасыщенной среде.

Нефтяные вещества сорбируются на грунтах в виде жидкой фазе. В основном сорбируются полярные компоненты нефтяных веществ (нафтеновые кислоты, смолы, асфальтены). Способность к сорбции углеводородов понижается в ряду олефины > ароматические > циклопарафины > парафины.

Способность связи нефтяных веществ с грунтами зависит также от свойств грунтов, а именно от капиллярных сил. Количество задержанных нефтепродуктов в единице объема грунта зависит от общего свободного объема капилляров, что означает зависимость от гранулометрического состава (Гольдберг, 1984).

В условиях преобладания в отложениях зоны аэрации песков и супесей, особенно с пониженной влажностью, связывание нефтепродуктов идет слабо. Наибольшей сорбционной способностью отличаются почвенный слой, торфяники и суглинисто-глинистые разновидности пород. В таблице 3 приведена классификация основных видов пород по их способности поглощать нефтяные продукты (НП) (Путилина, 2019).

Таблица 3. Способность грунтов к сорбции нефтяных продуктов (Путилина, 2019)

Грунт	Порядок Кф, м/сут	Количество сорбированных НП, л/м ³
Крупный гравий, валуны	100	–
Гравий, грубозернистый песок	100-10	8
Песок крупный-средний	10-1	15
Песок средний-мелкий	1-0,1	25
Песок глинистый, глины	0,1-0,001	40

Сорбция частицами грунта является одним из наиболее важных факторов, влияющих на перенос и распределение органических загрязнителей. Этот процесс может существенно снизить подвижность загрязняющих веществ, тем самым снижая их биоразлагаемость, биодоступность, выщелачиваемость и летучесть; следовательно, он должен быть включен в процессы переноса загрязняющих веществ, их массового переноса и ослабления.

Сорбция включает в себя взаимодействие между загрязнителем и минеральными и органическими веществами почвы посредством одного или нескольких из следующих взаимодействий: водородных связей, диполь-дипольных взаимодействий, ионного обмена, ковалентного связывание, протонирование, обмен лигандами, образование катионных мостиков, водных мостиков и/или гидрофобное разделение. Органические соединения низкой полярности, такие как углеводороды, преимущественно сорбируются органическим веществом, связанным с почвами (Balseiro-Romero, 2018).

В процессе длительного нахождения в подземной среде углеводороды могут все в большей степени связываться путем разделения на твердые частицы почвы (предпочтительно органические вещества) или путем захвата и диффузии в почвенные капилляры и нанопоры, что приводит к медленному переходу в газовую или водную фазы, что обычно известно, как медленная десорбция (Balseiro-Romero, 2018).

Изменение фазовой формы НУ при миграции в подземном пространстве связано с развитием процессов их химического окисления и биохимической трансформации различными группами микроорганизмов (Велин, 2018).

Разрушение нефтепродуктов происходит путем химического окисления и биогенного разложения. Соотношение этих процессов зависит от условий среды. Вклад процессов химического окисления в разрушение нефтепродуктов различен для поверхностных и подземных вод.

Наиболее быстрое и полное разложение большинства органических загрязнителей происходит в аэробных условиях.

В условиях свободного доступа кислорода, под влиянием фотохимического действия солнечного света деградация нефтяных компонентов может протекать в результате автокаталитических процессов по механизму цепных свободно радикальных реакций. Первой ступенью цепного процесса является образование гидроперекисей с участием кислорода воздуха. Углеводороды, способные особенно легко образовывать гидроперекиси под влиянием окисления, широко представлены в нефтях и нефтепродуктах (изопропилзамещенные ароматические соединения, замещенные циклопарафины, изопарафины, содержащие третичный углеродный атом, и др.).

Весьма сильное влияние на процессы самоокисления может оказывать присутствие в нефтях и нефтепродуктах серосодержащих соединений, фенолов, металлоорганических комплексов, которые могут ингибировать или катализировать процессы разрушения углеводородов (Гольдберг, 1984).

Продуктами химического окисления углеводов являются спирты, альдегиды, кетоны, кислоты, смолы и пр., которые переходят в газообразное или растворенное состояние и продолжают миграцию по разрезу, либо накапливаются в трещинно-поровом пространстве грунтов и подвергаются дальнейшей трансформации при участии различных групп микроорганизмов в водонасыщенной среде (Дашко, 2017).

Микроорганизмы обладают свойством избирательного отношения к различным углеводам, причём эта способность определяется не только различием в структуре вещества, но даже и количеством углеродных атомов, входящих в структуру. Окисление углеводов большинством известных микроорганизмов осуществляется с помощью адаптивных энзимов (ферментов). Этот факт установлен многочисленными экспериментами по окислению углеводов клетками микроорганизмов, выращенных на неуглеводородных субстратах (Тимергазина, 2012).

Биоразлагаемость компонентов нефти следующая: асфальтены < полициклические ароматические углеводороды < циклические алканы < моноароматические соединения < низкомолекулярные n-алкилароматические соединения < разветвленные алкены < разветвленные алканы < n-алканы (Aziz, 2024).

Наиболее изучены пути деградации микроорганизмами парафинов, так как это одни из самых доступных для деградации соединений. Первыми стабильными продуктами окисления углеводов являются первичные спирты. Следующий этап составляют обычные биологические превращения спирта в альдегид и альдегида в кислоту (Тимергазина, 2012).

Микробная деградация алканов возможна благодаря наличию в клетке структур, обеспечивающих поглощение гидрофобного и не растворимого в воде субстрата. Ферменты микроорганизмов, осуществляющие деградацию алканов, относятся к классу оксидоредуктаз смешанных функций (оксигеназ) и связаны с мембранными структурами клеток. Оксигеназы катализируют включение одного атома кислорода из его молекулярной формы в концевую метильную группу углеводорода. Углеводороды, имеющие в составе молекулы разветвленную цепь атомов, практически недоступны биохимическому окислению, так как взаимодействие «субстрат – фермент» затруднено из-за конформации молекул субстрата (Брянская, 2014).

От физиологических особенностей каждого рода микроорганизмов зависит направленность процесса деструкции индивидуальных углеводов и их смесей, обладающих различной степенью устойчивости к окислению (табл. 4) (Тимергазина, 2012).

Таблица 4. Классификация компонентов нефтей по их способности к биодерадации (Тимергазина, 2012)

Группа	Отношение к воздействию микроорганизмов	Степень биодеградации, % к исходному содержанию	Компоненты нефти
I	Высоко чувствительные	80-100	н-алканы; изо-алканы
II	Чувствительные	60-80	цикланы с 6, 1, 5 и двумя кольцами; S-ароматика; моноароматика
III	Умеренно чувствительные	45-60	циклоалканы с 3 и 4 кольцами; триароматические УВ
IV	Устойчивые	30-45	тетраароматические УВ; стераны; тритерпаны; нафтоароматические УВ
V	Высокоустойчивые	0-30	пентаароматические УВ; асфальтены; смолы

Почвенные микроорганизмы могут адаптироваться к использованию углеводов в качестве источника углерода при наличии благоприятных условий, таких как температура, pH, влажность, конечные акцепторы электронов и питательные вещества (Rivett и др., 2011). Однако низкая способность высокомолекулярных углеводов к разложению (включая алканы постоянной фракции и 4-, 5- или 6-кольцевые ПАУ) является ключевым фактором, определяющим их высокую устойчивость в почве.

Биодегградация углеводов является относительно эффективной по сравнению с разложением углеводов, сорбированных или захваченных частицами почвы. Таким образом, одним из основных препятствий для биодегградации сорбированных молекул загрязняющих веществ является низкая биодоступность. Как уже объяснялось, сорбция почвой приводит к замедлению переноса загрязняющих веществ в воздух и в выщелачивающую воду. Этот процесс также может препятствовать биодегградации. Однако микробы выработали приспособления (включая морфологические, физиологические и поведенческие) для повышения биодоступности химических веществ в почве за счет усиления высвобождения сорбированных

загрязняющих веществ (например, за счет производства биосурфактантов), способствующих расселению микроорганизмов (и их внеклеточных ферментов) в загрязненной почве. матрикса (например, путем образования грибкового мицелия) или непосредственного прикрепления к загрязненной среде (например, посредством хемотаксиса или реакций образования биопленки) (Ren и др., 2018).

1.3 Влияние нефтепродуктов на формирование свойств дисперсных грунтов (обзор публикаций и анализ результатов)

Выброс нефти в грунты из-за утечек в резервуарах для хранения и переходных трубопроводах или из-за процесса добычи нефти изменяет ее физические, механические и гидравлические свойства, что приводит к существенным проблемам с фундаментом существующих сооружений. Было проведено множество исследований для изучения влияния нефтяного загрязнения на физико-механические свойства, охватывающие различные грунты и типы загрязняющих веществ.

Количество и степень проникновения нефтяных загрязнителей зависят от характеристик грунта (пористости, проницаемости, содержания воды и т.д.), а также от природы и количества компонентов, входящих в состав загрязнителя. Изменение структуры грунта, а именно геометрическое расположение минеральных зерен, взаимодействий между частицами и поровой жидкости, важно при изучении влияния нефтяных углеводородов на свойства грунтов (Haghsheno, 2022).

Ряд научных публикация направлен на изучение вопроса о миграции нефтяных углеводородов в грунтовую толщу.

В исследовании Abdul (1988) была проведена оценка условий, необходимых для миграции нефти через зону аэрации к уровню грунтовых вод.

Были проведены лабораторные эксперименты на колонке для изучения миграции нефтепродуктов через песчаную пористую среду. Было обнаружено, что давление нефти, необходимое для вытеснения воды из пор песчаной среды, увеличивается с глубиной ниже верхней части колонки. В то время как нефть под отрицательным давлением вытесняла воду через зону аэрации, для вытеснения воды из пор на уровне грунтовых вод требовался значительный вертикальный столб нефти. Эти результаты указывают на то, что проникновение нефти до уровня грунтовых вод и ниже него произойдет только в том случае, если пористая среда обладает высокой электропроводностью и скорость утечки нефти высока. При небольших или

умеренных скоростях утечки и гидравлической проводимости нефть предпочтительно будет распространяться в поперечном направлении через зоны выше уровня грунтовых вод. Этот процесс распространения мог бы послужить естественным барьером для серьезного загрязнения водоносного горизонта нефтепродуктами (Abdul, 1988).

Также в пористых породах небольшой прослой слабopроницаемых пород может служить надежным барьером, защищающим водоносный горизонт от проникновения в него нефтяных углеводородов (Румынин, 2020).

В работе Lo I. и др. (Lo, 2004) представлено центрифужное моделирование миграции LNAPL в ненасыщенных грунтах с акцентом на долговременную миграцию бензина и его основных компонентов (BTEX), а также обсуждается влияние растворимости BTEX в воде и свойств почвы на характер их миграции и распределение концентраций.

Результаты испытаний показали, что бензин проник в зону аэрации и двинулся вниз, образуя зону высокой концентрации над уровнем грунтовых вод, а затем распространяясь в стороны. Концентрации бензола, толуола, этилбензола и ксилолов (BTEX), которые представляют собой основные компоненты бензина со временем уменьшаются и постепенно распространяются на большее расстояние, при этом на характер их миграции и распределение концентраций влияют их растворимость в воде и свойства почвы.

В исследовании An S. и др. (2023) была проведена серия экспериментов с колонками ненасыщенного грунта путем моделирования подповерхностного загрязнения дизельным топливом в зоне аэрации с использованием различных текстур грунта при различной плотности и начальных концентрациях дизельного топлива, при этом частично подвергая их воздействию имитируемых осадков. Результаты показали, что грунты с менее мелкой фракцией были благоприятны для нисходящей миграции дизельного топлива, но неблагоприятны для его естественной деградации. Однако осадки усложняли относительную проводимость множества жидкостей (воды, воздуха и дизельного топлива) через сеть пор, тем самым уменьшая миграцию и разложение дизельного топлива.

Согласно литературным данным, углеводородные соединения обладают способностью вносить серьезные изменения во взаимодействие частиц, характеристики размера зерен и структуру грунта. В этой связи следует отметить, что в морфологии и геометрических характеристиках грунтов, очевидно, наблюдаются изменения, вызванные углеводородами, что приводит к ряду изменений характеристик грунтов (Rajabi, 2019). Изменение морфологии, как показывают исследования, происходит в связи с активностью микроорганизмов. Так, например, Hiebert (1992) и Bennett (1996) обнаружили, что местные бактерии в загрязненных нефтью

водоносных горизонтах могут ускорять выветривание силикатных минералов, причем первые связывают это с выработкой органических кислот, а вторые – с колонизацией микроорганизмами и метаболической активностью. В более позднем исследовании Bennett и др. (2001) развили эту мысль, предположив, что на процесс выветривания минералов может влиять их питательный потенциал, поскольку микроорганизмы избирательно воздействуют на полезные минералы.

Изменения характеристик и поведения грунта могут привести к снижению несущей способности, а также к увеличению дифференциальных или общих оседаний фундамента. В результате сооружения могут выйти из строя функционально или структурно. Загрязнение нефтью очень важно в случае сооружения, которое должно проектироваться на загрязненном грунте. Это может привести к отказу от загрязненного участка, уменьшению масштабов проекта или его удорожанию (Haghsheno, 2022).

Из-за воздействия нефтяного загрязнения на физико-механические свойства грунтов возникают проблемы с устойчивостью, прочностью и эксплуатационной пригодностью зданий и других сооружений.

Вопросом влияния углеводородного сырья на грунты занимались отечественные авторы: Н.Н. Бракоренко и Т.Я. Емельянова, (Бракоренко, Емельянова, 2011), А.П. Казенников, (Казенников, 2009), В.В. Середин, М.Р. Ядзинская (Середин, Ядзинская, 2014), Р. Э. Дашко (Дашко и др., 2014), Б.М. Осовецкий, А.В. Растегаев, Р.Г. Ибламинов, В.И. Каченов, М.Р. Ядзинская (Осовецкий и др., 2014), Р. Э. Дашко, И.Ю.Ланге (Дашко, Ланге, 2015) – и рассматривали с разных точек зрения. Например, Н.Н. Бракоренко и Т.Я. Емельянова (Бракоренко, Емельянова, 2011) в своей работе рассматривали изменение физико-механических свойств песчано-глинистых грунтов и их петрографического состава в связи с контаминацией нефтепродуктами. А.П. Казенников (Казенников, 2009) в ходе своей работы исследовал изменение сопротивления пенетрации в полевых условиях. Р. Э. Дашко, И.Ю. Ланге (Дашко, Ланге, 2015) показали влияние углеводородов на активизацию жизнедеятельности форм микроорганизмов.

Гранулометрический состав является важнейшим структурным элементом в исследованиях грунтов, поскольку он предоставляет важную информацию их фундаментальных физических характеристиках. Согласно исследованиям Н. Н. Бракоренко, Т. Я. Емельянова, можно отметить, что нефтепродукты, попавшие в песчаные грунты, уменьшают содержание песчаной фракции и увеличивает содержание тонкодисперсной (пылеватой) фракции.

Поведение дисперсных грунтов в основном основано на физических взаимодействиях между частицами грунта, наличие четких знаний о влиянии углеводородов на микроструктуру грунтов может быть полезным для понимания инженерного поведения грунтов.

Al-Adili (2017) в своем исследовании в результате испытаний песчаного грунта пришел к выводу, что загрязнение нефтью оказывает влияние на размер частиц, так как они становятся крупнее, чем в незагрязненном грунте (рис. 5).

Увеличение размера зерен связано с тем, что частицы грунта были покрыты загрязняющим веществом.

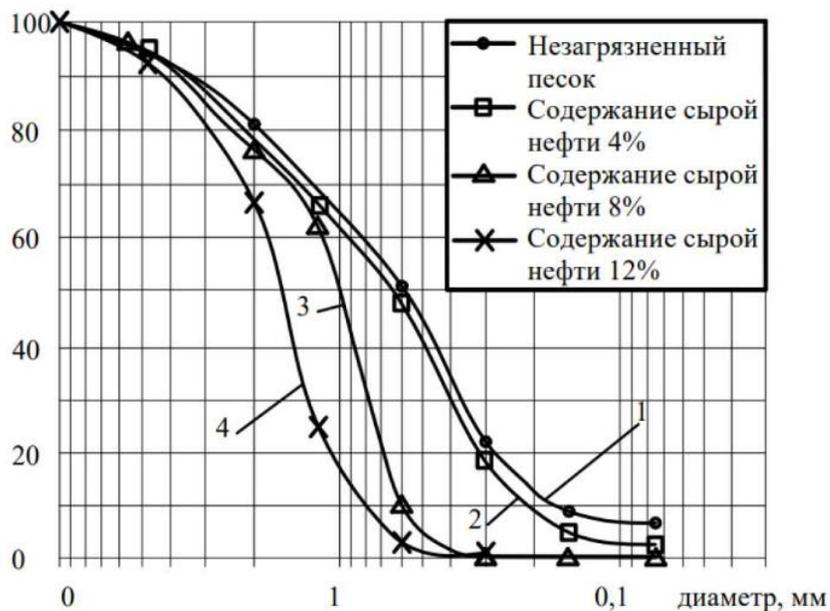


Рисунок 5. Гранулометрический состав песка с различным содержанием нефтяного загрязнения: 1 – чистый песок, 2 – загрязнение 4%, 3 – 8%, 4 - 12% (Al-Adili, 2017)

Увеличение тонкодисперсного материала может быть связано с присутствием в грунте трехвалентного железа. Эти изменения связаны с восстановительной средой, создаваемой наличием органических веществ (нефтепродуктов). происходит редукция трехвалентного железа ($Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$) и вследствие этого разрушение цементационных связей, образованных трехвалентным железом в глинистых грунтах. При появлении двухвалентного железа происходит разрушение агрегатов с последующим образованием тонкодисперсной фракции, с последующим ростом гидрофильности глинистых отложений (Бракоренко, Емельянова, 2011).

В результате накопления нефтепродуктов в песчаных грунтах их структура меняется за счет образования агрегатов. Авторы (Rajabi, Sharifipour, 2019) представили на рис. 6

SEM-изображения (полученные с помощью КУКУ – EM3200, Китай) природного песка, как в чистом, так и в загрязненном углеводородами состоянии.

Как видно из рис. 6 (a и b), отложение углеводородных соединений в песке может оказать значительное влияние на его микроструктуру. Эти изменения могут быть объяснены в двух аспектах. С одной стороны, углеводородные соединения могут образовывать вязкий слой, покрывающий поверхность каждой песчинки (рис. 5, с и d), а с другой стороны, загрязняющие вещества способны окружать области контакта между частицами песка, а также заполнять пустые пространства внутри частиц (рис. 5, е и f).

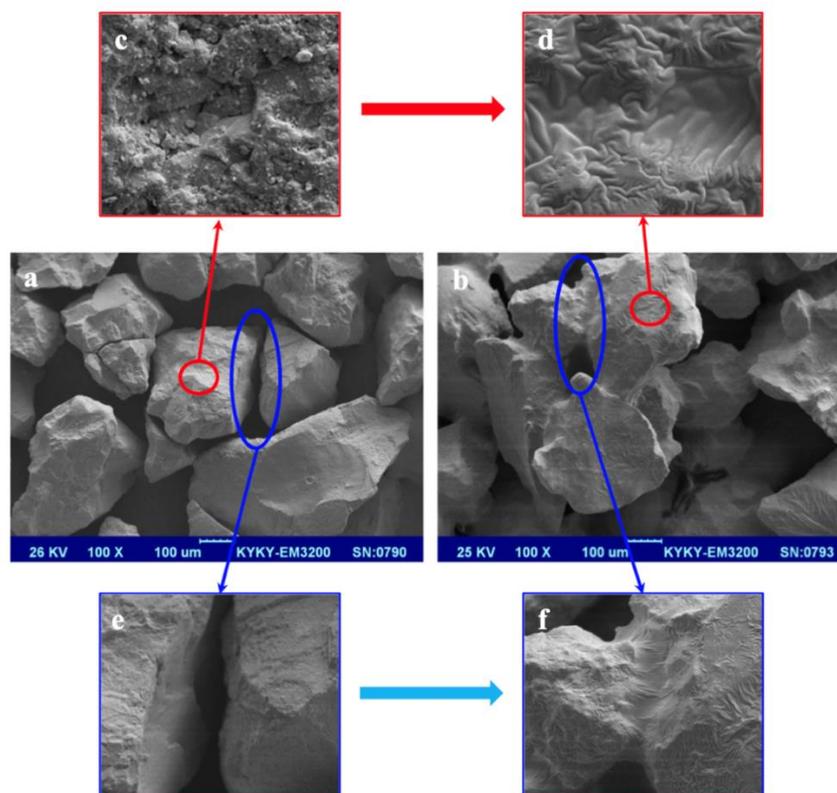


Рисунок 6. SEM-изображения (a) чистого и (b) загрязненного песка (Rajabi, Sharifipour, 2019)

Что касается физического влияния углеводородов на характеристики поверхности (например, шероховатость) частиц песка, которые в значительной степени зависят от количества углеводородов, то на рис. 7 представлены SEM-изображения чистого и загрязненного песка с содержанием легкой сырой нефти 4, 8 и 12 мас.%. В связи с этим можно в целом утверждать, что постепенное увеличение количества углеводородных соединений может привести к образованию углеводородных слоев вокруг частиц и контактов. После этого добавление большего количества углеводородов может сделать эти слои толще, а также заполнить больше пустых пор в структуре песка. По-видимому, при меньшем количестве загрязняющих веществ

слои, окружающие частицы песка, обладают способностью создавать сцепление между частицами и удерживать частицы вместе, образуя более прочную структуру. Однако этот положительный эффект может сопровождаться значительным воздействием на трение между частицами, особенно при небольших количествах углеводородов, которые не влияют на шероховатость поверхности (рис. 7, b). Добавление дополнительного количества углеводородов в песок может практически полностью покрыть шероховатость поверхности и быстро устранить трение (рис. 7, c). Более того, увеличение количества сырой нефти ослабляет индуцированное сцепление на следующих этапах, так что частицы песка, полностью покрытые углеводородами, теперь легко скользят друг вокруг друга рис. 7 d.

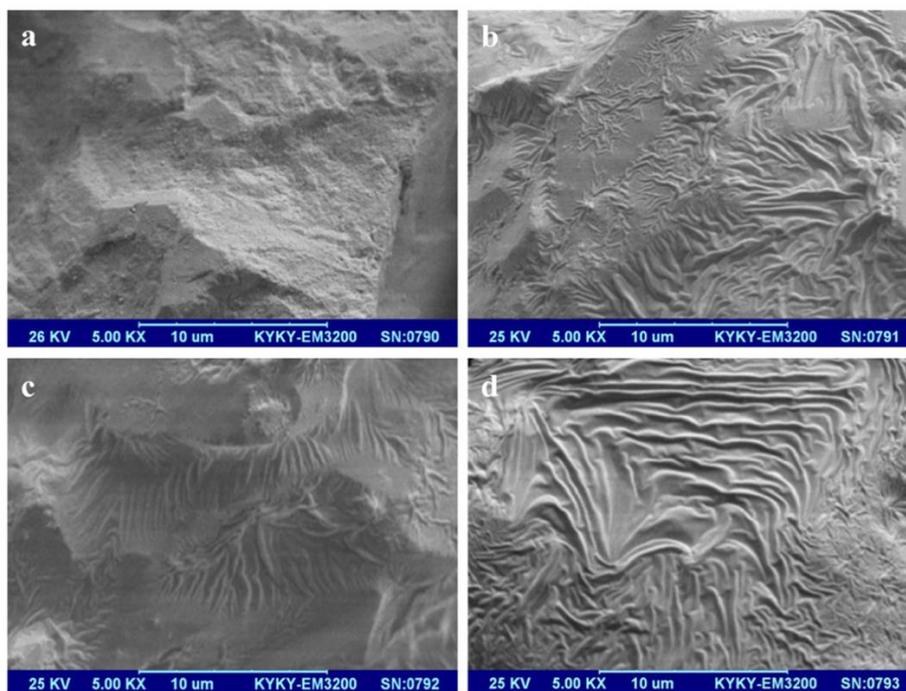


Рисунок 7. SEM-изображения песка: (a) чистый и загрязненный (b) 4 %, (c) 8%, (d) 12 % нефти (Rajabi, Sharifipour, 2019)

Однако в этом исследовании не учитывается влияние грунтовых вод и протекающих в них биохимических процессов на взаимодействие нефтяных углеводородов с минеральными частицами. Так, в исследовании Niebert (1992) рассматривалось влияние бактерий, прилипающих к поверхности, на диагенез силикатов в мелководном водоносном горизонте, загрязненном нефтью.

Местная микрофауна использует нефть, производит органические кислоты в качестве побочных продуктов метаболизма и изменяет геохимию грунтовых вод (8). Было идентифицировано семь распространенных родов аэробных бактерий, которые, как известно, утилизируют

углеводороды, и включают *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Vibrio Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Micrococcus* и *Achromobacter* (Hiebert, 1992).

Исследование зерен эталонного минерала методом СЭМ показало, что поверхности чистые и без признаков химического или механического выветривания. Зерна кварца угловатые и неправильной формы, а поверхности состоят из раковинных и ступенчатых трещин (рис. 8А). Поверхности полевого шпата гладкие и неровные, можно различить спайность (рис. 8D)

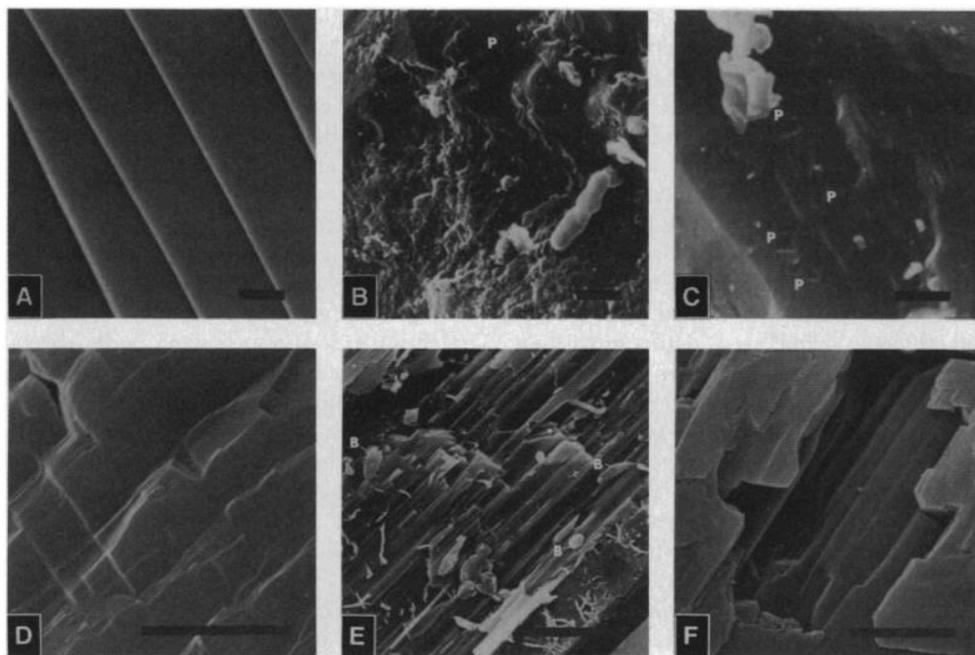


Рисунок 8. Сканирующие электронные микрофотографии контрольных и прореагировавших минеральных зерен: (А) поверхность контрольного осколка кристалла кварца, 1 мкм, (В) Поверхность осколка кварцевого кристалла, извлеченного из микрокосмоса через 14 месяцев (С) Углубления (Р) на поверхности кварцевого осколка, образовавшиеся через 14 месяцев. Треугольная морфология ямок характерна для химического выветривания, (D) поверхность контрольного фрагмента кристалла микроклина. Видны гладкие поверхности между плоскостями линейной спайности, 5 мкм. (E) поверхность фрагмента кристалла микроклина, извлеченного из микрокосма, (F) Поверхность фрагмента кристалла микроклина, извлеченного из микрокосма. Морфология этих поверхностных углублений аналогична тем, которые образуются при лабораторных исследованиях химического растворения полевых шпатов, 5 мкм (Hiebert, 1992)

Было отмечено интенсивное химическое выветривание полевых шпатов и легкое, но отчетливое выветривание кварца, особенно вблизи прикрепленных бактериальных клеток (рис.

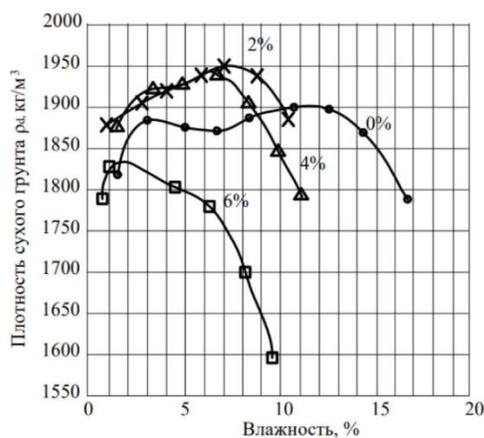
8, В, С и Е). Травление кварца происходило в воде, которая была многократно перенасыщена по отношению к кварцу. Выветривание проявляется в виде ориентированных треугольных углублений, которые четко сгруппированы в отдельные области. Неизвестная твердая фаза, осаждаемая на некоторых минеральных поверхностях (рис. 8В) (Hiebert, 1992).

В отличие от незначительного выветривания кварца, некоторые поверхности полевого шпата локально сильно выветриваются (рис. 8, Е и F). Ямки выветривания призматические, диаметром от 1 до 5 мкм и глубиной более 1 мкм.

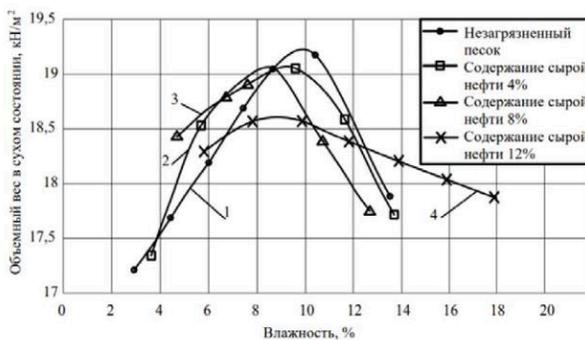
Известен ряд исследований изменения физических свойств песчаных грунтов в результате влияния нефтяных углеводородов.

Согласно исследованиям (Al-Sanad, 1995; Al-Adili, 2017; Бракоренко, 2011) содержание влаги, необходимое для достижения максимальной плотности скелета грунта, уменьшается при увеличении процентного содержания нефтепродукта в образце. Причиной этому является заполнение порового пространства (частично или полностью) между твердыми частицами нефтепродуктом, что в последствии приводит грунт в состояние несвязной породы (плывуна) в сравнении с незагрязненным грунтом.

При влиянии нефтепродуктов отмечается изменение влажности для достижения максимальной плотности скелета грунта. Это отражает смазывающий эффект, обусловленный наличием нефтяных углеводородов, которое облегчает уплотнение и уменьшает количество воды, необходимое для достижения максимальной плотности (рис. 9). Однако, чем больше содержание нефти, тем хуже характеристики уплотнения.



а)



б)

Рисунок 9. Зависимость плотности от влажности грунта при различных процентных содержаниях нефтяных углеводородов а) Al-Sanad (1995), б) Al-Adili (2017)

Это подтверждается и исследованием Hasan (2021), что песчаный грунт из-за пористости удерживает больше нефтепродуктов в пустотах, чем на поверхности частиц, которые не обеспечивают достаточное количество воды, необходимое грунту для достижения максимальной сухой плотности и максимального уплотнения. Содержание влаги, необходимое для достижения максимальной плотности в сухом состоянии, уменьшается при увеличении содержания сырой нефти. Содержание нефти частично заполнило межпоровые пространства и изменило состояние образцов песчаного грунта, превратив их в пористую среду по сравнению с незагрязненными грунтами (Hasan, 2021).

В исследовании (Дашко, Ланге, 2017) отмечают, что появление окисленных нефтяных углеводородов повышает гидрофильность песков и, соответственно, величину молекулярной влагоемкости (рис. 10). Нефтезагрязненные пески могут переходить в состояние пльвуна (в состоянии относительно связного грунта), влажность такого грунта будет расти с увеличением процентного содержания нефтепродукта в составе.

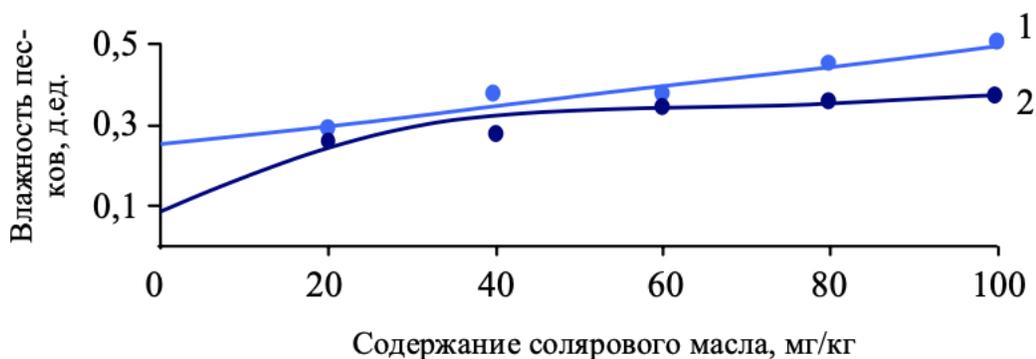


Рисунок 10. Изменение водоемкости $w_{п}$ (1) и максимальной молекулярной влагоемкости $w_{мм}$ (2) песков с различным содержанием солярового масла.

Также авторами отмечается уменьшение плотности скелета песчаного грунта от 1,65 до 1,3 г/см³ при увеличении содержания солярового масла от 0 до 100 мг/кг в предельно плотном сложении и от 1,4 до 1 г/см³ при увеличении содержания солярового масла от 0 до 100 мг/кг в рыхлом сложении (Дашко, Ланге, 2017).

При увеличении влажности грунта плотность его скелета будет уменьшаться, после того как будет достигнуто значение максимальной плотности грунта при его оптимальной влажности.

В исследовании Hasan (2021) было представлено снижение значений оптимальной влажности грунтов при загрязнении их различным процентным содержанием нефти. Этот

аспект также согласуется с результатами, полученными Zahermand (Zahermand и др., 2020), согласно которым в грунтах, загрязненных нефтью, образцы быстро приобретают максимальную плотность в сухом состоянии при более низком значении оптимальной влажности по сравнению с незагрязненными грунтами.

Еще одним свойством, подвергшееся изменению, является пористость грунта. Образование агрегатов способствует повышению общей пористости и размеров пор, что вызывает рост полной влагоемкости (способности грунта вмещать только воду) и коэффициента фильтрации песков (Дашко, Ланге, 2017).

В исследовании Al-Sanad (1995) изменение коэффициента пористости определялось с использованием разной по плотности сырой нефти при ее одинаковом процентном содержании в образце песчаного грунта. Испытания показали снижение пористости с 0,47 до 0,40 вне зависимости от вида загрязнителя в сравнении с образцом грунта, не загрязненного нефтью (рис. 11). Ijimdiya и Igboro (2012) также рассматривали влияние содержания нефти на коэффициент пористости. Величина пористости естественного грунта увеличилась с 0,34 до 0,36 при 2%-ном содержании нефти и нагрузке 0,05 МПа. Дальнейшее увеличение содержания нефти до 6% привело к снижению коэффициента пористости до минимального значения 0,23. Вероятной причиной первоначального увеличения коэффициента пористости при 2% содержании нефти могло быть значительное снижение процентного содержания мелких частиц, поскольку они связывались для образование более крупных агрегатов, которые создавали большие пустоты (Ijimdiya, Igboro, 2012).

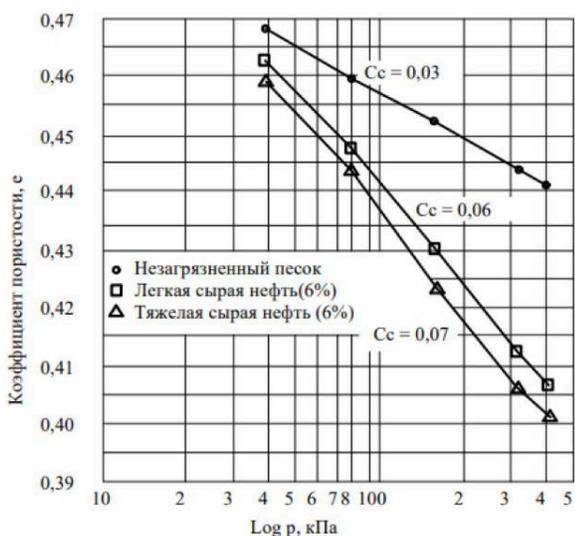


Рисунок 11. Зависимость коэффициента пористости грунта от приложенной нагрузки при разном виде загрязнителя (Al-Sanad, 1995)

В ряде исследований отмечается снижение водопроницаемости грунта при загрязнении нефтяными углеводородами. Так, согласно данным Shin, Das (Shin, Das, 2000), гидравлическая проводимость грунта, подвергшейся воздействию разливов нефти, имеет тенденцию к постоянному снижению прямо пропорционально концентрации сырой нефти в образцах грунта (Акрокодже, 2022). Исследование, проведенное Khamehchiyan, Charkhabi, Tajik (2007), показало, что проницаемость песчаных образцов снижается в случае присутствия сырой нефти. Проницаемость гранулированных грунтов зависит от пористости, формы, размера и зернистости заполнителей, и нефтяное загрязнение в основном снижает проницаемость песчаных грунтов.

В работе, посвященной этой теме (Chew, Lee, 2010) исследовали влияние разливов органической нефти на гидравлическую проводимость грунтов с крупнозернистыми частицами и сообщили, что гидравлическая проводимость грунтов снижается по мере увеличения количества нефти. Это объясняется тем, что пустоты в грунте заполняются органической нефтью, которые препятствуют свободному поступлению воды в грунт. Проникновение нефтяных углеводородов вместо воды приводит к заполнению промежутков между частицами грунта и закупориванию пор из-за высокой вязкости, а также к снижению общей пористости грунтов. Поскольку нефть имеет гораздо более высокую вязкость, чем вода, это снижает коэффициент проницаемости грунтов (Hasan, 2021).

Структура грунта состоит из физической структуры грунта и сил взаимодействия между частицами и поровой жидкостью. На механические силы влияют форма частиц и способ их размещения, а также природа частиц грунта. В связи с этим характеристики поровой жидкости, которая окружает частицы грунта, могут влиять на прочность грунта на сдвиг. Физико-химические эффекты в мелкозернистых грунтах, обусловленные типом минералов, из которых состоят частицы грунта, и электрохимическим взаимодействием этих минералов с окружающей частицы поровой жидкостью, образуют двойной слой (Ostovar, 2021).

Основываясь на литературных данных, происходят изменения параметров консолидации, вызванные нефтяными углеводородами (Al-Sanad и др., 1995, Ijimdiya 2013). Утверждается, что загрязнение углеводородами может снизить значение C_v .

Прочность грунта на сдвиг в модели Мора-Кулона зависит от угла трения и сцепления. Нефтяные загрязнители уменьшают угол трения и создают своего рода кажущееся сцепление в зернистых грунтах.

Evgin, Das (1992) изучали влияние загрязнения песчаного грунта под воздействием моторного масла и пришли к выводу, что угол трения загрязненного образца значительно уменьшается по сравнению с чистым образцом. Уменьшение угла трения загрязненного грунта может быть вызвано уменьшением сопротивления трению между частицами грунта, вызванным наличием достаточного количества нефтепродуктов в грунте.

Al-Sanad (1995) показал, что растекание сырой нефти снижает прочность на сдвиг и проницаемость загрязненного песка. Это незначительное снижение величины угла внутреннего трения приводит к резкому снижению несущей способности фундаментов мелкого заложения (рис.12).

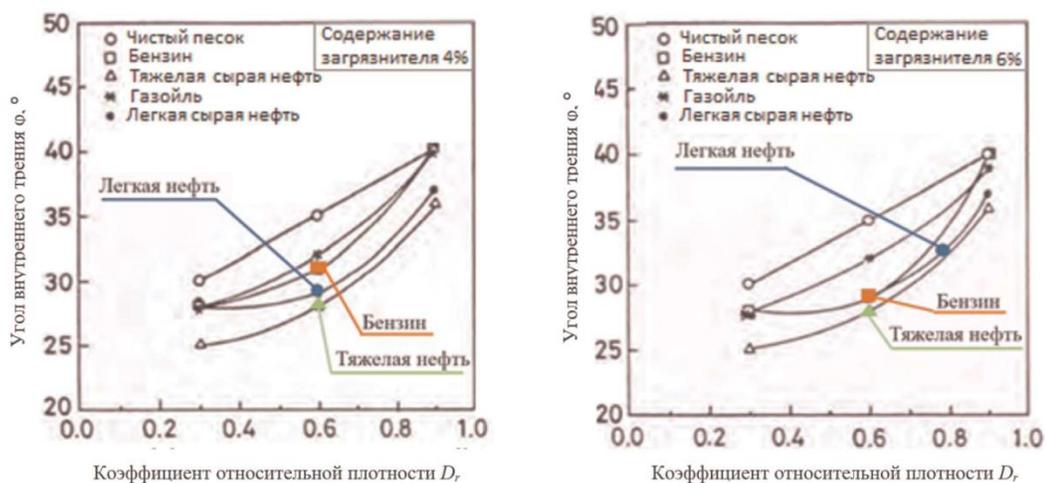


Рисунок 12. Изменение угла внутреннего трения в зависимости от коэффициента относительной плотности песчаного грунта и содержания нефтепродукта (Al-Sanad, 1995)

В статье (Perkins, 2000) исследуется влияние биопленки на механические свойства песка, показывающее незначительное влияние на прочность и жесткость, но увеличение деформации ползучести, зависящей от времени. Автор по результатам исследований пришел к выводу, что биопленка оказывает незначительное влияние на прочность и жесткость песка, но увеличивает зависящую от времени деформацию при ползучести. А также, что разница в предельной прочности на сдвиг между биопленочным и небипленочным песком очень мала. Повышенная деформация, наблюдаемая в образцах биопленки во время испытаний на срез, объясняется ползучестью.

Abouspina и др. (2015) исследовали влияние распределения легкой сырой нефти на механические и физические свойства мелкого песка, и результат показал, что при увеличении

содержания легкой сырой нефти до 1% сцепление улучшается из-за смачивания мелкозернистого песка нефтью, а затем уменьшается.

Результаты испытаний Ostovar (2021) на одноплоскостной срез песчаных грунтов различного состава показали, что угол внутреннего трения уменьшается во всех образцах в результате увеличения содержания сырой нефти. Прочность несвязных грунтов на сдвиг снижается с увеличением вязкости порового флюида. По сравнению с водой, сырая нефть с более высокой вязкостью окружает частицы грунта, которые могут легко скользить друг по другу и подвержены разрушению при сдвиге. Также для всех образцов песчаного грунта отмечается увеличение сцепления. Это сцепление может быть связано с вязкостью сырой нефти, которая превышает вязкость воды, что создает очевидное сцепление между частицами песка (Ostovar, 2021) (рис. 13).

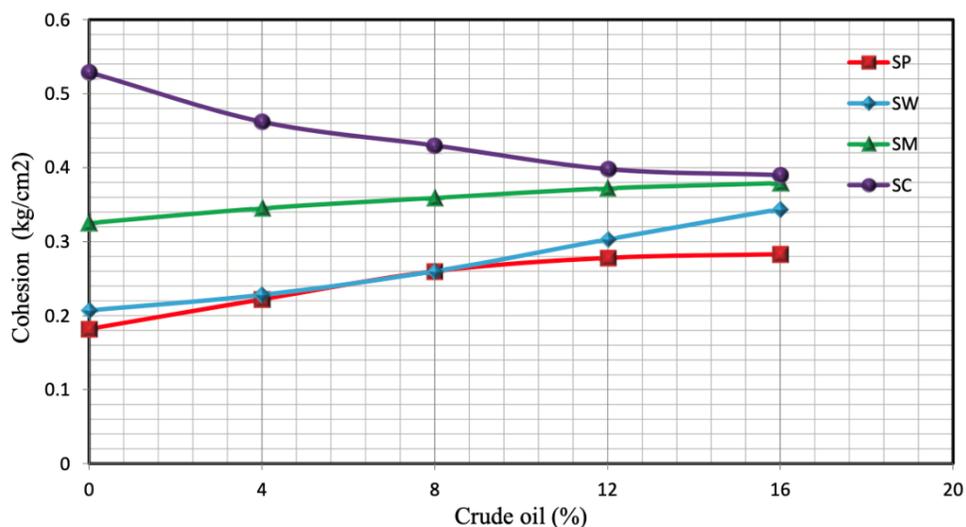


Рисунок 13. Влияние нефти на сцепление песчаных грунтов (Ostovar, 2021)

К деформационным характеристикам грунта принято относить коэффициент относительной сжимаемости m_v , коэффициент сжимаемости m_0 и модуль деформации. Однако обзор литературы оказал, что в большинстве лабораторных испытаний говорится о сжимаемости нефтезагрязненных грунтов в целом.

В исследовании проводились модельные испытания нефтезагрязненного песка, используемого в качестве основания столбчатого фундамента. В результате испытаний сжимаемость, а следовательно, модуль деформации загрязненного грунта уменьшились как при первичном его загрязнении на 1,3%, так и при последующем увеличении концентрации до 4,2 % (Shin, 1999).

В аналогичном исследовании Karkush, Kareem (2017) пришли к выводу, что присутствие 20% мазута в грунте снижает сжимаемость почти на 29%. Снижение значений было объяснено ослаблением связей между частицами из-за присутствия мазута (Karkush, Kareem, 2017).

Более того, в некоторых случаях (Ijimdiya, 2013), по мере увеличения количества углеводородов, модуль деформации сначала постепенно увеличивался, а затем умеренно снижался до более низких значений по сравнению с чистыми грунтами.

Влияние нефтяных углеводородов на одни и те же показатели, характеризующие состав, строение и свойства грунтов отличается у разных исследований на количественном и качественном уровнях.

В результате обзора исследований можно сделать выводы, что исходя из микроструктурных характеристик, присутствие углеводородных соединений в грунте может значительно ослабить шероховатость поверхности частиц, тем самым облегчая скольжение между ними. С другой стороны, загрязнение углеводородами может привести к химическому выветриванию минеральных частиц. Также загрязнение углеводородами способствует агрегированию частиц песчаных грунтов, одновременно может привести к обратному эффекту в глинистых грунтах.

Во многих опубликованных статьях утверждается, что коэффициент проницаемости грунтов постепенно снижается в результате добавления углеводородных загрязнений. Коэффициент сжатия увеличивается согласно исследованиям. Причинами этого увеличения являются изменение структуры грунта, уменьшение сцепления между частицами, увеличение пустот, снижение трения между частицами из-за смазывающего действия масляных наполнителей и уменьшение удельной поверхности.

В соответствии с общим обзором полученных данных, касающихся угла внутреннего трения и сцепления загрязненных углеводородами грунтов, можно утверждать, что добавление углеводородных соединений, вероятно, может уменьшить угол внутреннего трения в результате изменения соотношения инертных частиц и структуры грунта. В то время как нефтяные загрязнители могут либо снижать, либо усиливать сцепление грунтов.

Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА, СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЗУТОМ

2.1 Постановка экспериментальных исследований

В области загрязнения мазутом были пробурены 4 скважины глубиной до 5 м с отбором проб через каждый метр по глубине (5 проб из 1 скважины), с целью определения распространения загрязнения в плане и разрезе. Для отобранных образцов грунтов определялись следующие показатели: рН, нефтепродукты, кремнекислота и органическое вещество (гумус).

Также были пройдены два шурфа сечением 1,25 м² глубиной до 1,5-2,0 м с отбором образцов грунтов по глубине через каждые 0,25-0,5 м с целью определения их физических, физико-механических свойств и водопроницаемости. Образцы грунта одного из шурфов, пройденного вне зоны мазутного загрязнения, были отобраны в качестве фоновых для последующих лабораторных исследований их свойств, в сравнении с загрязненными образцами.

Плотность сложения грунтов определялась методом режущего кольца в шурфах. Физико-механические свойства – параметры сопротивления сдвигу при длительных испытаниях, а также параметры консолидации определялись для образцов естественной плотности и влажности в зоне мазутного загрязнения, а также за его пределами (получение фоновых значений). Кроме того, указанные параметры физико-механических свойств были получены для образцов с заданными значениями коэффициента пористости и естественной влажности для образцов зоны мазутного загрязнения и после прокаливании тех же образцов.

Помимо отбора проб грунтов был произведен отбор пробы поверхностной воды из ближайшего водоема.

Также были проведены исследования в ресурсном центре микроскопии и микроанализа научного парка СПбГУ с целью изучения микроструктуры песчаного грунта с помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ3000 и поляризационного микроскопа Leica DM4500P, а также анализ флуоресценции нефтяных углеводородов с помощью конфокального лазерного микроскопа Leica TCS SPE.

2.2 Методика изучения физических и физико-механических свойств песков

Гранулометрический состав и физические свойства песков определены в соответствии ГОСТ 12536-2014 и ГОСТ 5180-2015. Гранулометрический (зерновой) состав грунтов определялся по весовому содержанию в нем частиц различной крупности, выраженное в процентах по отношению к весу сухой пробы грунта, взятой для анализа. Для определения

гранулометрического состава грунтов были взяты образцы в воздушно-сухом состоянии, растертые в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником.

Согласно ГОСТ 5180-2015 «Методы лабораторного определения физических характеристик» были определены следующие характеристики: влажность (W , %), плотность (ρ , г/см³), плотность скелета и частиц грунта (ρ_d и ρ_s , г/см³). Расчетные значения, такие как пористость (n , %), коэффициент пористости (e , б.р.) были вычислены в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». В испытаниях физико-механических свойств и водопроницаемости для исследуемых песков задавался коэффициент пористости, характерный для песков пылеватых средней плотности. Определение плотности песков в естественном залегании проводилось методом режущего кольца в ходе шурфования, путем вырезания из целика в заранее подготовленное кольцо-пробоотборник. Кольцо с грунтом упаковывают для доставки в лабораторию и последующего взвешивания и расчета плотности грунта с точностью 0,01 г/см³.

Прочностные свойства песков определялись методом одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020. Для работы использовалось оборудование ООО «НПП«Геотек», компьютеризированный комплекс «АСИС».

Прочность песчаных грунтов (при испытании в сдвиговых приборах) характеризуется их сопротивлением сдвигу в условиях плоского напряженного состояния. Показателями такого сопротивления служат угол внутреннего трения (φ) и сцепления (c), которые являются параметрами уравнения равновесия Кулона: $\tau = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c$, где σ_n , τ – нормальные и касательные напряжения в плоскости сдвига. При отсутствии структурных связей между частицами, угол внутреннего трения зависит от состава грунта, формы и размера слагающих частиц, от их плотности и упаковки.

Прочность – способность грунтов сопротивляться хрупкому разрушению или способности грунта неограниченно деформироваться.

Сопротивление грунта срезу (сдвигу) определяется как предельное среднее касательное напряжение, при котором образец грунта срезается по фиксированной плоскости при заданном нормальном напряжении σ_n . Для определения частных значений φ и C проведено не менее трех испытаний идентичных образцов при различных значениях нормального напряжения.

Сдвиг проводился по схеме консолидировано-дренированных длительных испытаний на образцах песка природной влажности и природной плотности, а также для пылеватых песков с заданными значениями их плотности сложения и влажности для проб отобранных в зоне мазутного загрязнения и за ее пределами. По виду приложения сдвигающей нагрузки испытание проводилось в статическом режиме (возрастание нагрузки ступенями). После завершения

предварительного уплотнения образцов при нормальных давлениях 0,1, 0,2, 0,3 МПа (ступени давления при предварительном уплотнении 0,05 – 0,1 МПа) проводилось испытание на сдвиг при тех же нормальных давлениях, при которых происходило уплотнение. Сдвигающая нагрузка передавалась ступенями по 5% от значения нормальной нагрузки, при которой проводился сдвиг. Критерием завершения ступени нагружения является достижение скорости деформации среза, не превышающее 0,01 мм/мин.

Компрессионный модуль деформации определялся в соответствии с ГОСТ 12248.4-2020. При компрессионных испытаниях нагружение образца проводят путем ступенчатого нагружения статической нагрузкой. Ступени нагрузки прикладывают равномерно, без ударов. После проведения испытаний и построения компрессионной кривой находится коэффициент сжимаемости грунта m_o , модуль деформации E_{oed} .

Параметры консолидации грунтов определялись в компрессионных приборах «АСИС» согласно ГОСТ 12248.4-2020. Характеристики определялись по результатам испытаний образцов грунта в компрессионных приборах (одометрах), исключающих возможность бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой. Консолидационные испытания проведены для определения коэффициентов фильтрационной и вторичной консолидации c_v и c_α соответственно при нагрузке 0,1 МПа. Для испытания создавались образцы песка, отобранные из зоны мазутного загрязнения, при коэффициенте пористости, характерном для пылеватых песков средней плотности, при естественной влажности в условиях полного водонасыщения. Вторая серия испытаний проводилась для песков с теми же параметрами физических свойств, но после прокаливании с целью определения роли загрязнения в формировании деформационных свойств.

По результатам консолидационных испытаний определяют зависимость деформации от времени при фиксированном значении нагрузки (ГОСТ 12247.4-2020).

Водная вытяжка и определение водородного показателя проводилась в соответствии с ГОСТ 26423-85 – ГОСТ 26428-85 «Почвы. Методы определения катионно-анионного состава водной вытяжки» по образцам нарушенной структуры для определения физических и химических свойств грунтов, залегающих выше уровня подземных вод в области взаимодействия с проектируемыми сооружениями. Коэффициент фильтрации грунтов определялся лабораторно согласно ГОСТ 25584-2016 для песков из образцов нарушенной структуры при заданной плотности сложения до и после прокаливании.

Прокаливание образцов пылеватых песков проводилось в соответствии ГОСТ 23740-2016.

Для изучения морфологии песка проводился микроскопический анализ с использованием поляризационного микроскопа Leica DM4500P, снабженного цифровой камерой Leica DFC 495 при 5- и 10- кратном увеличении объектива.

Для определения микроструктуры песчаных грунтов использовалась сканирующая электронная микроскопия. Настольный растровый электронный микроскоп- микроанализатор TM 3000 (НИТАСНИ, Япония, 2010) оснащен приставкой энерго-дисперсионного микроанализа OXFORD. Микроскоп предназначен для получения изображения объекта с высоким пространственным разрешением. Метод основан на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым объектом, что позволяет работать в диапазоне увеличений от 40х до 10 000х. Для зондирования поверхности используется сканирование по ней сфокусированного пучка электронов. Для формирования изображения используется детектирование различных сигналов, включая вторичные электроны, обратно рассеянные электроны, рентгеновское излучение и ток через образец.

Также исследования проводились на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе фирмы Leica (LSCM) Leica SPE. Это конфокальная система точечного сканирования со спектральным детектором для флуоресцентной регистрации пространственной структуры живых и фиксированных объектов. В качестве источника возбуждения флуоресценции в микроскопе используется лазер 405 нм, являющийся источником возбуждающего света, близким к оптимальному для исследуемых объектов. В отличие от обычного флуоресцентного микроскопа, в лазерном сканирующем конфокальном микроскопе изображение формируется последовательно точка за точкой путем сканирования заданной рамки в заданной плоскости, яркость флуоресценции в этих точках регистрируется фотоумножителем, посылается на вход аналого-цифрового преобразователя, оцифровывается и записывается в память компьютера в виде пикселей различной яркости, т.е. создается оптический срез (Тугарова и др., 2012). Метод конфокальной микроскопии находит широкое применение в области биологии, медицины, биофизики, молекулярной и клеточной биологии. Он позволяет исследовать ткани на клеточном уровне в состоянии физиологической жизнедеятельности.

Глава 3. ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЗУТОМ НА СВОЙСТВА ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В МАССИВЕ

3.1 Характеристика инженерно-геологических условий района работ

Исследования проводились на образцах грунтов, представленных КТПИ «Газпроект» и полученных в ходе инженерно-геологических изысканий по объекту в республике Карелия, Сортавальский район.

Географическое положение работ. Рассматриваемая территория расположена на северном берегу Ладожского озера в границах Сортавальского муниципального района и граничит с Лахденпохским, Питкярантским, Суоярвским районами и Государством Финляндией.

Геоморфология и рельеф. Основные черты современного рельефа сформированы ледниковой аккумуляцией, наложенной на древние морфоструктуры кристаллического фундамента. В результате образовался покровный холмисто-моренный ландшафт, ориентированный по направлению движения ледникового потока. Все линейно вытянутые понижения имеют меридиональное направление и, как правило, заболочены.

Почвенный покров. Район изысканий расположен в подзоне средней тайги, для которой характерно развитие лесов еловой формаций. Наиболее распространенными, произрастающими в районе участка изысканий, типами лесов еловой формации является ельник болотно-травяной и ельник черничный скальный. В пределах района изысканий преобладают подзолы иллювиально-гумусово-железистые в сочетании с болотными торфяными.

Гидрография. Территория района изысканий имеет хорошо развитую гидрографическую сеть, принадлежащую бассейну Ладожского озера. Густота ее составляет 0,53 км/км². Речная сеть района отличается молодостью, и находится в стадии развития.

На территории района протекают реки Янисйоки, Юуванйоки, ручей Рюосинийоки, озеро Янисъярви, а также гидрографическая сеть представлена множеством ручьев без названия.

Климатические условия. Климат рассматриваемой территории мягкий умеренно-континентальный. Лето прохладное и непродолжительное. Средняя температура июля составляет 17,2°С. Зимы мягкие и длительные. Средняя температура января составляет минус 8,4°С. Однако в отдельные годы может фиксироваться температура до 30°С летом и до минус 40°С зимой; осадков – до 600 мм в год.

Геологическое строение. Республика Карелия расположена в пределах восточной части Балтийского щита.

Согласно схеме тектонического районирования, территория относится к северо-ладожской перикратонной зоне складчато-надвиговой структуре, приурочена к раннепротерозойскому геодинамическому комплексу сложенными формациями переотложенных кор выветривания флишеидных образований (Геологическая карта листа Р-36-ХІІІ).

В геологическом строении участка работ в пределах глубины исследования до 10.0 м принимают участие следующие генетические типы четвертичных и коренных пород. Согласно данным геологических карт с общей характеристикой условий территории масштаба 1:1000000 (третье поколение). Балтийская серия. Лист Р-(35),36 (Петрозаводск) и материалов комплексных инженерных изысканий геологическое строение территории (сверху-вниз) представлено современными техногенными (tIV) и биогенными (pIH) отложениями, верхнечетвертичными озерно-ледниковыми (lgIII) и ледниковыми отложениями (gkIII), подстилаемые породами протерозойского возраста (PR).

Четвертичная система.

Голоцен.

tIV – Техногенные отложения. Земляное полотно и насыпной грунт, сложенный перелопаченной супесью.

pIH – Биогенные отложения. Торф верхового типа и почва подзолистая.

Плейстоцен.

Верхнее звено.

lgIII – Озерно-ледниковые отложения. Супеси и суглинки пылеватые от пластичных до текучих, пески пылеватые, мелкие, гравелистые средней плотности.

gIII – Ледниковые отложения. Супеси пылеватые пластичной и твердой консистенции с включениями гравия и гальки до 20% и валунов до 10%.

eIII – Элювиальные отложения. Щебенистый грунт крупнообломочный неокатанный с содержанием глыбового материала до 10%.

Протерозойская акротема.

Нижнепротерозойская эонотема.

Верхний карелий.

yKR₂²m – граниты прочные среднезернистые.

Ладожская серия.

KR₂²ld² – метаморфизованные алевролиты и сланцы, ритмичное переслаивание.

KR₂²ld¹ – кварциты, кварцевые песчаники, гравелиты, редко метаэффузивы, биотитовые сланцы.

vβKR₂¹k – габбродолериты и плагиограниты.

Архейская акротема.

Верхнеархейская зонотема.

Средний лопий.

mpySM-LP₂ – магнетит-плагиограниты, гнейсоплагиограниты, реже гнейсограниты.

Характерная особенность геологического строения дочетвертичных пород связана с неровной на коротких расстояниях, часто со значительным уклоном поверхность кровли, что главным образом обусловлено многочисленными трудноопределимыми при изысканиях дизъюнктивными разрывными нарушениями по типу сброс, взброс, горст и грабен, определяющие зоны повышенной трещиноватости; наличие карманов выветривания в коренных породах, сложенных элювиальными крупнообломочными отложениями. Отмечается изменчивость мощности, свойств и глубин залегания моренных отложений, незакономерное и часто высокое содержание крупных включений (валунов до 70-80%), линз водонасыщенного песка и гравийно-галечных грунтов, обладающих местным напором.

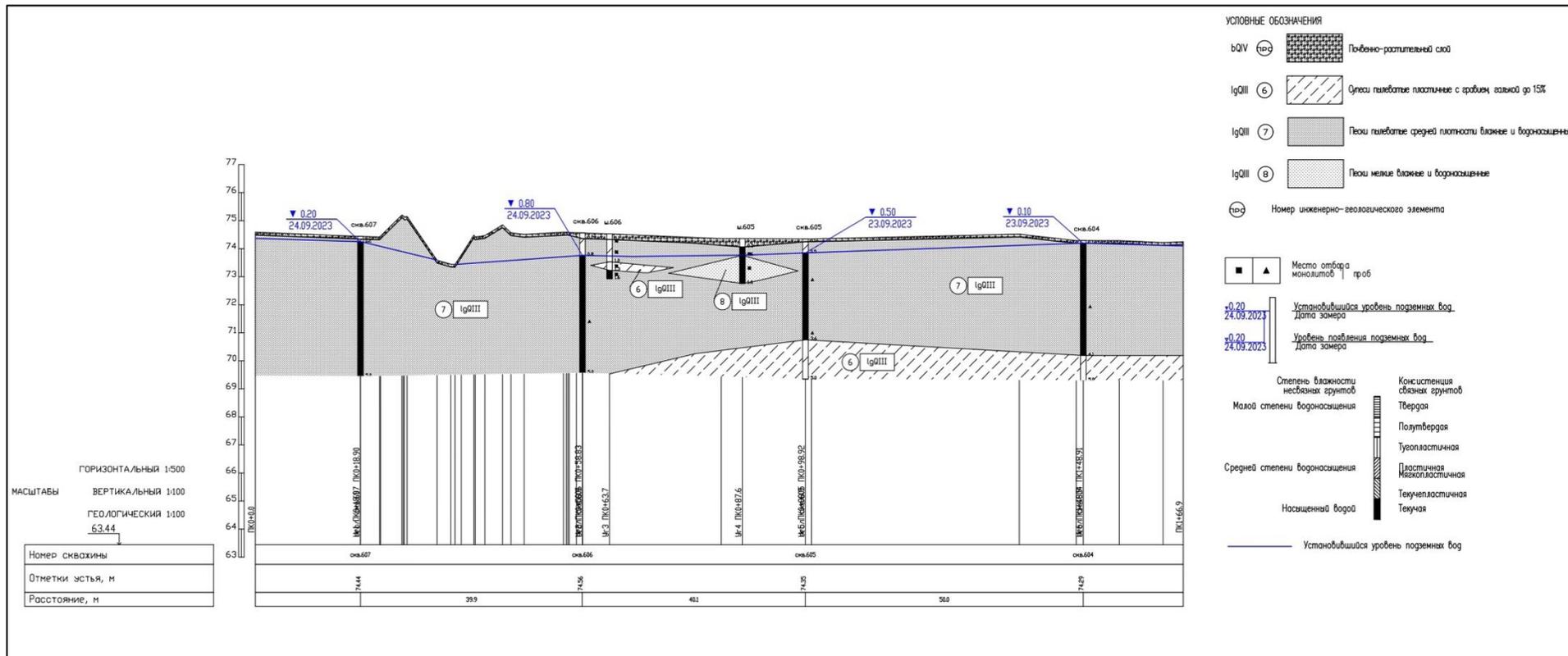


Рисунок 14. Инженерно-геологический разрез участка исследования

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

-  ск.б.604 номер инженерно-геологической скважины
-  Ш.605 номер шурфа
-  линия разреза и его номер
-  трасса проектируемого МТГ

122°36'00"
38°49'00"



Рисунок 15. Карта фактического материала

Техногенное воздействие. По результатам маршрутного обследования территории изысканий было выявлено место разлива нефтепродуктов на рельеф местности северо-восточнее проходящей вблизи исследуемого участка железной дороги.

Причиной появления на участке мазута является его утечка из цистерны, предназначенной для хранения ГСМ рис. 16. Таким образом, прилегающие территории оказались под возможным воздействием загрязнителей.



Рисунок 16. Внешний вид цистерны (2023)

Схема участка загрязнения представлена на рис. 17.



Рисунок 17. Схема расположения области возможного загрязнения нефтепродуктами и точек отбора проб

Вблизи цистерны также можно наблюдать небольшие пруды, наполненные мазутом (рис.18).



Рисунок 18. Пруды с мазутом

По результатам опроса местного населения проблема мазутного загрязнения рассматриваемой территории берет свое начало в 90-е годы XX века, когда наблюдался несанкционированный сброс мазута в районе железной дороги, котельной метизного завода. Впоследствии, около 8-9 лет назад, была вырыта канава для стока разлившегося мазута на юго-запад в направлении р. Юуваньоки (рис. 19).



Рисунок 19. Канава с мазутом

Сложность ситуации заключается в том, что каждый год, во время весенних паводков, вода из этой канавы разливается на близлежащие территории, что приводит к ежегодному дополнительному загрязнению рассматриваемых территорий.

3.2 Особенности формирования свойств природных песчаных грунтов

Основным фактором формирования рельефа и грунтов Карелии стала деятельность ледников в плейстоцене. Движение ледников привело к накоплению моренных отложений, включая пески, гравий и валуны.

После отступления ледников образовались многочисленные озера, где происходило переотложение и сортировка ледниковых отложений. В результате озерно-ледниковые отложения входят в состав группы водно-ледниковых образований и являются осадками озер, которые питались талыми водами ледника. Среди них обособляются отложения приледниковых и внутриледниковых озер.

Приледниковые озерно-ледниковые отложения широко развиты в Северном Приладожье, в Прионежье и Заонежье.

В литологическом отношении они представлены комплексом взаимнопереслаивающихся песков, супесей, суглинков и глин. Мощность этого комплекса изменяется от долей метра до 20-25 м и более.

Грунты описываемого комплекса залегают на размытой поверхности морены (Олонецкий, Пудожский районы), либо на скальных породах докембрия (Питкяранский, Лахденпохский районы, г. Сортавала). Иногда они залегают на маломощных пластах валунно-галечно-гравийных пород, оставшихся на месте полностью размытой морены (Левкин, 2002).

Песчаные грунты имеют подчиненное развитие, но на отдельных участках они играют существенную роль. Например, в пос. Харлу, г. Сортавала под ленточными глинами залегают слой мощностью до 4,0 м. В г. Лахденпохья 2–5-метровый слой песка венчает толщу глин и суглинков (Серба, 1975). На территории исследования распространена мощная толща песков до 5 м, перекрывающих отложения ледникового генезиса. Пески обычно пылеватые, реже мелкие, серого, желтовато-серого цвета, с пятнами более темной окраски (Левкин, 2002).

По гранулометрическому составу озерно-ледниковые отложения относятся к чрезвычайно неоднородным грунтам. В составе пылеватых песков и глинистых грунтов преобладающей фракцией является фракция пыли, содержание которой превышает содержание песчаных фракций. Так, содержание пыли колеблется в среднем от 44,7% в глинах до 72,4% в супесях и 58,8% в пылеватых песках. Содержание фракции песка составляет лишь от 6,8% в глинах до 15,1% в супесях и 38,3% в пылеватых песках (Левкин, 2002).

Минеральный состав озерно-ледниковых отложений характеризуется следующими данными. Песчаная фракция состоит в основном из кварца (80% массы), полевых шпатов (18% массы), в небольшом количестве присутствуют амфиболы и пироксены (до 2%) и т.д.

Пылеватая фракция представлена кварцем (86 %), в небольшом количестве могут присутствовать слюды, главным образом биотит, встречаются карбонаты.

Неоднородность гранулометрического состава песков приледниковых отложений определяет высокую неоднородность их свойств. Характерной особенностью песков является высокая влажность (в среднем 21–22 %). Пески часто насыщены водой. Плотность твердых частиц колеблется незначительно, что обусловлено близостью минерального состава, и составляет 2,65–2,7 г/см³. Плотность грунта колеблется в широких пределах: от 1,48 до 2,15 г/см³. Эти грунты обладают высокой пористостью – до 46 %, но чаще она составляет 38–42 %.

Угол внутреннего трения варьирует в широких пределах: 27–35°. Модуль деформации составляет 10–30 МПа. Однако у средне- и крупнозернистых песков, встречающихся в краевых частях приледниковых озерных бассейнов, он может достигать 50 МПа [4]. Модуль общей деформации песков Карелии и запада Кольского полуострова, по данным опытных нагрузок на штампы, находится в пределах 30–35 МПа, по результатам статистического зондирования в пределах 15–27 МПа. Результаты динамического зондирования указывают на большую неоднородность песков по сжимаемости, но модуль общей деформации всех разностей песков, встречаемых в разрезе, как правило, не ниже 15 МПа. Значения угла внутреннего трения у песков оцениваются по данным статического и динамического зондирования в 33–35° (Андреева и др., 2018).

Приледниковые пески, если мощность их равна или превышает мощность активной зоны возводимого здания или сооружения, или они залегают на более прочных породах (морене, скальных грунтах), могут служить более или менее надежным основанием. Необходимо учитывать, что в толще песков часто встречаются прослойки, линзы, пятна глинистых грунтов, что при высоких содержаниях пылеватых фракций и высокой влажности при полном водонасыщении, характеризует описываемые песчаные грунты как сильнопучинистые. Зачастую грунты характеризуются достаточно высокой сжимаемостью и тиксотропией. При полном водонасыщении и при нарушенном сложении эти пески могут проявлять плавунные свойства (Серба, 1975).

3.3 Изменение показателей свойств песчаных грунтов в условиях их длительного загрязнения мазутом в массиве

В результате лабораторных испытаний по полученному гранулометрическому составу и физическим свойствам, исследуемый песчаный грунт классифицируется преимущественно как песок пылеватый средней плотности влажный и водонасыщенный ниже уровня грунтовых вод, а также в ш.605 на глубине 1,0- 1,1 – песок мелкий средней плотности водонасыщенный.

По результатам лабораторных исследований грунтов, отобранных в скважинах, было установлено отсутствие превышений ПДК по исследуемым показателям, локальные превышения над фоновыми уровнями обнаружены в пробах скважины №606 (табл.5), пройденной в зоне непосредственно мазутного разлива на поверхности.

Таблица 5. Результаты лабораторных исследований дополнительных проб грунтов и донных отложений области возможного загрязнения нефтепродуктами

№ пробы	№ скважины	Интервал глубины, м	pH	НП, мг/кг	Кремнекислота, мг/л	ОВ (гумус), %
458-Э	604	0,8-1,0	5,5	15	2,5	1,2
459-Э	604	1,8-2,0	5,7	13	3,4	1,0
460-Э	604	2,8-3,0	5,7	12	5,8	0,9
461-Э	604	3,8-4,0	5,6	11	2,6	0,7
462-Э	604	4,8-5,0	5,6	12	3,0	0,6
463-Э	605	0,8-1,0	5,5	14	2,5	1,2
464-Э	605	1,8-2,0	5,7	14	3,7	0,9
465-Э	605	2,8-3,0	5,8	13	8,2	0,7
466-Э	605	3,8-4,0	5,3	12	3,9	0,6
467-Э	605	4,8-5,0	5,5	10	1,9	0,5
468-Э	606	0,8-1,0	5,6	20	3,2	1,1
469-Э	606	1,8-2,0	5,9	170	3,8	0,8
470-Э	606	2,8-3,0	6,0	200	3,9	0,6
471-Э	606	3,8-4,0	5,7	90	3,1	0,4
472-Э	606	4,8-5,0	5,6	61	3,1	0,3
473-Э	607	0,8-1,0	5,7	14	2,9	0,6
474-Э	607	1,8-2,0	6,2	15	2,6	0,5
475-Э	607	2,8-3,0	5,6	12	2,3	0,4
476-Э	607	3,8-4,0	5,7	11	3,3	0,3
477-Э	607	4,8-5,0	6,2	10	4,7	0,2
478-Э	ДО1	0,0-0,3	6,0	18	2,0	1,2
479-Э	ДО2	0,0-0,3	4,8	29	3,7	1,2
480-Э	ДО3	0,0-0,3	5,0	150	2,1	1,2

Содержание нефтепродуктов в интервале 10-15 мг/кг прослеживается в грунтах по глубине разреза в пределах скважин 604, 605, 607, в зоне отсутствия следов мазутного загрязнения на поверхности земли, когда как в скважине 606 – в зоне разлива мазута наблюдается характерное изменение содержания НП продуктов по глубине: от 20 мг/кг в подпочвенных слоях на глубине залегания уровня грунтовых вод, до 170-200 мг/кг в интервале 1,8-3,0 м, с плавным снижением до 60 мг/кг на глубине 5 м (рис.20).

Скважина скв.606

Начато-окончено: 24.09.2023

Абс. отметка устья: 74.6м

Общая глубина: 5.0м

Масштаб 1 : 100

№ слоя п/п	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абсолютная отметка подошвы слоя, м	ИГЭ	Литологический разрез	Глубина отбора образцов	Наименование грунта	Сведения о воде	
		от	до							появление воды	установ. уровень
1		0.0	0.2	0.2	74.4	прс		Почвенно-растительный слой	0.8	0.8	
2		0.2	0.6	0.6	73.8	7		Пески пылеватые средней плотности влажные и водонасыщенные			
3		0.8	5.0	4.2	69.6	7		Пески пылеватые средней плотности влажные и водонасыщенные			

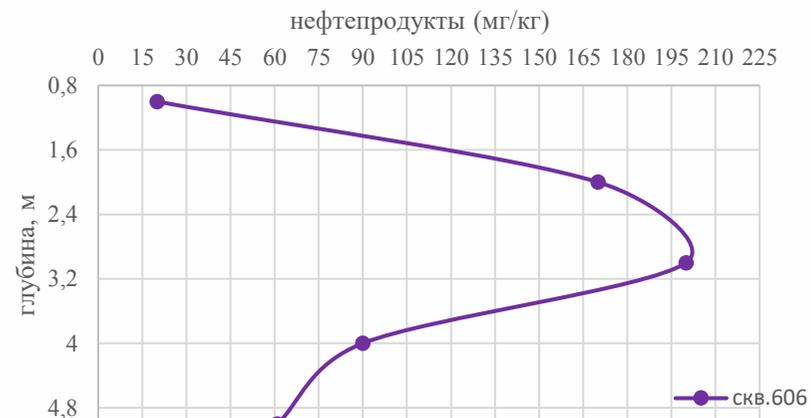


Рисунок 20. График зависимости содержания НП по глубине в скважине 606

Установленное закономерное изменение содержания нефтепродуктов по глубине позволяет зафиксировать зону их максимальной локализации в грунтах разреза и связанную с ней область наибольших изменений состояния и свойств грунтов. Поступление мазутного загрязнения из верхних горизонтов почв и поверхности земли как наиболее тяжелых углеводородов, связано с их медленным опусканием к подошве водоносного горизонта и возможного роста подвижности за счет их столь же медленного окисления, распространение по площади под действием естественного градиента фильтрационного потока. Изучение механизмов миграции мазута, скорости распространения, возможностей его деградации и роста подвижности в существующих природных условиях в массиве рассматривается важной частью последующих работ, и не раскрывается в данной работе.

Содержание кремниевой кислоты указывает на активизацию процессов физико-химического и биохимического выветривания минеральной составляющей грунтов, однако отсутствие всплесков роста в скважине 606 не позволяют указать на активизацию этого процесса вследствие влияния мазутного загрязнения.

По водородному показателю рН все природные песчаные грунты имеют слабокислую среду.

Увеличение концентрации НП в пробах донных отложений от точки отбора ДО1 к точке отбора ДО3, говорит о наличии источника незначительного загрязнения донных отложений р. Юванйюки выше по течению и не относящемуся к исследуемому разливу нефтепродуктов. Таким образом, исходя из полученных результатов и уклона местности и изменения абсолютных отметок земной поверхности, можно сделать вывод, что загрязнение нефтепродуктами от исследуемого источника не распространяется в воды р. Юванйюки. Помимо опробования грунтов был произведен отбор пробы поверхностной воды из протекающей рядом р. Юванйюки (табл.6).

Таблица 6. Результаты лабораторных исследований пробы поверхностной воды области загрязнения нефтепродуктами

Определяемый показатель		Номер пробы	ПДК*	НД на метод анализа
		45-Э		
Нефтепродукты	X, мг/дм ³	3,1	0,1	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98
	±δ, %	25		
Сухой остаток	X, мг/дм ³	308	1000	ПНД Ф 14.1:2:4.114-97
	±δ, %	9		
ХПК	X, мг/дм ³	<4	15	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97
	±δ, %	-		
БПК ₅	X, мг/дм ³	2,3	2,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97
	±δ, %	14		
Взвешенные вещества	X, мг/дм ³	2100	5	ПНД Ф 14.1:2:3.110-97
	±δ, %	10		
Растворенный кислород	X, мг/дм ³	4,1	4,0	ПНД Ф 14.1:2:3.101-97
	±δ, %	14		
* подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования				
- установленные превышения ПДК.				

По результатам лабораторных исследований установлено значительные превышения ПДК для нефтепродуктов в 31 раз и для взвешенных веществ в 420 раз относительно установленных нормативов.

Исследования прочностных свойств песков пылеватых производились в приборах АСИС на образцах нарушенного сложения при естественной плотности сложения и влажности по системе консолидировано-дренированного среза, в соответствии с ГОСТ 12248-2010 (табл.7).

Для каждой пробы песка пылеватого было выполнено по три испытания с вертикальным напряжением: 0,100 МПа, 0,200 МПа и 0,300 МПа, и прикладываемой касательной нагрузкой, вызывающей деформацию до тех пор, пока образцы не разрушались.

Таблица 7. Результаты определения физико-механических свойств пылеватых песков в естественном сложении.

№ скважины	Глубина отбора, м	Плотность частиц, г/см ³	Коэффициент пористости, д.ед.	Плотность грунта, г/см ³	Природная влажность (д.ед.)	C, МПа	φ, градусы
Ш.605	0,5-0,6	2,66	0,626	2,02	0,235	0,045	28
Ш.605	1,0-1,1	2,65	0,586	2,00	0,197	0,022	36
Ш.606	0,2-0,3	2,66	1,035	1,71	0,308	0,028	21
Ш.606	0,6-0,7	2,66	0,575	2,05	0,214	0,015	31
Ш.606	1,4-1,5	2,66	0,722	1,96	0,269	0,024	27

Таблица 8. Результаты испытаний пылеватых песков естественного сложения в условиях одноплоскостного среза

Норм. напр, МПа	Ш. 605 гл. 0,5-0,6	Ш. 605 гл. 1,0-1,1	Ш. 606 гл. 0,2-0,3	Ш. 606 гл. 0,6-0,7	Ш.606 гл. 1,4-1,5
	Касат. напр. МПа	Касат. напр. МПа	Касат. напр. МПа	Касат. напр. МПа	Касат. напр. МПа
0,1	0,103	0,093	0,058	0,08	0,073
0,2	0,149	0,172	0,12	0,127	0,133
0,3	0,211	0,237	0,134	0,199	0,176

По результатам испытаний были построены диаграммы сопротивления сдвигу, определены параметры прочности исследуемых песков (сцепление C, МПа и угол внутреннего трения φ (град.)) (рис.21).

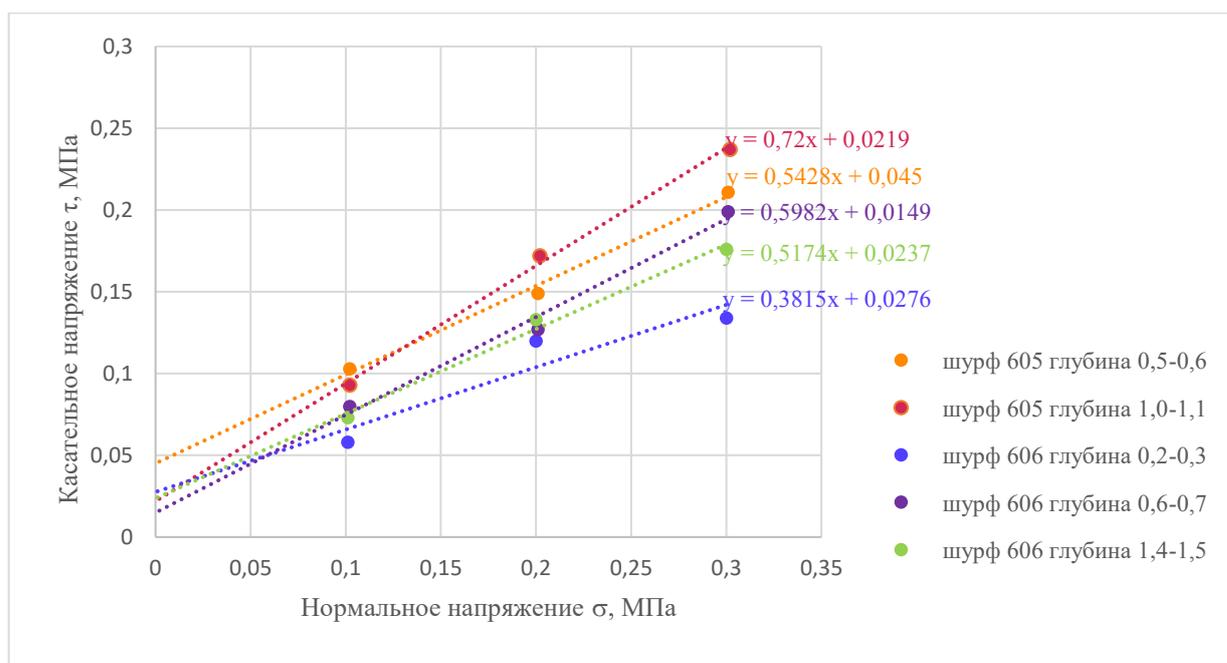


Рисунок 21. Диаграммы сопротивления сдвигу для образцов пылеватого песка естественной плотности и влажности от вертикального давления (ш.605 – чистый образец песка, ш.606 – загрязненный образец)

Как видно на диаграмме отмечается снижение прочностных характеристик загрязненных нефтяными углеводородами грунтов (уменьшение угла внутреннего трения и сцепления). Значения угла внутреннего трения в образце чистого грунта составляет 36° , $c = 0,022$ МПа (гл.1,0-1,1м), а значение в загрязнённой пробе (на гл. 0,6-0,7 м) – 31° , $c = 0,015$ МПа. Однако в загрязненной пробе на глубине 1,4-1,5 м, с ростом содержание НП сцепление несколько возросло, и составило 0,024 МПа, а угол внутреннего трения при этом снизился 27° . Можно отметить, что сцепление в загрязненных грунтах увеличивается (самое высокое в пробе 0,2-0,3м), что связано с формированием пленок мазута на поверхности частиц, при этом происходит снижение угла внутреннего трения. Можно сделать вывод о том, что содержание мазута создает дополнительные связующие силы между частицами песка, увеличивая их сцепление, но также в результате образования смазочного слоя мазута снижается трение между частицами в процессе сдвига.

При изучении прочности песков внимание уделялось характеру деформации и ее продолжительности при различных нормальных напряжениях, действующих в ходе испытания.

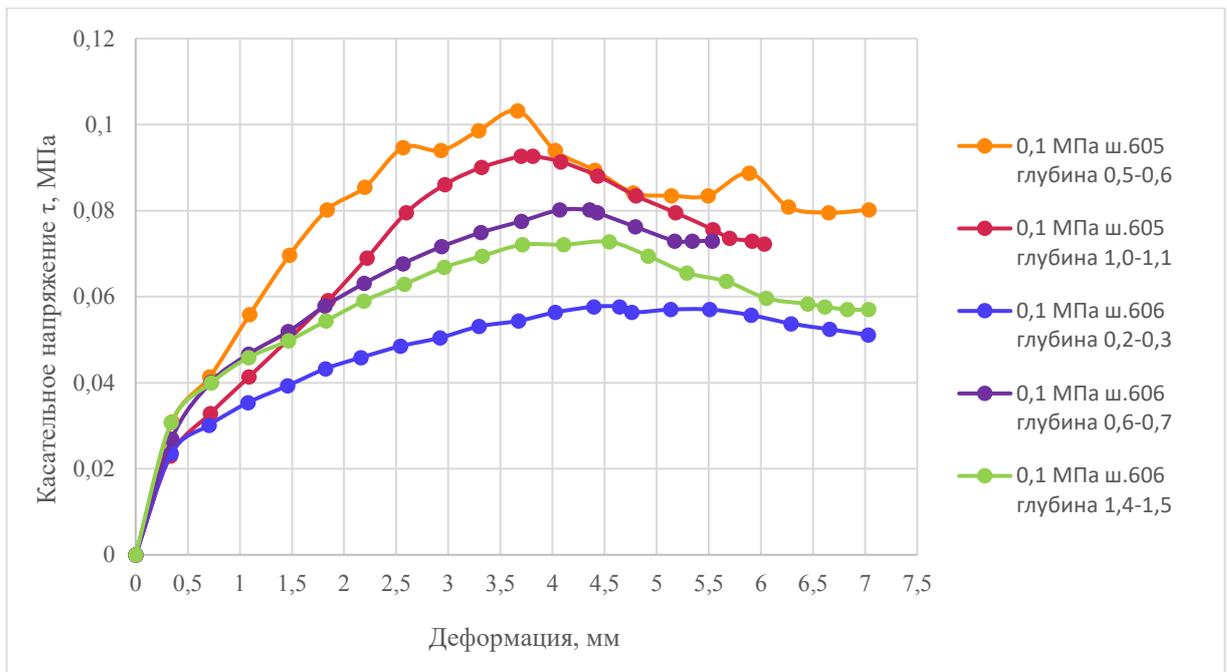


Рисунок 22. Графики зависимости деформации сдвига от величины касательного напряжения при вертикальной нагрузке 0,1 МПа

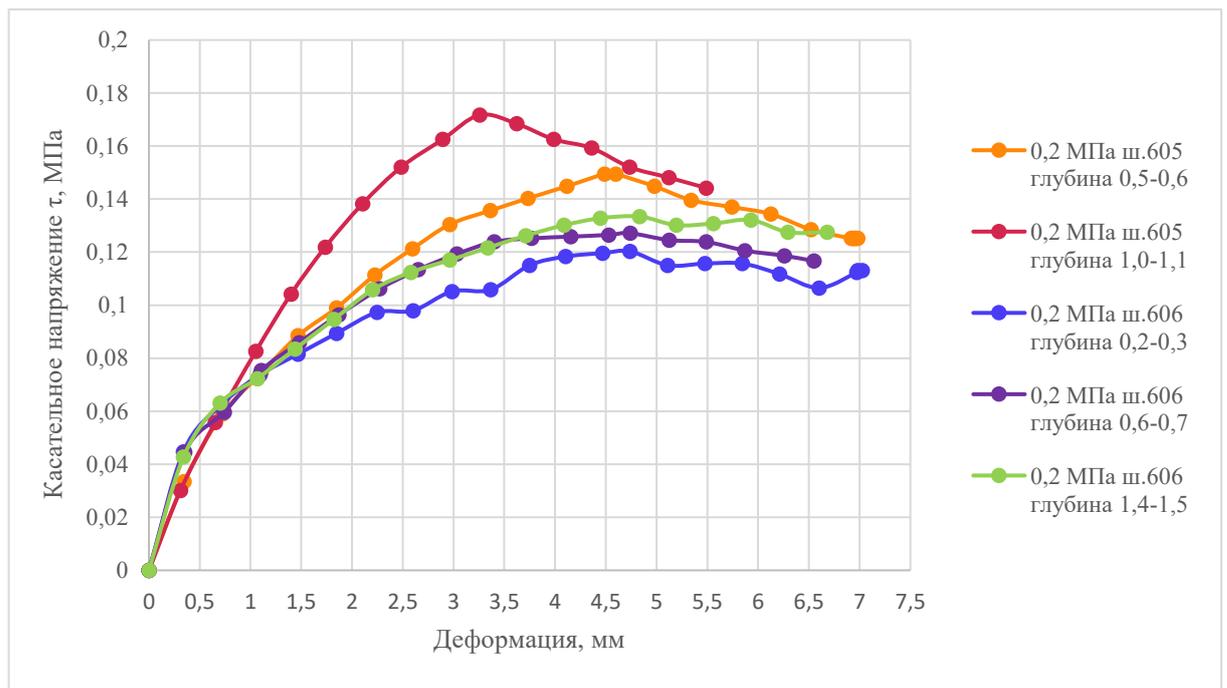


Рисунок 23. График зависимости деформации сдвига от величины касательного напряжения при вертикальной нагрузке 0,2 МПа

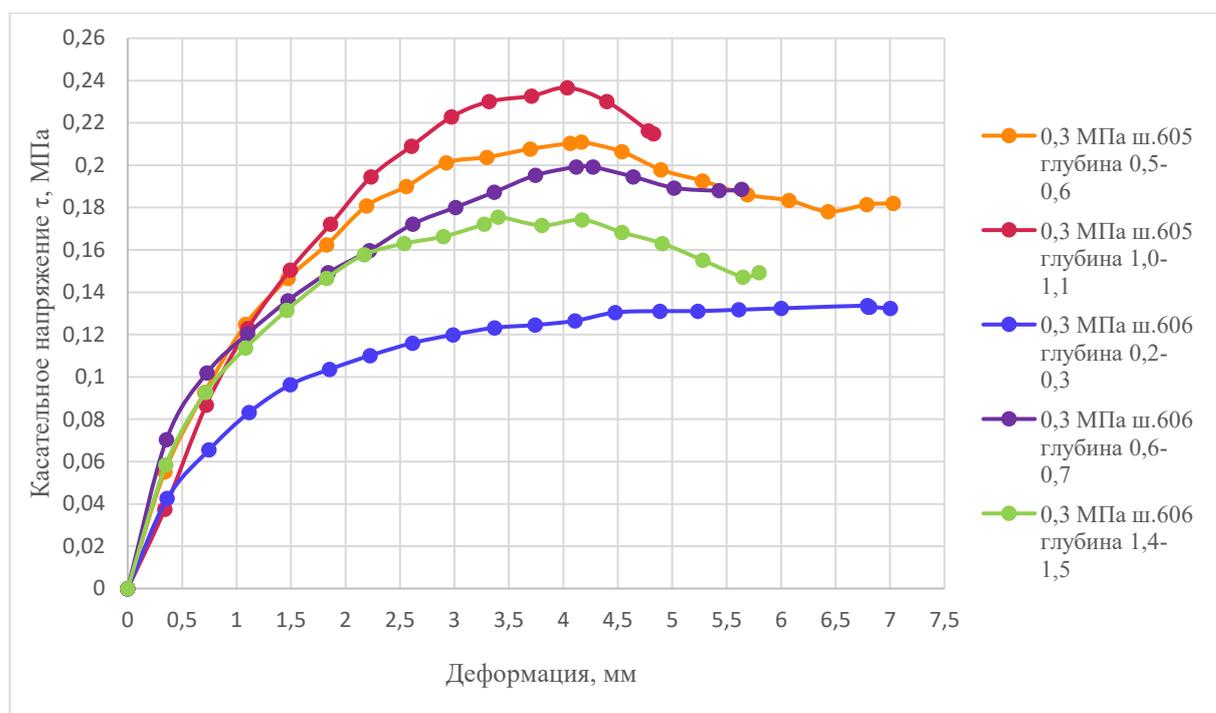


Рисунок 24. График зависимости касательного напряжения от деформации при вертикальной нагрузке 0,3 МПа

Полученные графики (рис. 22-24) демонстрируют определенные закономерности в загрязненных песках. Результаты испытаний показали, что для достижения среза в чистом песчаном грунте требуется большее касательное напряжение, чем в загрязненном мазутом грунте. Это свидетельствует о снижении сдвиговой прочности грунта при загрязнении. Данный эффект объясняется уменьшением межчастичного трения из-за обволакивания частиц песка мазутом, который действует как смазка, облегчая скольжение частиц друг относительно друга. Образец, отобранный на глубине 1,4-1,5, находится близко к уровню грунтовых вод, а как уже отмечалось, нефтепродуктам характерны плотности, меньше плотности воды (0,77-0,99 г/см³), что позволяет им фильтроваться с водным флюидом и накапливаться в виде линз в зоне колебания уровня грунтовых вод.

Чистый песчаный грунт демонстрирует большую деформацию сдвига до разрушения по сравнению с загрязненным грунтом. Это означает, что чистый песок способен выдерживать большие деформации без потери прочности. В то время как загрязненный грунт становится более пластичным и разрушается при меньших деформациях. Различия в значениях в загрязненных пробах связано с изменением количества мазута с глубиной. Прослеживается четкая закономерность снижения сопротивления сдвигу с ростом содержания ПН.

Испытания на сдвиг также показали, что в загрязненных песках разрушение наступало через более короткий период времени, чем в чистых песках при той же нормальной нагрузке. Так, например, при вертикальной нагрузке 0,3 МПа разрушение чистого образца

песчаного грунта на глубине 0,5-0,6 м произошло за 17 минут (деформация 4,2 мм), на глубине 1,0-1,1 за 14 минут (деформация 4,03 мм), загрязненный песок на глубине 0,6-0,7 разрушился за 16 минут (деформация 4,3 мм), на глубине 1,4-1,5 м за 14 минут (деформация 3,4 мм) (рис.25).

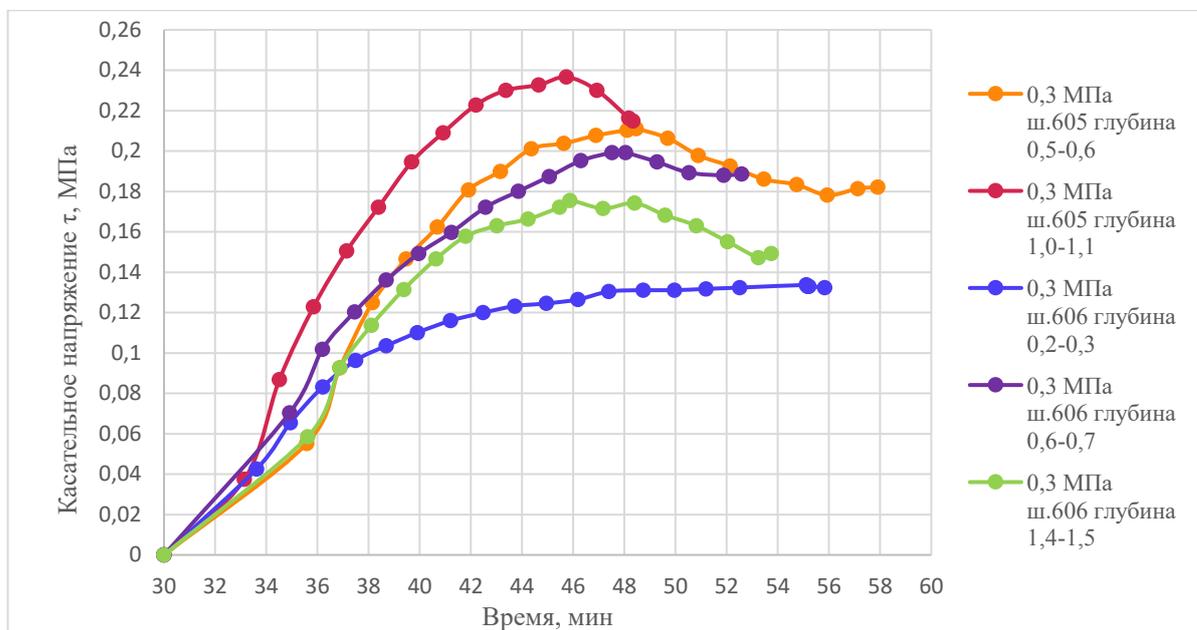


Рисунок 25. Графики зависимости роста срезающего усилия τ во времени t при вертикальной нагрузке 0,3 МПа

Данные испытания проводились при естественных свойствах грунтов, то есть при различных значениях плотности грунта, влажности и коэффициента пористости, что обнаруживает закономерности изменения характера деформирования с изменением физических свойств. Наибольший коэффициент пористости и значение природной влажности были получены у загрязненных песков на глубине 0,2-0,3 м, что может быть связано с образованием агрегатов песчаного грунта за счет содержания нефтяных углеводородов. В результате образования агрегатов повышается пористость (Ijimdiya, Igbogo, 2012), что приводит к увеличению способности грунта удерживать воду. Вероятно, что повышенное значение влажности связано с увеличением содержания нефтепродуктов в грунте. Пространство между частицами полностью заполнено водой и нефтяными углеводородами, в данном случае мазутом, который при температуре определения влажности (105 град. С) воспламеняется, и при расчете учитывается в потере веса. Содержание мазута в грунте затрудняет фильтрацию, что приводит к удержанию влаги и, соответственно росту влажности. Указанный образец песка обнаруживает наименьшие величины сопротивления сдвигу и угол внутреннего трения, при этом его сцепление закономерно возросло.

С целью подтверждения полученных результатов для песков в зоне и вне зоны мазутного загрязнения, а также исключения влияния плотности сложения и влажности на параметры прочности, дополнительно были проведены испытания одноплоскостного сдвига до и после прокаливания образцов песка вне зоны мазутного загрязнения (шурф 605) и в пределах мазутного разлива (шурф 606) (табл.9). Испытания проведены для песка заданной средней плотности и влажности в водонасыщенном состоянии.

Таблица 9. Результаты определения параметров прочности по результатам испытания одноплоскостного сдвига для пылеватых песков при заданном коэффициенте пористости в водонасыщенном состоянии до и после прокаливания.

№ скважины	Глубина отбора, м	Плотность частиц, г/см ³	Коэффициент пористости, д.ед.	Плотность грунта, г/см ³	Природная влажность (д.ед.)	Коэффициент водонасыщения
Ш.605	0,5-0,6	2,66	0,701	1,97	0,260	0,986
Ш.605*	0,5-0,6	2,66	0,701	1,97	0,260	0,986
Ш.606	1,4-1,5	2,66	0,701	1,97	0,260	0,986
Ш.606*	1,4-1,5	2,66	0,701	1,97	0,260	0,986

Примечание: * – после прокаливания

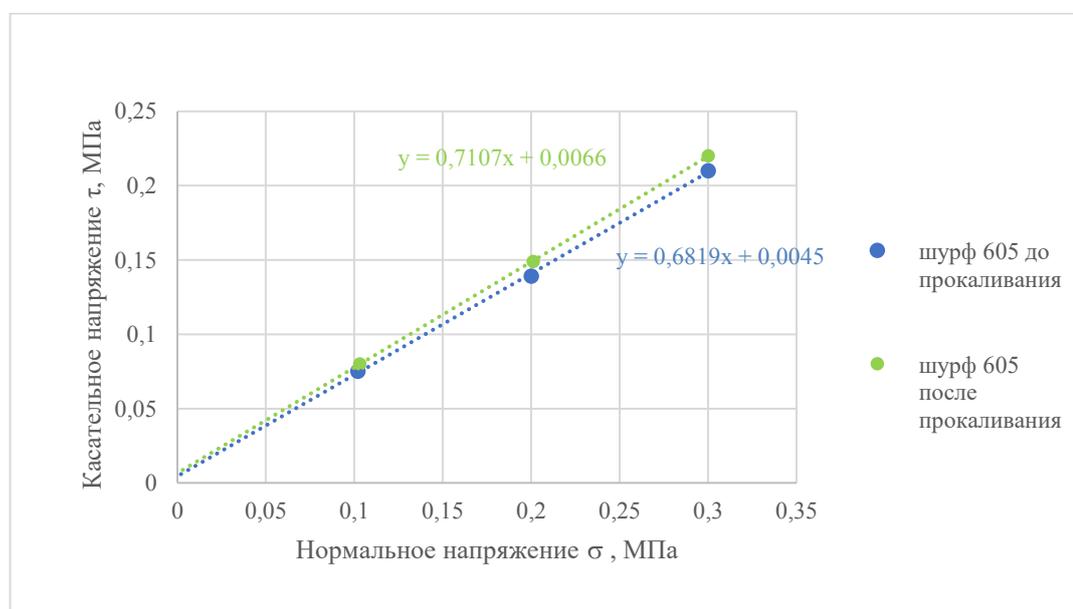


Рисунок 26. Диаграмма сопротивления сдвигу фоновой пробы (шурф 605) до и после прокаливания

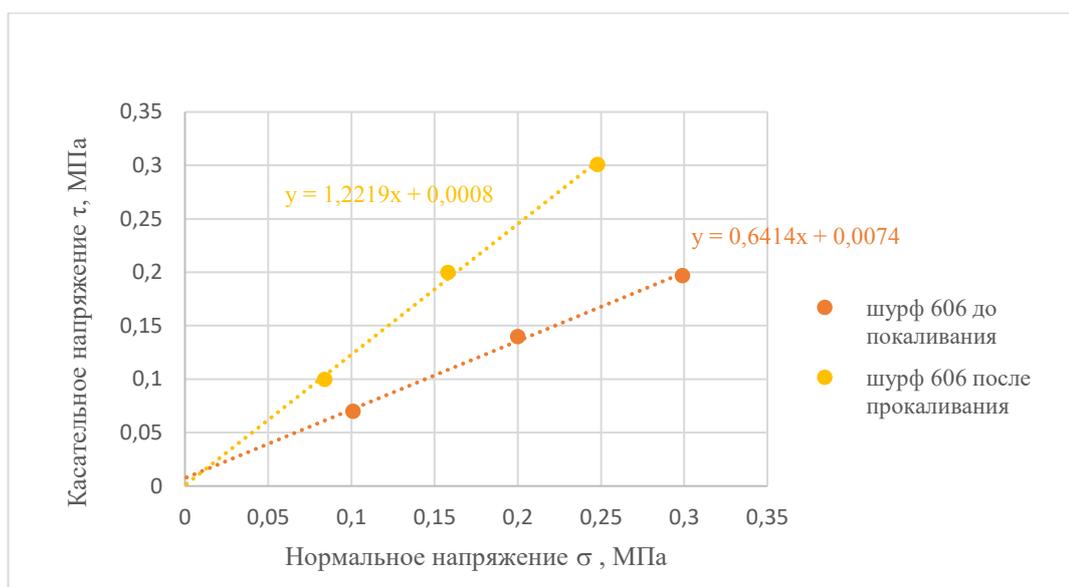


Рисунок 27. Диаграмма сопротивления сдвигу загрязненных песков (шурф 606) до и после прокаливания

Угол внутреннего трения в грунтах, не подвергшихся загрязнению нефтепродуктами, больше в сравнении с загрязненными, однако сцепление, наоборот, меньше (рис.26, 27). После прокаливания образцов сцепление грунта фоновых образцов осталось в пределах точности определения указанного параметра, в загрязненных существенно уменьшилось, угол внутреннего трения при этом существенно возрос для загрязненных проб, и несколько менее для фоновых (табл.10, 11).

Таблица 10. Результаты испытаний на сдвиг пылеватых песков, отобранных вне зоны загрязнения мазутом (шурф 605).

Шурф 605 Глубина 0,5-0,6м	Нормальное напряжение, МПа	Сопротивление сдвигу, МПа	Влажность до опыта	Влажность после опыта	Сцепление С, МПа До/после прокаливания	Угол внутреннего трения ϕ , град. До/после прокаливания
1	0,1	0,075	0,260	0,253	0,006/0,011	34/38
2	0,2	0,139	0,260	0,247		
3	0,3	0,210	0,260	0,240		

Таблица 11. Результаты испытаний методом одноплоскостного среза пылеватых песков, отобранных в зоне мазутного разлива (шурф 606)

Шурф 606 Глубина 1,4-1,5м	Нормальное напряжение, МПа	Сопротивление срезу, МПа	Влажность до опыта	Влажность после опыта	Сцепление С, МПа До/после прокаливания	Угол внутреннего трения ϕ , град. До/после прокаливания
1	0,1	0,070	0,260	0,255	0,009/0,005	32/38
2	0,2	0,140	0,260	0,249		
3	0,3	0,197	0,260	0,241		

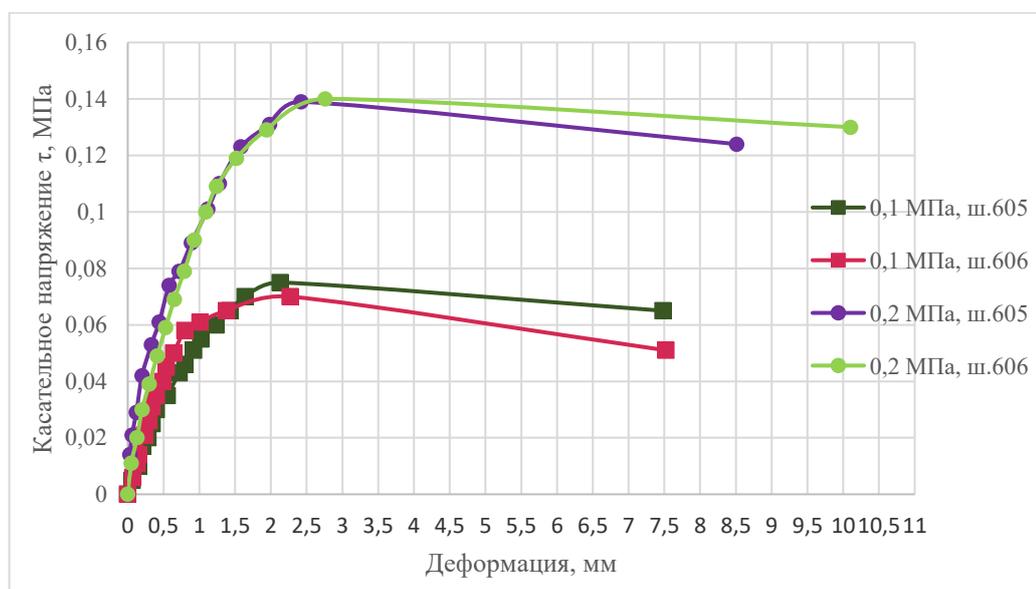


Рисунок 28. График зависимости касательного напряжения от деформации

Анализ развития деформаций во времени в ходе сдвига для нормальных напряжений 0,1 МПа показал близкие значения максимальных касательных напряжений для обеих проб : для незагрязнённого грунта – 0,075 МПа, деформация сдвига – 2,13 мм; загрязненного в пробе из ш. 606 касательное напряжение – 0,07 МПа, деформация – 2,27 мм. Стоит отметить, что времени было затрачено больше на сдвиг пробы с нефтяными углеводородами (рис. 28).

График зависимости сопротивления сдвигу от деформации при нормальной составляющей полного напряжения 0,2 МПа обнаруживает в двух случаях близкие значения максимальных касательных напряжений (0,14 МПа), при этом деформация сдвига для пробы с мазутом больше (2,76 мм), чем незагрязненной (2,42 мм) при существенно меньшем затраченном времени (42,76 минут (загрязненная проба), 76,78 минут (фоновая проба)).

Следовательно, при небольших вертикальных нагрузках деформации сдвига загрязненных песков осуществляется за более длительное время. В то время, как при увеличении вертикальной нагрузке загрязненный песок разрушается гораздо быстрее.

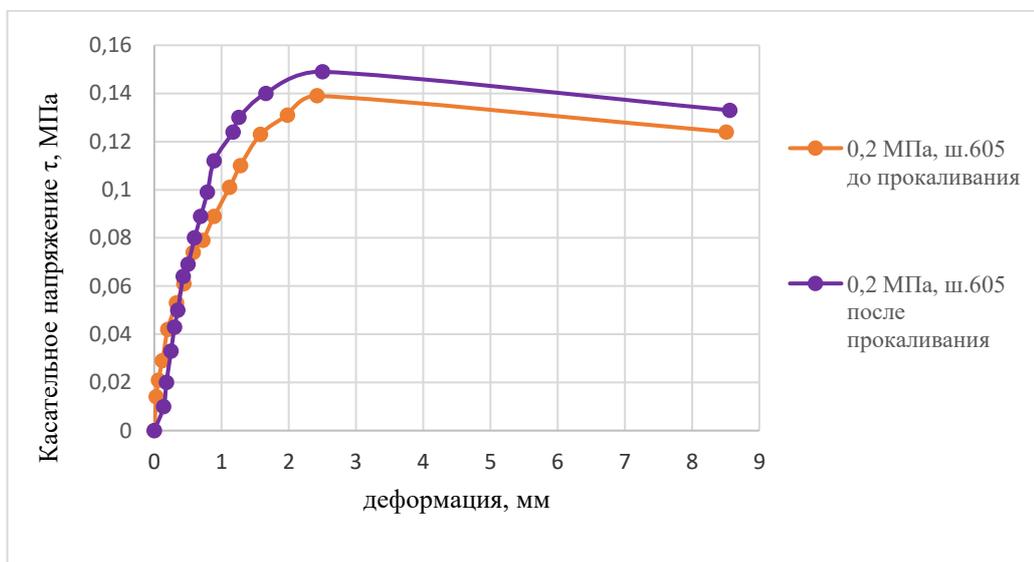


Рисунок 29. График зависимости касательного напряжения от деформации ш.605 до прокаливания и после

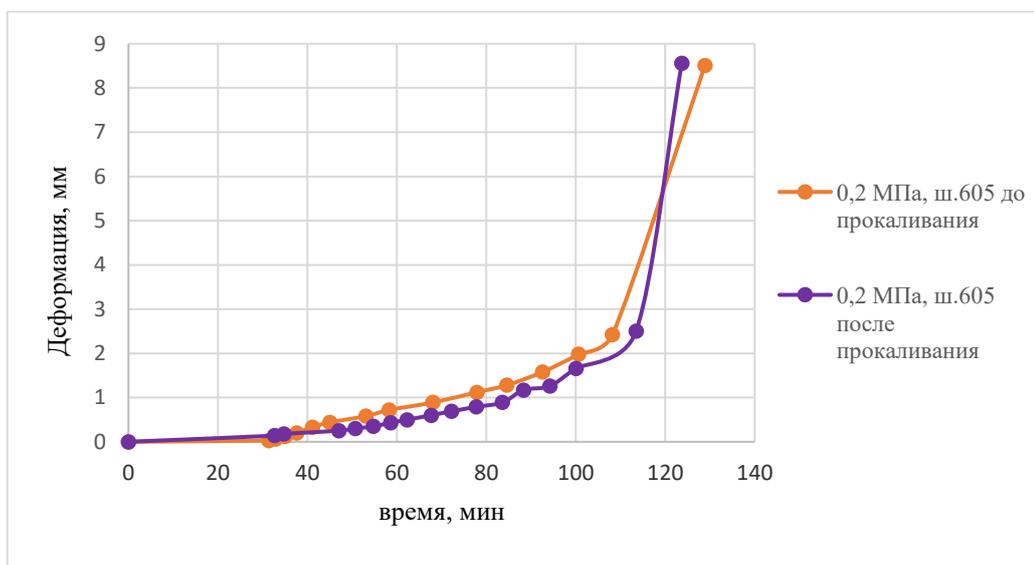


Рисунок 30. График зависимости деформации от времени ш.605 до прокаливания и после

Для фоновых проб прокаливанию не оказало влияние на сопротивление сдвигу и скорость развития деформаций во времени (рис.29, 30). Для пробы из шурфа 605 при вертикальном напряжении 0,2 МПа: до прокаливания максимальное касательное напряжение – 0,139 МПа и деформация составила 2,42 мм за 76,78 минут. После прокаливании максимальное приложенное касательное напряжение 0,149 МПа на 2,5 мм за 80,79 минут.

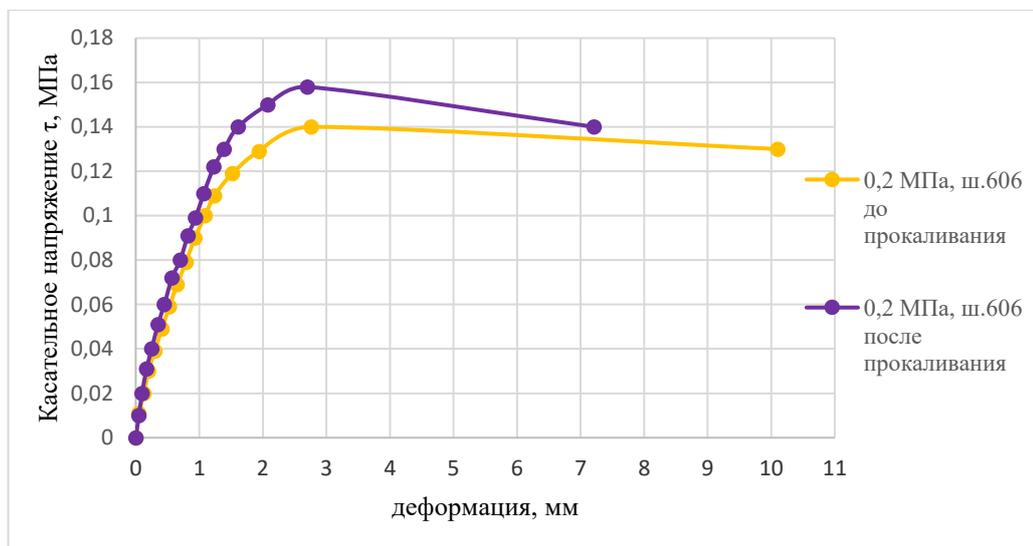


Рисунок 31. График зависимости касательного напряжения от деформации ш.606 до прокаливания и после

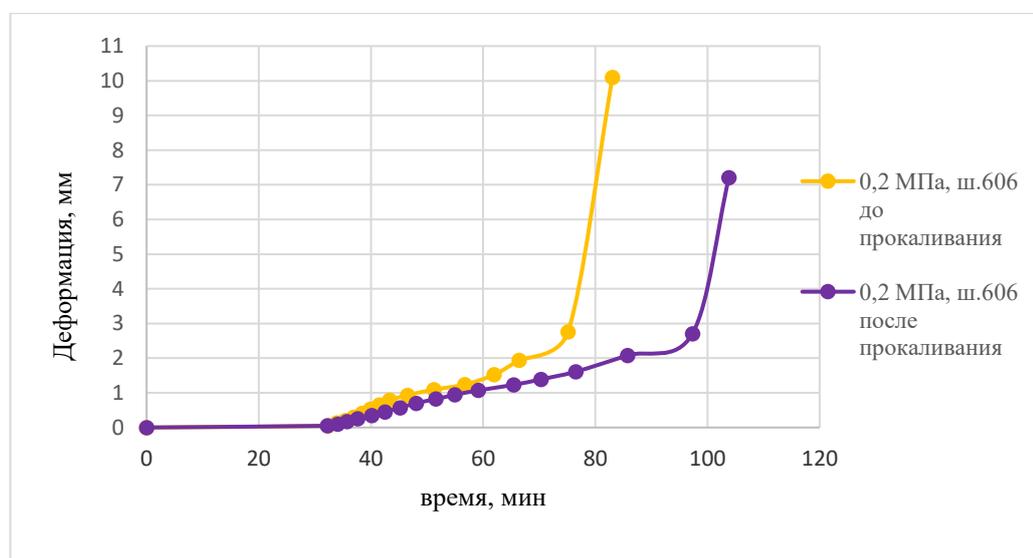


Рисунок 32. График зависимости деформации от времени ш.606 до прокаливания и после

Для загрязненных грунтов из шурфа 606 прокаливание привело к росту сопротивления сдвигу, сдвиг произошел за больший промежуток времени при меньшей величине деформации (рис. 31, 32). При вертикальном напряжении 0,2 МПа до прокаливания максимальное касательное напряжение составило 0,14 МПа и деформация 2,76 мм за 42,76 минут; после прокаливания касательное напряжение составило 0,158 МПа, деформация при этом 2,7 мм за 65,09 минут.

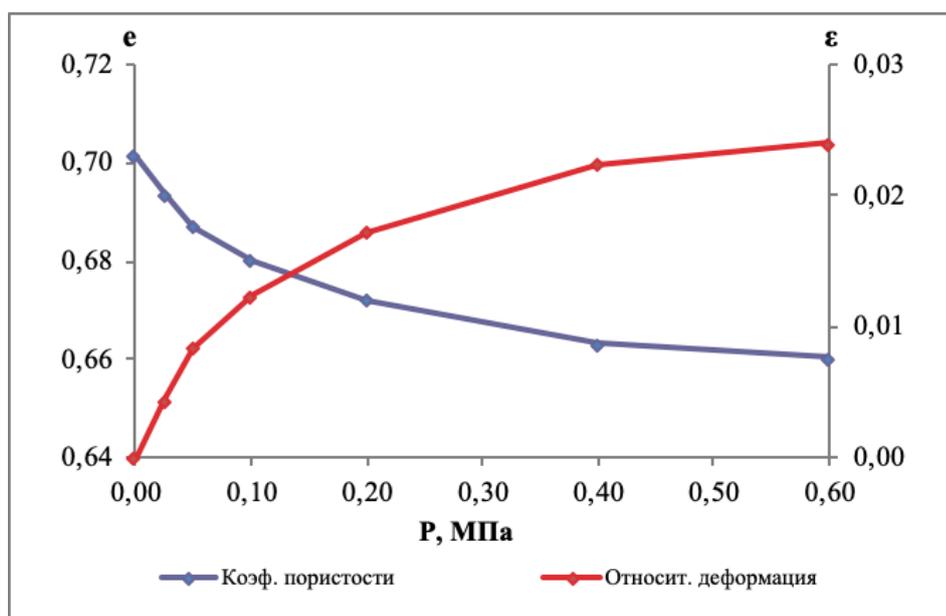
Испытания показали, что в загрязненных мазутом песках время достижения сопротивления сдвигу при одноплоскостном срезе меньше, чем в чистых песках. Это свидетельствует о более быстрой скорости деформации и разрушении загрязненного грунта.

Одна из возможных причин роста скорости развития деформаций во времени может быть снижение межчастичного трения. Мазут, как неполярная жидкость, обволакивает

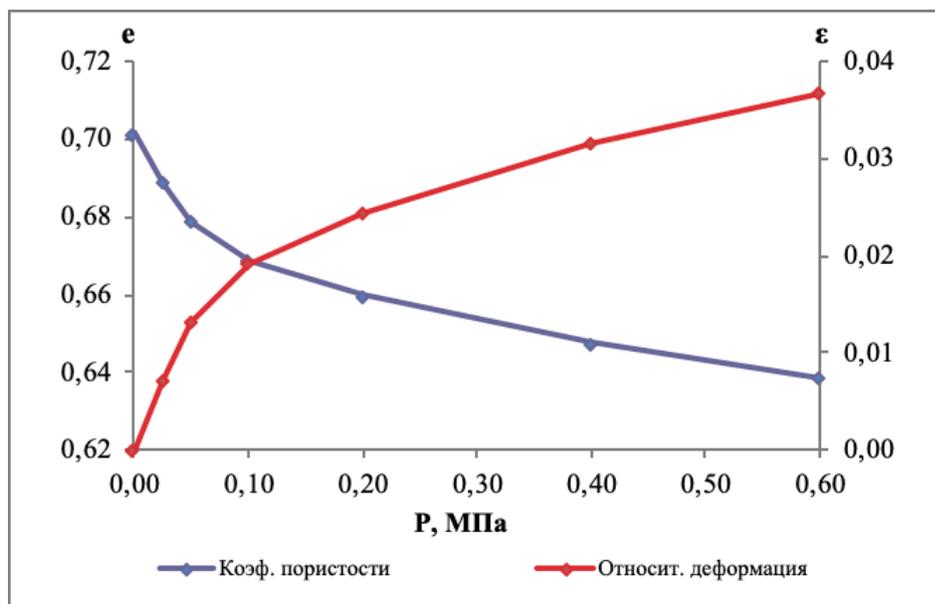
частицы песка, снижая трение между ними. Это облегчает скольжение частиц друг относительно друга, что приводит к ускорению процесса сдвига и, как следствие, к более быстрому разрушению. Нефтяные углеводороды заполняют поры между частицами песка, что изменяет структуру грунта, делая ее менее устойчивой к сдвиговым деформациям (способствует более быстрому развитию сдвиговых зон). Заполняя поры в грунте нефтепродукты также влияют и на свойства воды в этих порах, делая ее более вязкой. В результате перераспределение воды в процессе сдвига затрудняется, что также приводит к более быстрому разрушению.

В дополнении к сдвиговым испытаниям для образцов с заданной плотностью сложения при естественной влажности были проведены испытания методом компрессионного сжатия и определен модуль деформации по результатам компрессионных испытаний (E_{oed} , МПа), а также параметры консолидации.

Результаты испытаний компрессионного сжатия показали, что модуль деформации загрязненного песка уменьшился. Компрессионный модуль деформации для песка из ш. 605 составил 20,83 МПа, для песка из ш.606 – 19,23 МПа.



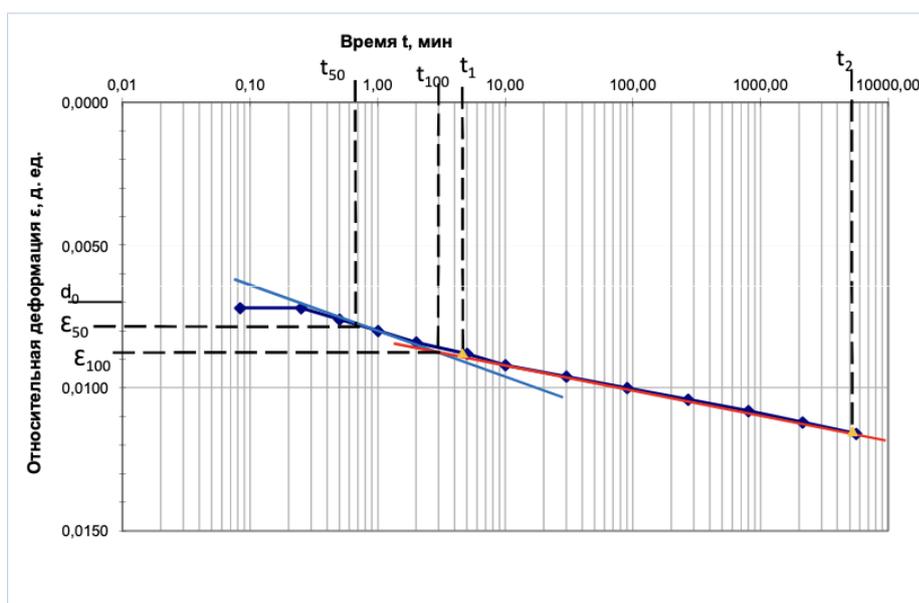
а)



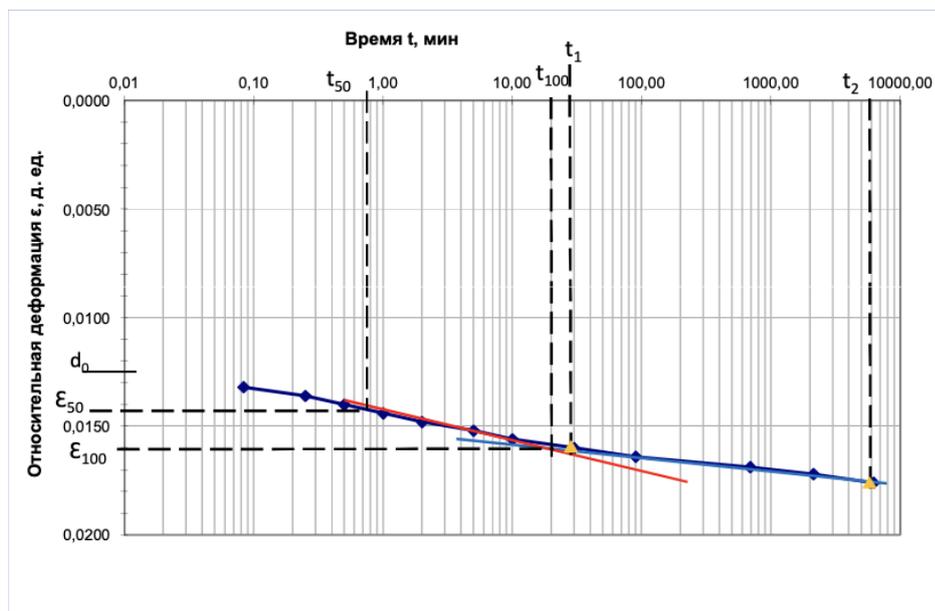
б)

Рисунок 33. Компрессионная кривая а) чистых песков (Шурф 605), б) загрязненных песков (Шурф 606)

Согласно теории фильтрационной консолидации напряжение, вызванное приложенной нагрузкой, распределяется на скелет грунта (эффективное напряжение) и на давление в поровой воде – поровое давление. Разность давлений в поровой жидкости вызывает перемещение воды в менее нагруженные части грунта. Скорость деформации грунта прямо пропорциональна скорости фильтрации поровой воды. Поэтому коэффициент фильтрации принимается в качестве основной характеристики грунта, определяющей длительность фильтрационной консолидации.



а)



б)

Рисунок 34. Графики обработки кривой консолидации а) чистых, б) загрязненных песков при постоянной нагрузке 0,1 МПа

Значения коэффициента фильтрационной консолидации C_v ($\text{см}^2/\text{мин}$) в чистых песках – 1,718 $\text{см}^2/\text{мин}$, в загрязненных – 1,485 $\text{см}^2/\text{мин}$ (табл. 12).

Отмечается, что в фоновом образце коэффициент консолидации выше, чем в песке, загрязненном мазутом. Это можно объяснить тем, что в чистый песок обладает более высокой водопроницаемостью, что обеспечивает свободный отвод поровой воды под действием нагрузки. В то время, как мазут заполняет поры песка, снижая их размер и количество, а также образует гидрофобные пленки на поверхности частиц. Это приводит к снижению водопроницаемости и затрудняет фильтрацию поровой воды. Также может влиять изменение структуры порового пространства и увеличение вязкости поровой жидкости. Это приводит к замедлению уплотнения грунта и увеличению времени достижения конечных осадок. Так, время соответствующие 100%-ному первичному сжатию грунта для чистого песка составило 3 минуты, а для загрязненного 20 минут.

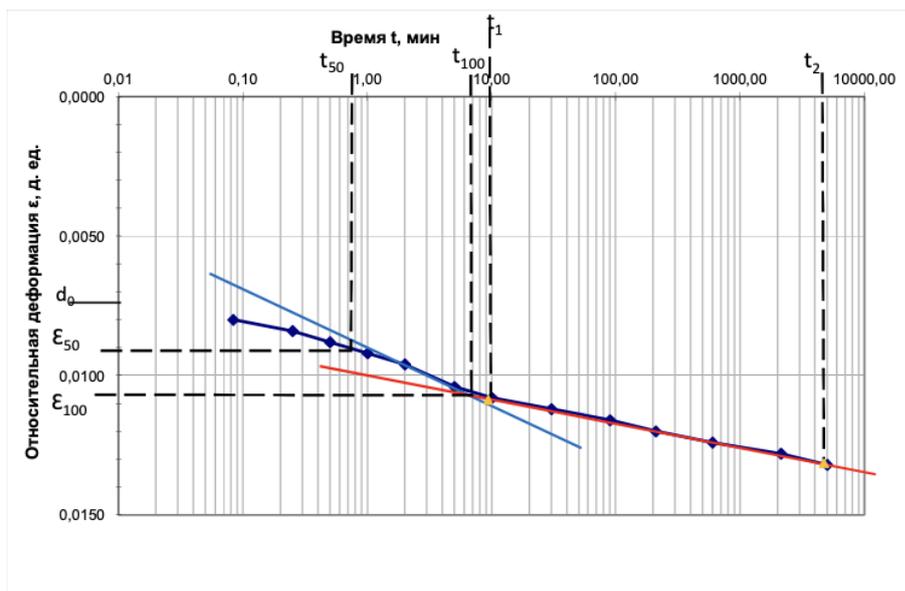
Таблица 12. Результаты консолидационных испытаний при постоянном давлении 0,1 МПа для пылеватых песков при заданном коэффициенте пористости в водонасыщенном состоянии до и после прокаливании

	ш.605 0,5-0,6	ш.606 1,4-1,5	ш.605 0,5-0,6*	ш.606 1,4-1,5*
Время, соответствующие 100%-ному первичному сжатию грунта, мин	3	20	7	25
Деформация, соответствующая 100%-ному первичному сжатию грунта, мм	0,0087	0,0160	0,0108	0,0167
Коэффициент фильтрационной консолидации C_v , (см ² /мин)	1,718	1,485	1,498	1,184
Время, соответствующие 50%-ному первичному сжатию грунта, мин	0,7	0,8	0,8	1
Деформация, соответствующая 50%-ному первичному сжатию грунта, мм	0,0079	0,0143	0,0091	0,0149
Коэффициент вторичной консолидации C_a	0,00092	0,00069	0,00089	0,00095

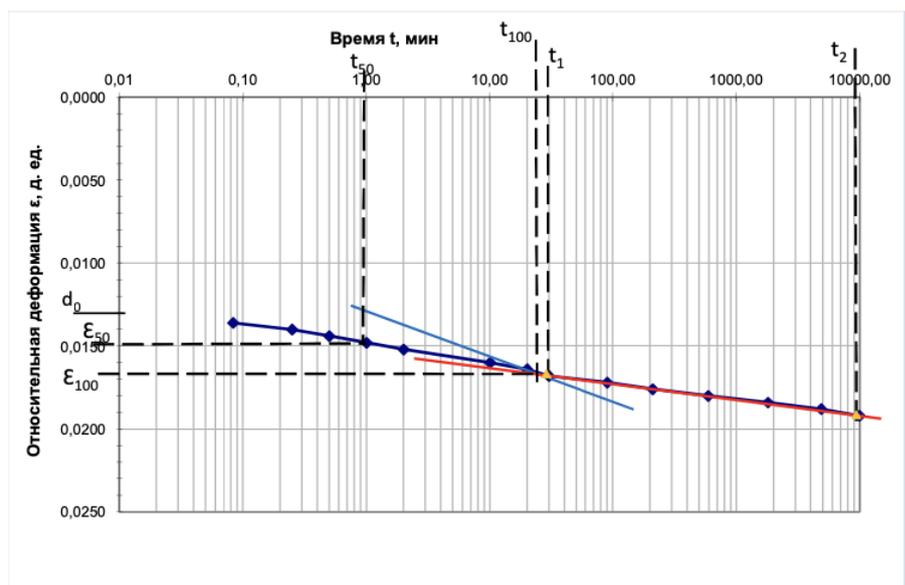
Примечание: * – после прокаливании

Как видно из таблицы 12, коэффициент фильтрационной консолидации ниже в загрязненном образце песка (ш.606 1,4-1,5). Коэффициент фильтрационной консолидации (C_v) характеризует скорость уплотнения водонасыщенного грунта под действием внешней нагрузки. Он зависит от проницаемости грунта и его сжимаемости. Мазут, как вязкая жидкость, заполняет поры между частицами песка, затрудняя или полностью блокируя движение воды. Это приводит к снижению проницаемости грунта, что замедляет отток воды из пор и, как следствие, уменьшает C_v . В последствие уменьшение C_v приводит к замедлению консолидации, что увеличивает время осадки грунта под нагрузкой.

Коэффициент вторичной консолидации, который описывает деформацию грунта за счет перестройки его структуры, переориентации и скольжения частиц, ползучести скелета грунта, уменьшился в загрязненном мазутом песке. Это объясняется тем, что мазут, заполняя поры и обволакивая частицы песка, может изменять его структуру. Это приводит к увеличению роли деформаций за счет ползучести скелета грунта в процессе его консолидации и, как следствие, к уменьшению C_a . Еще одним фактором может быть снижение межчастичного трения в результате присутствия мазута в песчаном грунте, что также приводит к уменьшению коэффициента вторичной консолидации.



а)



б)

Рисунок 35. Графики обработки кривой консолидации а) чистых, б) загрязненных песков при постоянной нагрузке 0,1 МПа после прокаливания

Полученные коэффициенты фильтрации показывают, что в случае загрязнения мазутом песка (0,007 м/сут) оказываются на порядок ниже, чем в чистом образце песка (0,029 м/сут). После прокаливания в образце чистого песка коэффициент фильтрации увеличился до 0,2 м/сут, в то время как в загрязненном образце песка до 0,073 м/сут. В образце, где отсутствовало загрязнение такое значительное увеличение коэффициента может быть связано с удалением органических веществ и разрушением глинистых минералов, которые могут препятствовать фильтрации. В загрязненном песке также произошло увеличение, но не такое существенное. Это связано с тем, что мазут обладает высокой

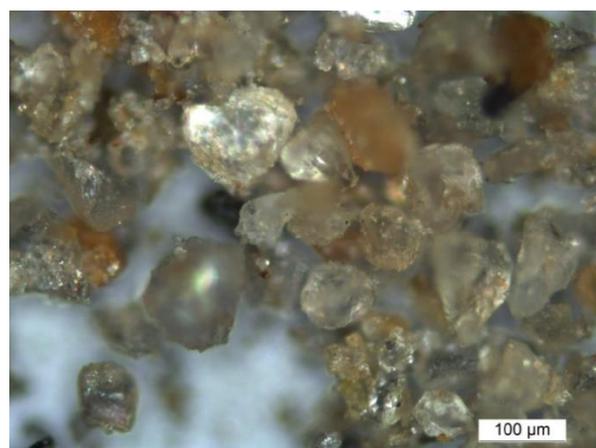
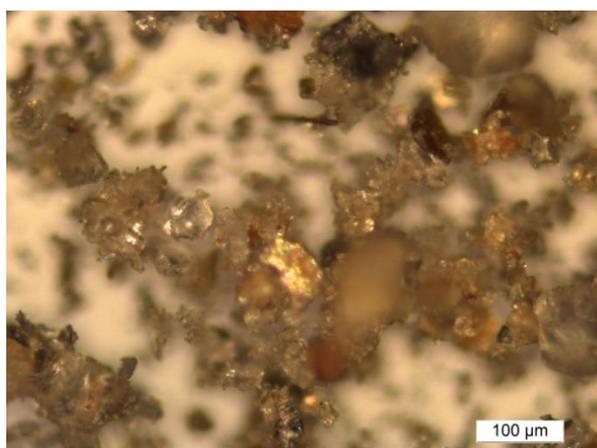
температурой сгорания, однако она может варьироваться в виду состава мазута (различное содержание серы, смол).

Нефтяные пленки препятствуют движению фильтрационного потока воды, что и уменьшает коэффициент фильтрации и, одновременно снижая скорость миграции загрязняющих веществ.

Результаты приведенных исследований физико-механических свойств песков, проницаемости демонстрируют особенное влияние загрязнения мазутом и связанных с ним физико-химических процессов, трансформирующих структуру грунта.

С целью изучения влияния загрязнения мазутом на структуру песчаного грунта, а также возможные изменения морфологии поверхности минеральных зерен образцы зоны разлива мазута и фоновые пробы были исследованы с помощью поляризационного микроскопа Leica DM4500 P (рис.36-38).

Все минеральные зерна песка имеют неровную поверхность. Минеральный состав песков представлен преимущественно кварцем, полевыми шпатами, биотитом. В загрязненных песках отмечаются темноцветные образования, появившиеся в результате образования сульфидов железа в бескислородной среде (Бракоренко, Емельянова, 2011). Образцы песка имеют насыщенный желтый цвет, что связано с присутствием железа, адсорбированного на поверхности частиц песка. Присутствие органического вещества (компоненты мазута, продукты его окисления) также может образовывать комплексы с железом, что приводит к такому характерному яркому цвету. Можно отметить, что загрязненный песок гораздо хуже пропускает свет (или совсем не пропускает), чем образцы чистого песка.



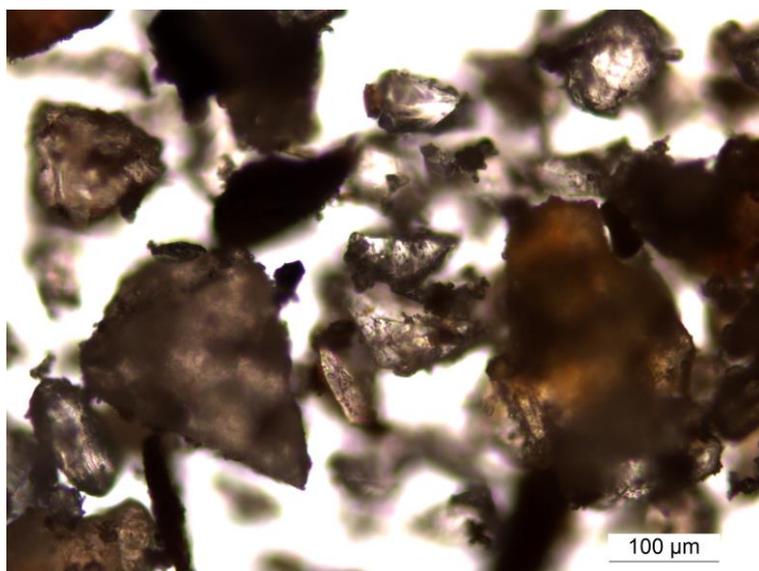


Рисунок 36. Фотографии чистого образца песка под поляризационном микроскопом

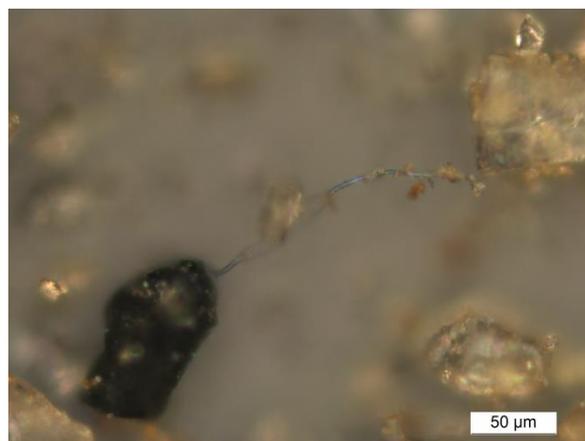
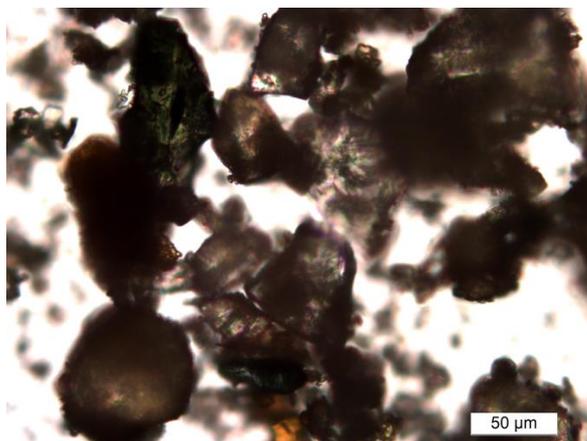
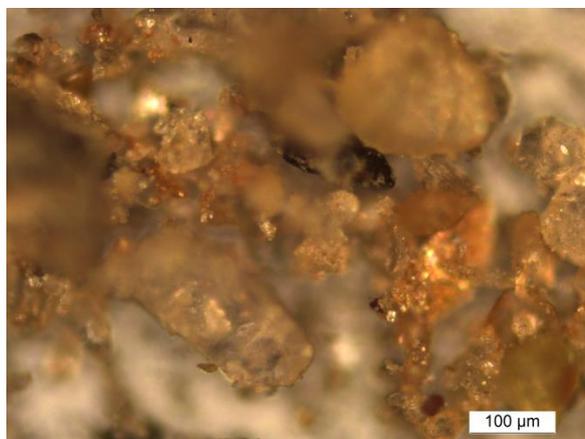
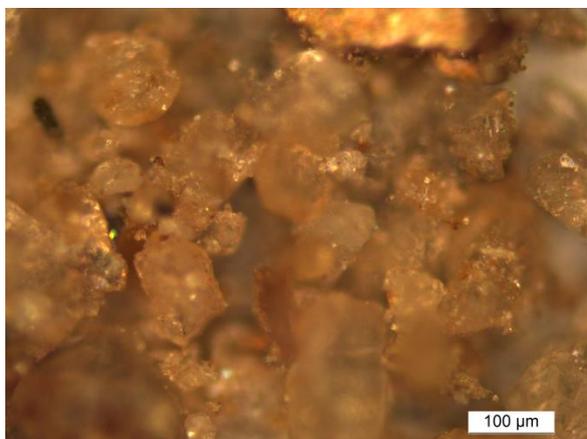


Рисунок 37. Фотографии загрязненного песка под поляризационном микроскопом (глубина 0,6-0,7 м)

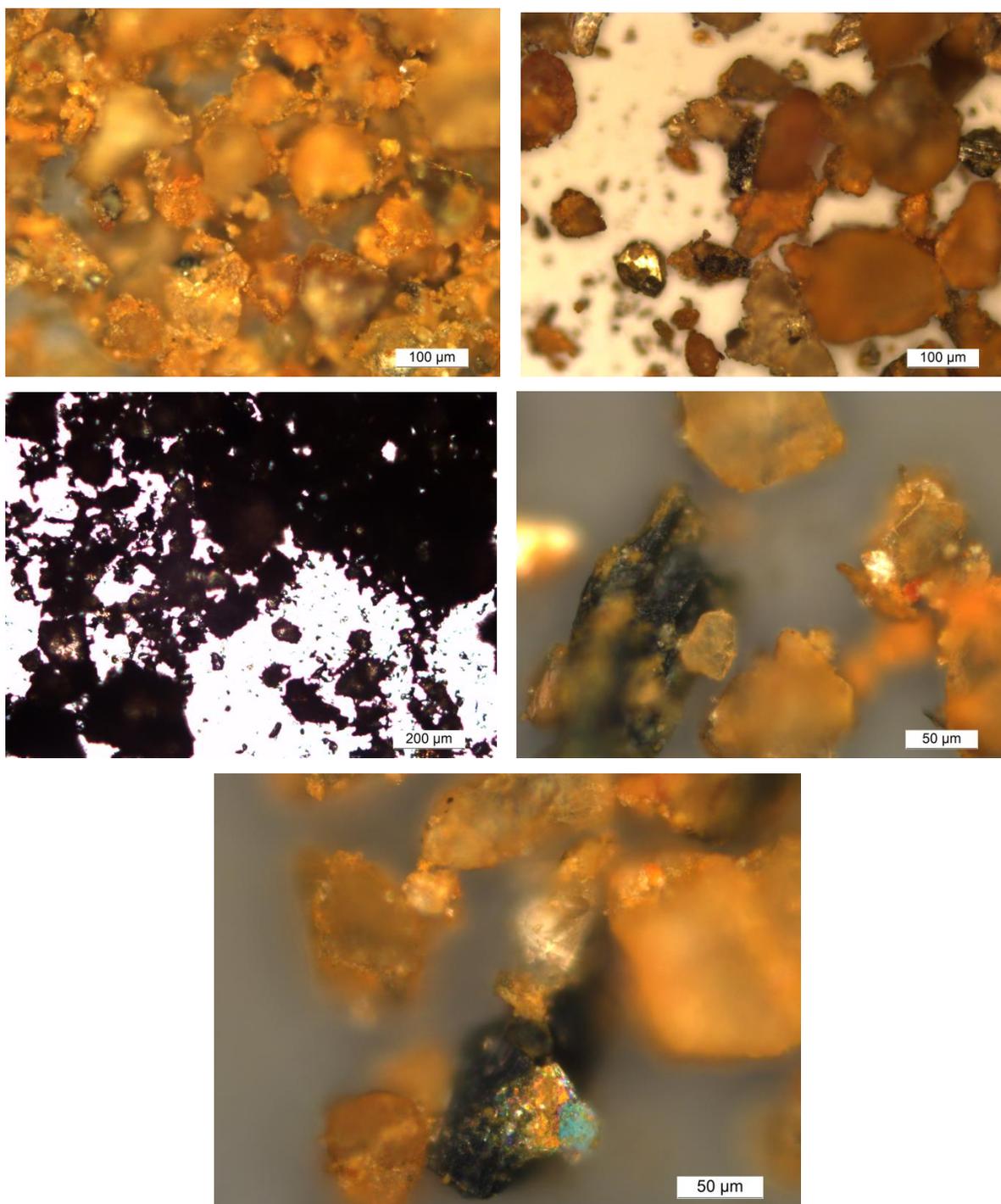


Рисунок 38. Фотографии загрязненного песка под поляризационном микроскопом (глубина 1,4-1,5 м)

Для анализа влияния нефтяного загрязнения на песчаный грунт было выполнено изучение микроструктуры песков с помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ 3000 (НИТАСНІ, Япония) (рис. 39-43).

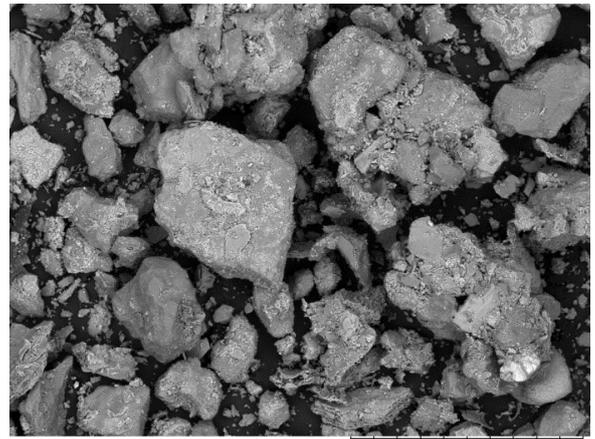
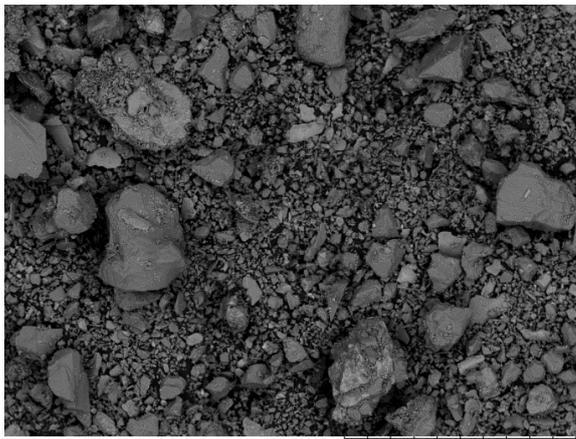


Рисунок 39. СЭМ-снимки а) чистых песков, б) загрязненных песков (увеличение x120)

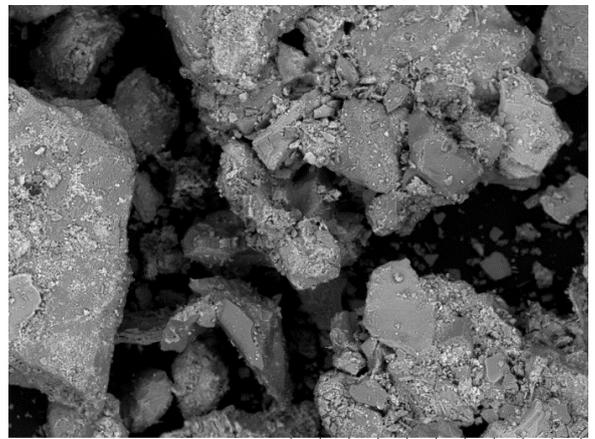
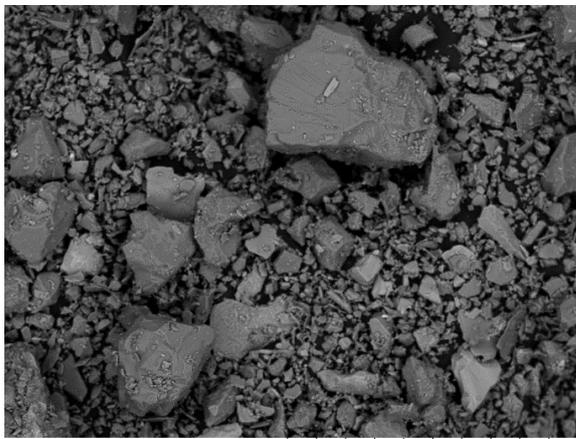


Рисунок 40. СЭМ-снимки а) чистых песков, б) загрязненных песков (увеличение x250)

На рисунке 40 б) можно отметить, что в загрязненном песчаном грунте образовались микроагрегаты (в результате абсорбирования нефтяных углеводородов на поверхности зерен). Помимо агрегирования частиц стоит отдельно отметить изменение микроструктуры песчаного грунта. На рисунке 41 представлены СЭМ-снимки чистого песчаного грунта, которые довольно окатанные. На рисунке 42 представлены СЭМ-снимки загрязненных песков, микроструктура которых очень сильно нарушена: выделяется слоистость, а также ямки на поверхности, образованные в результате химического выветривания (выщелачивания).

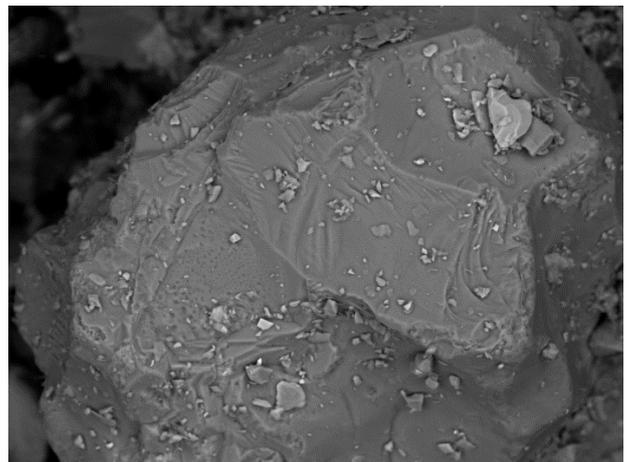
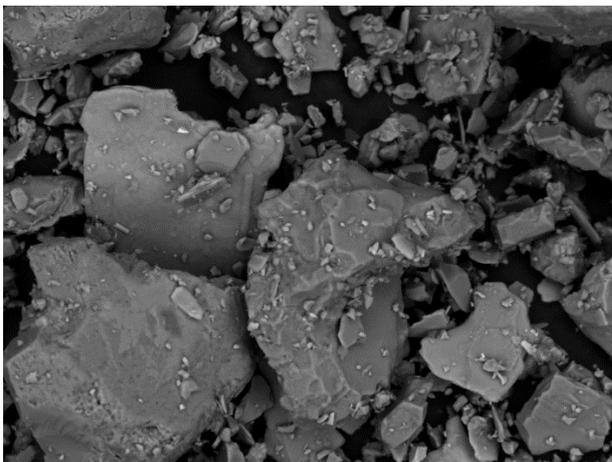


Рисунок 41. СЭМ-снимки чистого песка (увеличение x800)

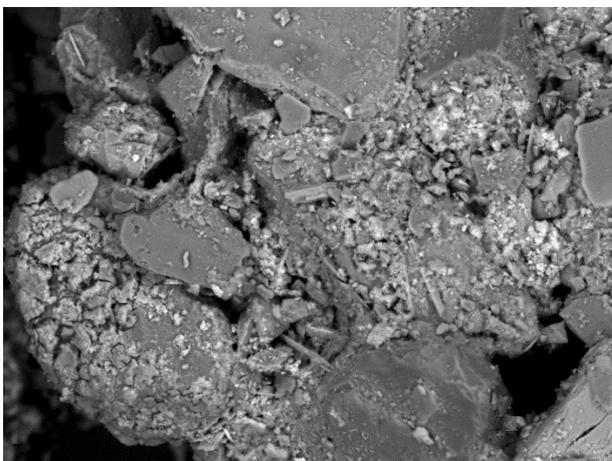
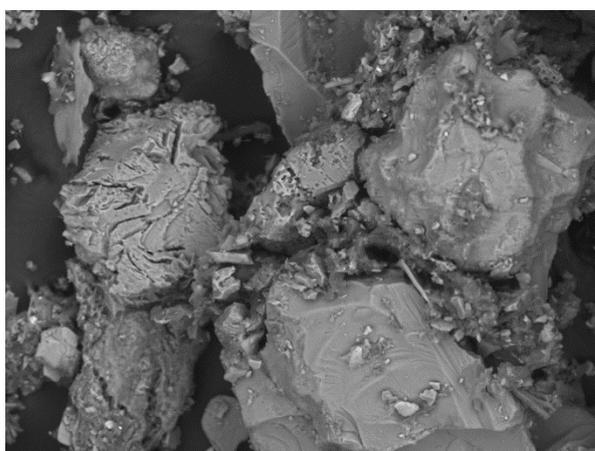
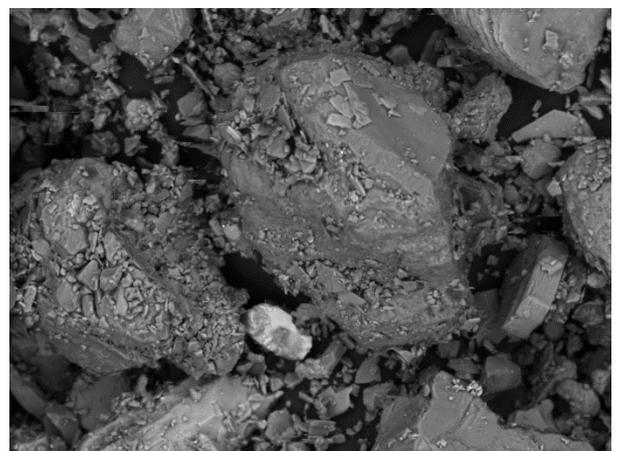


Рисунок 42. СЭМ-снимки загрязненного песка (увеличение x800)

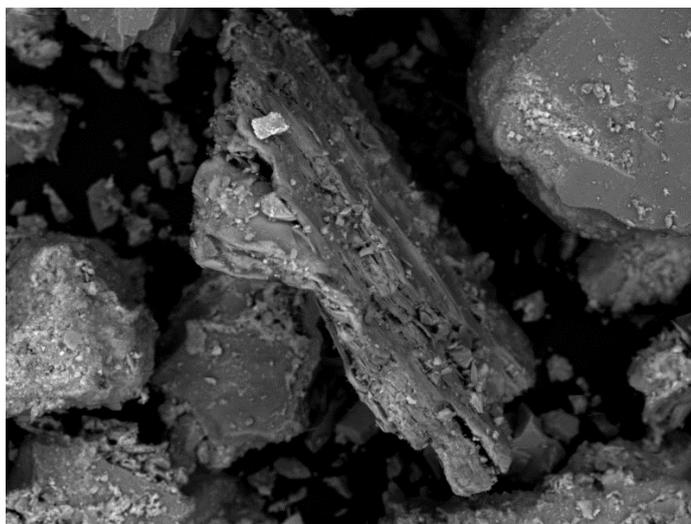
Также была изучена микроструктура загрязненного грунта на разной глубине (рис.43).



a)



б)



6-0032 2024/04/25 12:15 HL D7.3 x600 100 μm

Рисунок 43. СЭМ-снимки загрязненного песка (увеличение $\times 600$) а) глубина 0,2-0,3; б) глубина 0,6-0,7; в) глубина 1,4-1,5

На полученных флуоресцентных изображениях (рис.44-47) наиболее интенсивно проявляются микробиальные компоненты (микробиальные клетки). Пленки нефтяных углеводородов являются практически нелюминесцирующими, что типично, например, для асфальтеновых фракций (Тугарова и др., 2012).

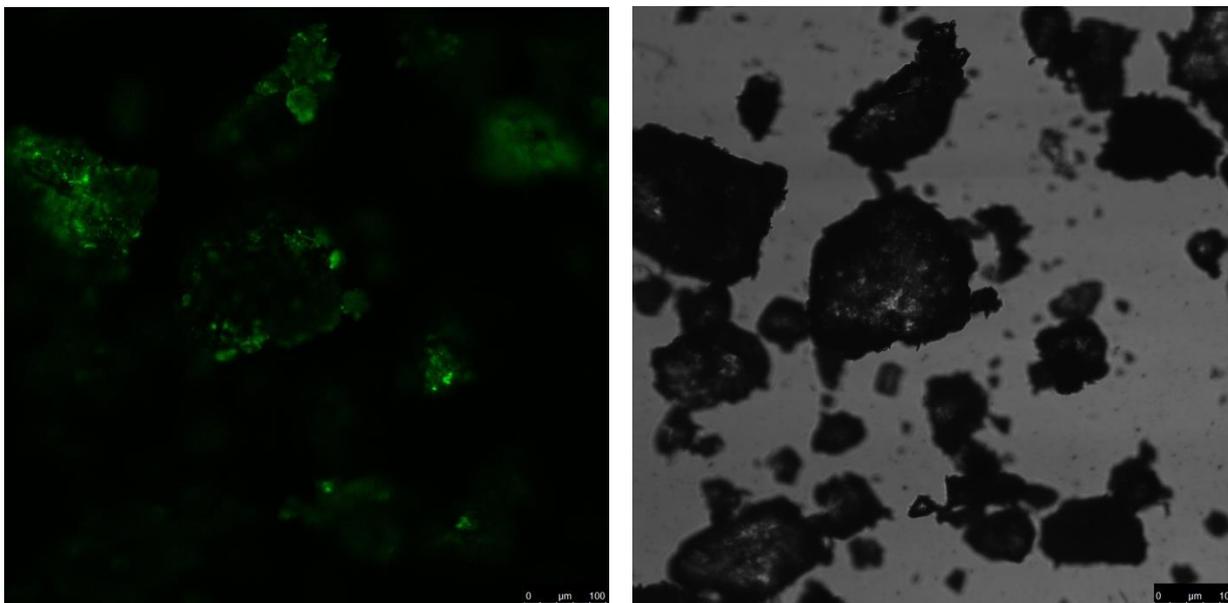


Рисунок 44. Фотоизображения в флуоресцентном конфокальном микроскопе Leica SPE в области 405 нм чистого песка (глубина 0,5-0,6)

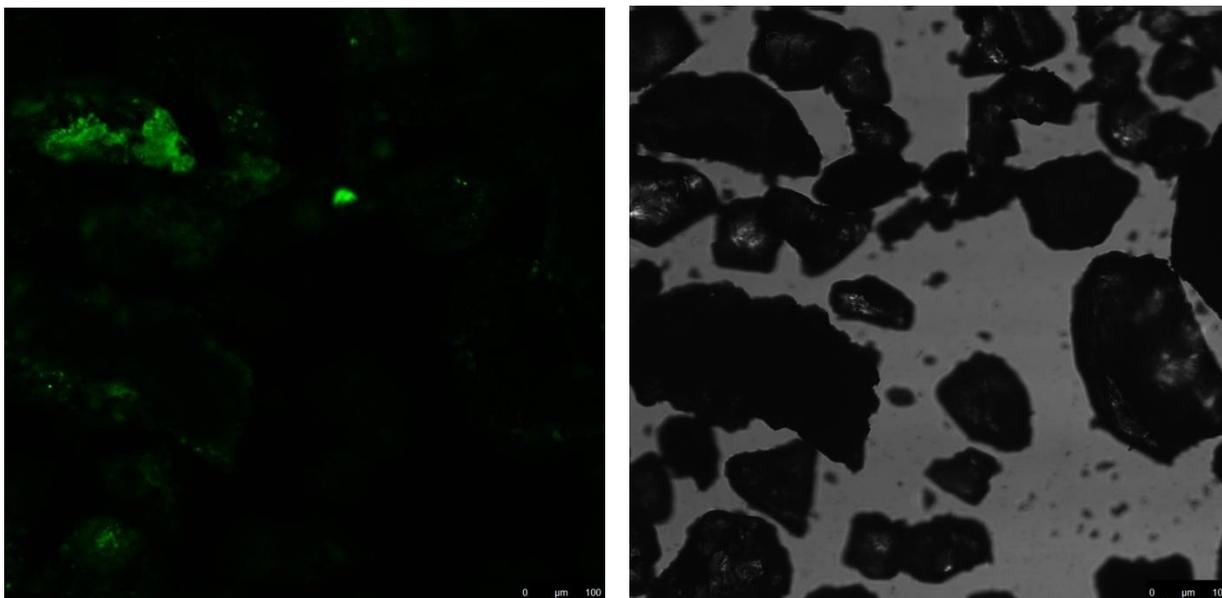


Рисунок 45. Фотоизображения в флуоресцентном конфокальном микроскопе Leica SPE в области 405 нм чистого песка (глубина 1,0-1,1)

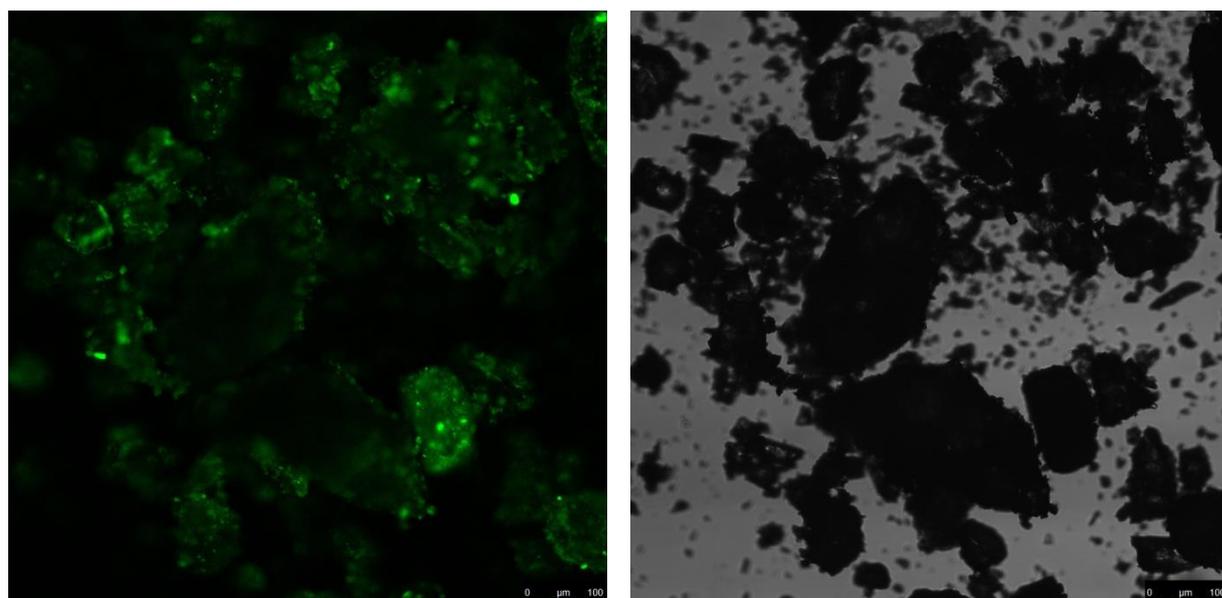


Рисунок 46. Фотоизображения в флуоресцентном конфокальном микроскопе Leica SPE в области 405 нм загрязненного песка (глубина 0,6-0,7)

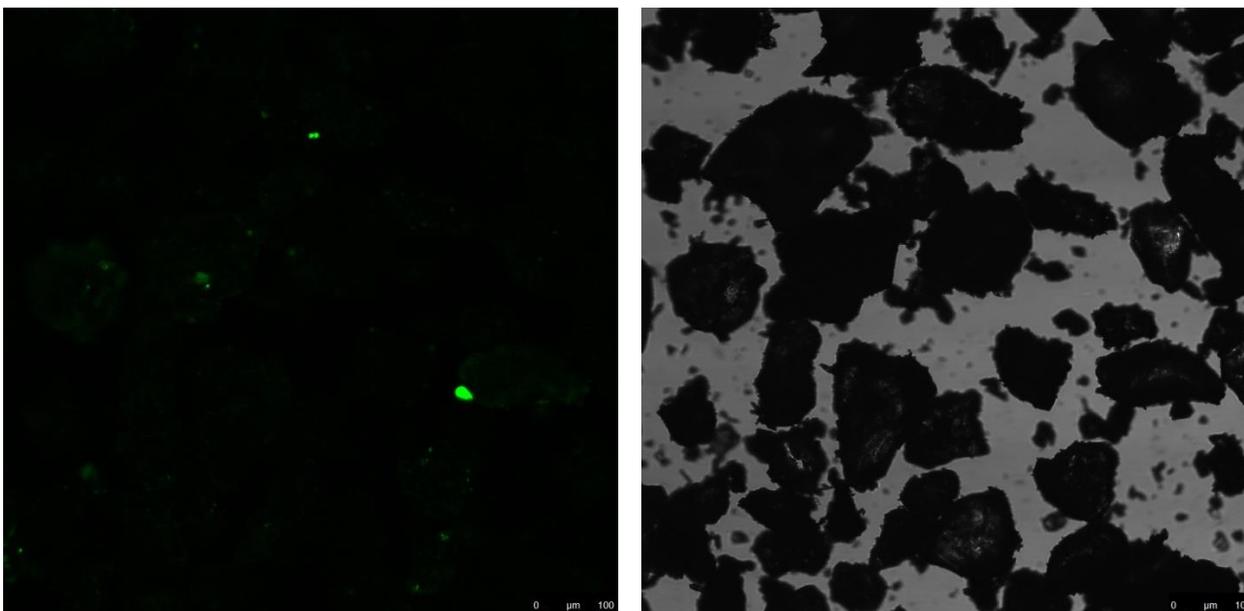


Рисунок 47. Фотоизображения в флуоресцентном конфокальном микроскопе Leica SPE в области 405 нм загрязненного песка (глубина 1,4-1,5)

3.4 Основные выводы, перспективные исследования и их значение для решения инженерных задач

Большинство ранее выполненных исследований проводились в лабораторных условиях, посредством моделирования в массиве в течение заданного времени и позволяли оценить особенности влияния загрязнения нефтепродуктами и оценки его максимально возможного наихудшего эффекта на свойства песков. Отличительной особенностью представленных результатов явилась возможность изучения свойств песков, подвергшихся влиянию мазутного загрязнения в течении 10 лет непосредственно в массиве и сделать ряд соответствующих выводов.

Результаты испытаний на одноплоскостной срез показали более низкую прочность на сдвиг песков, загрязненных мазутом по сравнению с фоновыми пробами. Снижение прочности на сдвиг составило 20% по сравнению с чистым песком. Высоковязкие нефтяные загрязнители такие как мазут, действуют как смазка, позволяя частицам более плавно скользить друг по другу, сближаясь друг с другом. Снижение сцепления также может быть объяснено созданием флокуляционной структуры, что уменьшает удельную площадь поверхности и снижает взаимодействие частиц не подтвердилось для исследуемых проб, подвергшихся влиянию мазута. Преимущественно наблюдалось увеличение сцепления в загрязненных грунтах, что может быть обусловлено более высокой вязкостью нефтяных загрязнителей по сравнению с водой, и, следовательно, их большей способностью выдерживать усилие сдвига.

Аналогичным образом, модуль деформации по результатам компрессионных испытаний в загрязненном песке меньше, чем в чистом на 7% (19,23 МПа и 20,83 МПа соответственно). Это снижение объясняется смазывающими свойствами нефтяного загрязнителя, которые позволяют частицам легко скользить друг по другу, делая структуру грунта более подвижной.

Микроскопические наблюдения согласуются с полученными данными физико-механических свойств. Частицы в загрязненных мазутом образцах были склеены между собой, образуя агрегаты. Такая физическая структура удерживает загрязняющие вещества в микроструктуре грунта. Мазут задерживается и закупоривается в порах, что приводит к снижению гидравлической проводимости в грунте несмотря на то, что сорбируется мазут на песчаных частицах плохо. Также на ограничение миграции влияет образование линз из-за разности в плотности на поверхности линии грунтовых вод, ограничивая дальнейшую миграцию. Что подтверждается количественной разницей содержание мазута по глубине.

Также основываясь на СЭМ-снимки чистого и загрязненного песчаного грунта, можно сделать вывод о причинах увеличения времени при консолидационных испытаниях. Изменение структуры песка препятствует естественным путям фильтрации воды в грунте, что и замедляет процесс консолидации. Кроме того, отмеченные изменения морфологии поверхности зерен, возможное присутствие биотической составляющей, активизация биохимических процессов трансформации минеральной части может создавать условия для повышения роли ползучести скелета в процессе консолидации и увеличении ее времени.

Основной задачей при проектировании и строительстве различных типов гражданских и промышленных сооружений является обеспечение их длительной устойчивости в течение всего периода эксплуатации. Как показали результаты проведенных исследований, выполнение указанной задачи для строительных конструкций, в основании которых залегают нефтезагрязненные песчаные грунты, требует учета влияния нефтяных углеводородов на специфику взаимодействия сооружений с дисперсными отложениями.

Информация об изменениях, происходящих в песчаных грунтах при загрязнении мазутом, имеет решающее значение для решения ряда инженерно-геологических задач.

Загрязнение мазутом изменяет физико-механические свойства песков, такие как прочность, деформируемость, фильтрационная способность, что напрямую влияет на их поведение под нагрузкой и взаимодействие с сооружениями.

При проведении инженерно-геологических изысканий необходимо учитывать возможное загрязнение песков и его влияние на их свойства. Это позволяет определить пригодность грунтов для строительства и выбрать оптимальные типы фундаментов и конструкции сооружений.

Так, например, при расчете несущей способности и осадок фундаментов необходимо учитывать снижение прочности и увеличение деформируемости загрязненных песков. Это позволяет обеспечить надежность и устойчивость сооружений и избежать неравномерных осадок и возникновение трещин в конструкциях.

Несущая способность неглубоких фундаментов на загрязненных нефтью песках значительно снижается из-за изменения геотехнических свойств. Nasr (2016) изучил влияние ленточных фундаментов на загрязненные нефтью почвы и показал, что при увеличении процентной доли из-за загрязнения несущая способность снижается, а величина осадки основания увеличивается. В этом исследовании были проведены испытания основания на гребне песчаного склона, загрязненного нефтью. Результаты показали, что влияние угла наклона на коэффициент несущей способности уменьшается и более выражен в случае загрязненного, чем в случае чистого песчаного склона. Кроме того, движение загрязненных нефтью частиц песка к поверхности склона увеличилось (Nasr, 2016).

Hajiani (2021) и Abtahi (2018) обнаружили, что увеличение глубины и процента загрязнения влияет на распределение нагрузки и приводит к снижению несущей способности. Отмечается, что увеличение глубины загрязнения снижает несущую способность в большей степени, чем увеличение загрязнения.

Помимо фундаментов неглубокого заложения, изменение свойств загрязненных грунтов может повлиять на эксплуатационные характеристики несущих конструкций. Wegian (2010) провел оценку влияния утечки нефти из трубопровода вблизи фундамента моста, опирающегося на буронабивные сваи. Цель исследования состояла в том, чтобы оценить целостность свай фундамента и определить, требуются ли восстановительные работы для обеспечения удовлетворительной работы моста после загрязнения. Численный анализ включал трехмерное конечно-элементное моделирование свайного фундамента. Исследование показало, что загрязнение песком может привести к увеличению деформации моста. Для свай было предсказано значительное увеличение изгибающего момента до 48%. Однако, в исследованных условиях несущая способность свай не была превышена.

В статье (Alfach, 2020) обсуждается, как нефтяное загрязнение ухудшает геотехнические характеристики свайных фундаментов мостов, оказывая значительное влияние на внутренние усилия и смещения в зависимости от интенсивности и глубины загрязнения. Исследование показало, что интенсивность нефтяного загрязнения существенно влияет на внутренние усилия в сваях и смещения грунта и свай, а также загрязнение нефтью в большей степени влияет на смещение грунта и свай по сравнению с внутренними силами, возникающими в сваях. Стоит отметить, что не существует четкой постоянной связи между увеличением процента загрязнения нефтью и обоими показателями поведения фундамента

(внутренними усилиями свай и смещениями), что может быть объяснено рядом факторов, таких как механизм заполнения пустот в грунте, различное смазывание частиц и ограничения многофазного потока это приводит к неравномерному распределению давления в процессе загрузки.

Как и в случае с фундаментами неглубокого заложения, глубина нефтяного загрязнения оказывает более существенное влияние на смещение грунта под сваями.

Эти и другие исследования показывают, что изменение свойств песчаных грунтов в результате нефтяного загрязнения могут повлиять на проектирование и технического обслуживания сооружений, построенных на данных грунтах.

Как уже отмечалось, нахождение мазута в песчаных грунтах уменьшает водопроницаемость песка. Это необходимо учитывать при проектировании дренажных систем, оценке распространения загрязняющих веществ и расчете уровня грунтовых вод.

Полученные данные можно использовать при проектировании дорожных насыпей. Дорожные насыпи, являясь одним из основных элементов дорожного строительства, возводятся преимущественно из песчаных грунтов.

Прочность песка при загрязнении нефтепродуктами снижается, что требует внимания при расчете несущей способности насыпи и увеличении ее размеров для компенсации потери прочности. Мазут снижает водопроницаемость песка, что может привести к накоплению воды в теле насыпи и её размыву. Необходимо проектировать более сложные дренажные системы для обеспечения отвода воды.

Неравномерные осадки могут вызывать деформации дорожного полотна, образование трещин и провалов. Неоднородность свойств грунта может в дальнейшем привести к затруднениям при реконструкции дорожных одежд. Также при внимании к особенностям свойств загрязнённого песка, в некоторых случаях возможно применение специальных технологий, направленных на улучшение свойств загрязненного песка (например, добавление цемента, извести).

Уменьшение угла внутреннего трения приведет к тому, что откосы насыпи будут менее устойчивыми к оползням и обрушениям. Это потребует проектирования более пологих откосов, что увеличит объем насыпи и затраты на ее строительство. При проектировании насыпей необходимо разрабатывать адаптивные конструктивные решения, которые учитывают неоднородность и изменчивость свойств загрязненного песка и позволяют корректировать конструкцию в ходе строительства и эксплуатации.

Особое внимание необходимо уделять проектированию резервуаров для хранения нефтяных углеводородов, преимущественно на водонасыщенных песчаных грунтах. Учет

снижения физико-механических параметров предотвратит недопустимые осадки и разрушение конструкции.

Для успешного решения инженерных задач и прогнозирования рисков при проектировании необходимо проводить расчеты с учетом измененных прочностных и деформационных характеристик.

Важно учитывать процесс трансформации свойств при оценке грунтов в условиях длительного загрязнения нефтепродуктами. Факторы окружающей среды обладают способностью изменять физические и химические характеристики углеводородных соединений в грунте путем сорбции, химической реакции с существующими в грунтах веществами, микробиологического разложения, а также растворения в воде. Поэтому в дополнение следует тщательно изучать изменения состава и строения минеральной части грунтов, загрязненных углеводородами.

Как уже было отмечено угол внутреннего трения, а также сцепление, обусловленное взаимодействием частиц, играют важную роль в определении физико-механических характеристик грунтов. Необходимо проводить более детальные исследования на отличия значений в зависимости от глубины и концентрации нефтяных углеводородов, а также особое внимание уделять изменению скорости этих значений.

Еще одним из важных направлений является создание моделей для прогнозирования миграции, загрязняющих веществ, особенно в зависимости от глубины. При инженерно-геологических расчетах следует учитывать влияние уровня грунтовых вод и загрязнения.

Помимо более детального изучения физико-механических свойств грунтов в дальнейшем необходимо изучение возможного влияния микробиологической составляющей на конструкционные материалы. А именно изучение механизмов биокоррозии при использовании территории с нефтяным загрязнением. С помощью конфокального лазерного микроскопа возможно будет проводить наблюдения за распределением нефтяных пленок вокруг частиц, а также количество микроорганизмов при использовании люминесцентных красителей.

Заключение

Особенности преобразования и миграции нефтяных углеводородов в подземной среде определяются их физическими и физико-химическими свойствами: плотностью, вязкостью, растворимостью в воде, испаряемостью, способностью к сорбции на поверхности минеральных частиц.

Миграция нефтяных углеводородов носит сложный многофазный характер. Сорбция частицами грунта является одним из наиболее важных факторов, влияющих на перенос и распределение органических загрязнителей. Однако сорбционная способность в песчаных грунтах незначительна, а при повышении влажности грунтов снижается еще больше. Нефтяные углеводороды образуют плавающую линзу, поэтому особое внимание стоит уделять колебанию уровня грунтовых вод. Сильновязкие нефтепродукты в результате длительного загрязнения могут мигрировать вниз по разрезу на значительную глубину, накапливаясь на водоупорах.

Влияние нефтяных углеводородов на одни и те же показатели, характеризующие состав, строение и свойства грунтов отличается в разных исследованиях на количественном и качественном уровнях, что связано не только с типом загрязняющего нефтепродукта, но и с постановкой экспериментов, а также длительностью изучаемых воздействий.

Исследования влияния нефтяных углеводородов на физико-механические свойства песчаных грунтов были основаны на методах изучения дисперсных грунтов, используемые при инженерно-геологических изысканиях, дополнительно применялась сканирующая электронная микроскопия.

В соответствии с полученными данными мазутное загрязнение прослеживалось в пределах всей глубины исследования, оказывая закономерное влияние на параметры физико-механических свойств. Присутствие мазута в песках снижает угол внутреннего трения при некотором повышении сцепления грунта в результате изменения соотношения инертных частиц и структуры грунта. Также было отмечено уменьшение времени сдвиговых испытаний загрязненного песка при росте деформаций ползучести. Отмечается уменьшение модуля деформации, что свидетельствует об увеличении сжимаемости загрязненного грунта.

Подобные изменения объясняются результатами микроскопии, которые выявили изменения в структуре песчаных грунтов, морфологии поверхности, образования вторичных минералов и признаков активизации микробиологической деятельности. Так, зафиксировано формирование ямок на поверхности минеральных зерен, а также образование агрегатов и изменение микроструктуры грунта.

Полученные результаты подчеркивают необходимость учета изменений параметров свойств песков при их загрязнении мазутом на значительную глубину, особенности и интенсивность этих процессов с учетом длительности загрязнения в массиве при решении различных инженерно-геологических задач.

Список литературы

- 1) Агибалова, Н. Н. Технология и установки переработки нефти и газа. Свойства нефти и нефтепродуктов: учебное пособие / Н. Н. Агибалова. — Санкт-Петербург: Лань, 2020. — 124 с.
- 2) Андреева Т. В., Балыкова С. Д., Барыкина О. С. Инженерно-геологическая характеристика озерно-ледниковых песчаных отложений Северо-запада Восточно-европейской платформы //ББК 26.3 (4Беи) я43 П78. 2018. — С. 202.
- 3) Бочаров, В. Л. Мониторинг природно-технических экосистем / В. Л. Бочаров, Ю. М. Зинюков, Л. А. Смоляницкий. — В.: Истоки, 2000. — 226 с.
- 4) Бракоренко Н.Н., Емельянова Т.Я. Влияние нефтепродуктов на петрографический состав и физико-механические свойства песчаноглинистых грунтов (на примере г. Томска) // Вестник Том. гос. ун-та. — 2011. — № 342. — С. 197–200.
- 5) Брянская А. В. и др. Теоретические и практические аспекты проблемы биологического окисления углеводов микроорганизмами //Вавиловский журнал генетики и селекции. — 2014. — Т. 18. — №. 4/2. — С. 999-1012.
- 6) Велин А. С. Особенности миграции углеводов в грунтах зоны аэрации и подземных водах в местах расположения крупных нефтехранилищ //Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2018. — №. 1. — С. 142-147.
- 7) Геннадиев А. Н. и др. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) //Почвоведение. — 2015. — №. 10. — С. 1195-1209.
- 8) Гольдберг В. М. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия / В. М. Гольдберг и др. — М.: Наука, 2001. — 125 с.
- 9) Гольдберг В.М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / В.М.Гольдберг, С.Газда. М.: Недра,1984. 262 с.
- 10) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 лист Р-(35), 36 (Петрозаводск).
- 11) Дашко Р.Э. Инженерно-геологические аспекты негативных последствий контаминации дисперсных грунтов нефтепродуктами / Р.Э.Дашко, И.Ю.Ланге // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 624-630.
- 12) Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота // Санкт-Петербург, Институт «ПИ Геореконструкция», 2014, 279 с.
- 13) Дашко Р.Э., Ланге И. Ю. Прогнозирование изменения несущей способности песчано-глинистых грунтов в процессе их контаминации нефтепродуктами / Записки Горного института. СПб. 2015. №211. С.16-21.

- 14) Казенников А.П. Исследование физико-механических свойств грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Моск. гос. ун-т природообустройства. – М., 2009.
- 15) Какурина, М.О. Особенности состава и строения водно-ледниковых песчаных грунтов / М.О. Какурина, С.Д. Балыкова // Инженерные изыскания в строительстве: Мат-лы. седьмой научно-практической конференции молодых специалистов. – М.: ПНИИИС, 2011. – С. 12–16.
- 16) Кравцова О. Н. и др. Влияние загрязнения нефтепродуктами на количество незамерзшей воды и фильтрационные свойства грунтов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2005. – №. 1. – С. 74-77.
- 17) Левкин Ю. М. и др. Изд-во Петрозаводск: Петрозаводский Гос. – 2002.
- 18) Мироненко В. А. Динамика подземных вод: учебник. – 3-е изд., стер. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2001. – 519 с.
- 19) Осовецкий Б.М., Растегаев А.В., Ибламинов Р.Г., Каченов В.И., Ядзинская М.Р. Изучение влияния масла моторного, как поровой жидкости на прочностные свойства песков // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4
- 20) Плотникова И. Н. Фракционный состав нефти и методы его изучения // Казань: Казанский ун т. – 2012.
- 21) Путилина В.С., Галицкая И.С., Юганова Т.И. Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы.– 2019.- №108.- С.1-112.
- 22) Румынин В. Г Теория и методы изучения загрязнения подземных вод: Учебник для вузов. – СПб.; Наука, 2020. – 559 с.
- 23) Румынин В. Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. – СПб.: Наука, 2011. – 1160 с.
- 24) Рябов В. Д. Химия нефти и газа: учебное пособие // М.: ИД «ФОРУМ» – 2009. – Т.336 с.: ил.
- 25) Серба, Б.И. Инженерно-геологические свойства грунтов Карелии / Б.И. Серба. – Петрозаводск: Карелия, 1975.
- 26) Середин В.В., Ядзинская М.Р. Закономерности изменений прочностных свойств глинистых грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Инженерная геология. – 2014. – № 2. – С. 26–33.

- 27) Тимергазина И. Ф., Переходова Л. С. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. №1.
- 28) Уханов А. П. Эксплуатационные материалы / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, А. А. Глущенко, А. Л. Хохлов. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022
- 29) Abdul A. S. Migration of petroleum products through sandy hydrogeologic systems //Groundwater Monitoring & Remediation. – 1988. – Т. 8. – №. 4. – С. 73-81.
- 30) Abousnina R. M. et al. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand //Soil and Sediment Contamination: An International Journal. – 2015. – Т. 24. – №. 8. – С. 833-845.
- 31) Akpokodje O. I., Juwah H. O., Uguru H. Impacts of petroleum spills on geotechnical properties of soils: A review //Journal of Engineering Innovations and Applications. – 2022. – Т. 1. – №. 1. – С. 1-6.
- 32) Al-Adili A., Alsoudany K. Y., Shakir A. Investigation of crude oil pollution effect on stiffness characteristics of sandy and gypseous soil //Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2017. – Т. 54. – С. 276-282.
- 33) Al-Sanad H. A., Eid W. K., Ismael N. F. Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand //Journal of geotechnical engineering. – 1995. – Т. 121. – №. 5. – С. 407-412.
- 34) An S. et al. Complex behavior of petroleum hydrocarbons in vadose zone: A holistic analysis using unsaturated soil columns //Chemosphere. – 2023. – Т. 326. – С. 138417
- 35) Aziz Z. S. et al. Bacterial biodegradation of oil-contaminated soil for pollutant abatement contributing to achieve sustainable development goals: A comprehensive review //Results in Engineering. – 2024. – С. 102083.
- 36) Balseiro-Romero M., Monterroso C., Casares J. J. Environmental fate of petroleum hydrocarbons in soil: review of multiphase transport, mass transfer, and natural attenuation processes //Pedosphere. – 2018. – Т. 28. – №. 6. – С. 833-847
- 37) Bennett P. C. et al. Silicates, silicate weathering, and microbial ecology //Geomicrobiology Journal. – 2001. – Т. 18. – №. 1. – С. 3-19.
- 38) Bennett P. C., Hiebert F. K., Choi W. J. Microbial colonization and weathering of silicates in a petroleum-contaminated groundwater //Chemical Geology. – 1996. – Т. 132. – №. 1-4. – С. 45-53.
- 39) Berisso F. E. et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil //Soil and Tillage Research. – 2012. – Т. 122. – С. 42-51

- 40) Chew S., Lee C. Simple shear behaviour of palm biodiesel contaminated soil //J Eng Appl Sci. – 2010. – T. 5. – №. 2. – C. 6-9.
- 41) Evgin E., Das B. M. Mechanical behavior of an oil contaminated sand //Mediterranean conference on environmental geotechnology. – 1992. – C. 101-108.
- 42) Haghsheno H., Arabani M. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review //Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – T. 29. – №. 22. – C. 32670-32701.
- 43) Hasan R. A. Evaluating the impact of light crude oil contaminations on geotechnical behaviors of the soil //Sciences. – 2021. – T. 19. – №. 2. – C. 143-157.
- 44) Hiebert F. K., Bennett P. C. Microbial control of silicate weathering in organic-rich ground water //Science. – 1992. – T. 258. – №. 5080. – C. 278-281.
- 45) Ijimdiya T. S., Igboro T. The compressibility behavior of oil contaminated soils //Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2012. – T. 17. – №. 10. – C. 3553-3562.
- 46) Khamehchiyan M., Charkhabi A. H., Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils //Engineering geology. – 2007. – T. 89. – №. 3-4. – C. 220-229.
- 47) Lingling L., Zhenmin M., Liang Z. Study on migration prediction of petroleum hydrocarbon contaminants in groundwater system //2009 Second International Conference on Environmental and Computer Science. – IEEE, 2009. – C. 279-283.
- 48) Lo I. M. C., Hu L. M. Long-term migration of light nonaqueous-phase liquids in two unsaturated soils: Clayey silt and fine sand //Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management. – 2004. – T. 8. – №. 4. – C. 228-237.
- 49) Ostovar M. et al. Effects of crude oil on geotechnical specification of sandy soils //Soil and Sediment Contamination: An International Journal. – 2021. – T. 30. – №. 1. – C. 58-73.
- 50) Perkins S. W., Gyr P., James G. The influence of biofilm on the mechanical behavior of sand //Geotechnical Testing Journal. – 2000. – T. 23. – №. 3. – C. 300-312.
- 51) Rajabi H., Sharifipour M. Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooh sand //European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2019. – T. 23. – №. 11. – C. 1351-1367.
- 52) Rajabi H., Sharifipour M. Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review //Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – T. 78. – C. 3685-3717.

- 53) Ren X. et al. Sorption, transport and biodegradation—an insight into bioavailability of persistent organic pollutants in soil //Science of the total environment. – 2018. – Т. 610. – С. 1154-1163.
- 54) Rivett M. O. et al. Review of unsaturated-zone transport and attenuation of volatile organic compound (VOC) plumes leached from shallow source zones //Journal of contaminant hydrology. – 2011. – Т. 123. – №. 3-4. – С. 130-156.
- 55) Schwille F. Groundwater pollution in porous media by fluids immiscible with water //Science of the Total Environment. – 1981. – Т. 21. – С. 173-185.
- 56) Shin E. C., Das B. M. Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand //Advances in unsaturated geotechnics. – 2000. – С. 142-152.
- 57) Zahermand S., Vafaeian M., Hosein Bazyar M. Analysis of the physical and chemical properties of soil contaminated with oil (petroleum) hydrocarbons //Earth sciences research journal. – 2020. – Т. 24. – №. 2. – С. 163-168.

Нормативные документы

- 58) ГОСТ 12248.1-2020 Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
- 59) ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия
- 60) ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- 61) ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ.
- 62) ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
- 63) ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
- 64) ГОСТ Р 54476-2011 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик сопротивляемости сдвигу грунтов в дорожном строительстве. 2012.
- 65) СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.01-83 – М:Стандартинформ, 2016.-220 с.
- 66) СП 28.13330.2017 СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии (с изменениями №1, №2)

Приложения

Приложение 1. Ведомость результатов лабораторных определений физических свойств грунтов

Номер сважины	Глубина отбора пробы, м	Гранулометрический состав, размер частиц в мм, содержание фракции в %.											Естественная влажность W , д.е.	Показатель текучести I_L , д.ед	Характеристика пластичности			Коэффициент водонасыщения S_r , д.ед	Плотность, г/см ³			Коефф. пористости e , д. ед.	Пористость n , д.ед	Наименование грунта
		20-10	10-5	5-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	0.01-0.002	<0.002			граница текуч. W_L , д.ед	граница раскат. W_p , д.ед	число пластич. I_p		частиц грунта, ρ_s	грунта, ρ	сухого грунта, ρ_d			
Ш.605	0,5-0,6					0,2	4,5	36,9	26,5	19,7	11,3	0,9	0,235					0,998	2,66	2,02	1,64	0,626	0,39	Песок пылеватый
Ш.605	1,0-1,1			0,2	0,1	4,5	35,6	51,5	6,2	1,9	0,0	0,0	0,197					0,891	2,65	2,00	1,67	0,586	0,37	Песок мелкий
Ш.606	0,2-0,3					0,3	6,3	41,6	31,3	1,6	17,9	1,0	0,308					0,792	2,66	1,71	1,31	1,035	0,51	Песок пылеватый
Ш.606	0,6-0,7			0,3	0,6	1,3	10,3	33,1	27,7	19,7	6,1	0,9	0,214					0,990	2,66	2,05	1,69	0,575	0,37	Песок пылеватый
Ш.606	1,1-1,2					0,3	2,2	35,5	44,5	12,6	4,9	0,257	1,58	0,220	0,156	0,064	0,994	2,70	2,09	1,59	0,698	0,41	Супесь пылеватая ТЕК	
Ш.606	1,4-1,5					0,4	10,8	38,3	31,7	13,1	4,4	1,3	0,269					0,991	2,66	1,96	1,54	0,722	0,42	Песок пылеватый