

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Мосина Анна Сергеевна

**Прогноз изменения напряженно-деформированного состояния
многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства
подземных резервуаров для захоронения отходов бурения (на примере
Харасавэйского месторождения)**

Специальность 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научные руководители:

доктор геолого-минералогических наук,

профессор В.Т. Трофимов;

кандидат технических наук

А.Ю. Мирный

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения...	10
1.1. История инженерно-геологического изучения территории Харасавэйского месторождения.....	10
1.2. Физико-географические условия территории Харасавэйского месторождения...	13
1.3. Инженерно-геологическая характеристика грунтов территории Харасавэйского месторождения.....	21
1.3.1. Основные черты строения верхней части геологического разреза территории Харасавэйского месторождения.....	21
1.3.2. Состав, строение, состояние и свойства грунтов верхней части геологического разреза территории Харасавэйского месторождения.....	26
1.4. Мерзлотные и гидрогеологические условия территории Харасавэйского месторождения.....	61
1.5. Современные экзогенные геологические процессы и явления на территории Харасавэйского месторождения.....	89
Глава 2. Грунтовые толщи территории Харасавэйского месторождения.....	100
2.1. Границы многолетнемерзлой грунтовой толщи территории Харасавэйского месторождения.....	100
2.2. Типизация многолетнемерзлых грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения.....	111
2.2.1. Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения по первой группе признаков.....	113
2.2.2. Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения по второй группе признаков.....	116
2.2.3. Общая систематизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения.	118
Глава 3. Физико-механические свойства грунтов, слагающих многолетнемерзлые грунтовые толщи Харасавэйского месторождения.....	126
3.1. Методика подготовки образцов.....	130
3.2. Методика испытаний методом трехосного сжатия.....	148
3.3. Результаты испытаний методом трехосного сжатия.....	161
3.3.1. Результаты испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия.....	161
3.3.2. Результаты испытаний льда методом трехосного сжатия.....	181

3.4. Исследования структурно-текстурных особенностей льда.....	220
Глава 4. Прогноз изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения.....	243
4.1. Технология строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения.....	243
4.2. Методика составления прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения.....	249
4.3. Постановка задачи численного моделирования изменения напряженно- деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения.....	255
4.4. Результаты прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения.....	261
Заключение.....	
Список литературы.....	278
Приложения.....	288
Приложение 1. Состав и содержание водорастворимых солей в грунтах салехардской свиты Харасавэйского месторождения.....	288
Приложение 2. Грунтовые толщи территории Харасавэйского месторождения.....	296
Приложение 3. Условия залегания и характеристики пластовых льдов территории Харасавэйского месторождения	314
Приложение 4. Показатели состава, строения и свойств мерзлых грунтов.....	316
Приложение 5. Геологические разрезы Харасавэйского месторождения.....	318
Приложение 6. Зависимость модуля сдвига льда от скорости деформирования по результатам испытаний трехосного сжатия.....	324
Приложение 7. Состав отходов бурения, подлежащих захоронению в подземные резервуары на территории Харасавэйского месторождения.....	325

Введение

Актуальность работы. Харасавэйское месторождение находится в прибрежной части Северного Ямала и является уникальным по запасам газа. В результате бурения скважин различного назначения на его территории образуются несколько сотен тысяч кубометров отходов, обращение с которыми становится серьезной проблемой для недропользователя. Одним из вариантов ее решения является захоронение отходов бурения в подземные резервуары, сооружаемые в многолетнемерзлых грунтах. Строительство подземных резервуаров ведут с поверхности через скважину, по которой в мерзлый массив подают теплоноситель. В результате водно-теплового воздействия разрушаются криогенные связи в грунтах, оттаявший грунт опускается на дно выработки, откуда его с помощью эрлифта поднимают на поверхность. Сформированную емкость используют для конечного размещения отходов бурения, которые с течением времени промерзают за счет теплового взаимодействия с окружающими мерзлыми грунтами. Особенностью данной технологии является ее высокая зависимость от инженерно-геологических условий района реализации, в связи с чем необходимо детальное изучение грунтовых толщ территории и выявление среди них благоприятных для строительства подземных резервуаров.

Заполнение готовых подземных резервуаров производят по мере образования отходов бурения. Этот процесс может длиться несколько лет, пока не будет завершено бурение всех скважин, и месторождение не будет готово к запуску. В течение этого времени свод и стенки подземного резервуара остаются в незакрепленном состоянии, что приводит к существенному изменению напряженно-деформированного состояния вмещающей грунтовой толщи. Его прогноз необходим для надежного функционирования сооружения и предотвращения опасных техногенных геологических процессов.

Цель работы – прогноз изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения на территории Харасавэйского месторождения.

Основные задачи исследования

1. Охарактеризовать инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения.
2. Провести типизацию многолетнемерзлых грунтовых толщ Харасавэйского месторождения и на ее основе выделить благоприятные грунтовые толщ для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения.
3. Определить показатели физико-механических свойств основных типов грунтов, слагающих благоприятные для строительства подземных резервуаров грунтовые толщ.

4. Разработать методику прогноза изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения.

5. Выполнить прогноз изменения напряженно-деформированного состояния благоприятных грунтовых толщ для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения до введения их в эксплуатацию.

Объект исследования. Многолетнемерзлые грунтовые толщи территории Харасавэйского месторождения.

Предмет исследования. Знание о влиянии строительства подземных резервуаров на изменение напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ Харасавэйского месторождения.

Основные методы исследований. Определение нижней границы грунтовой толщи в программных комплексах Simulia Abaqus и Heat методами конечных элементов и конечных разностей соответственно. Проведение типизации грунтовых толщ территории на основе подхода, предложенного В.Т. Трофимовым, с использованием двухрядной, перекрестной систематизации и признаков, отражающих состав, строение и современное состояние грунтовых толщ. Изготовление образцов льда методом послойного намораживания. Определение показателей физико-механических свойств мерзлых грунтов, в том числе льда, методом трехосного сжатия по быстрой кинематической и длительной статической схемам нагружения. Расчет изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ методом конечных элементов в программном комплексе Simulia Abaqus.

Научная новизна

1. Обобщены характеристики состава, строения, состояния и свойств грунтов Харасавэйского месторождения. На их основе проведена типизация многолетнемерзлых грунтовых толщ Харасавэйского месторождения в связи с планируемым строительством подземных резервуаров для захоронения отходов бурения.

2. Установлены благоприятные грунтовые толщи Харасавэйского месторождения для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения.

3. Получены показатели физико-механических свойств льда методом трехосного сжатия для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ территории.

4. Разработана методика прогноза изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения.

5. Выполнен прогноз изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ Харасавэйского месторождения, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения на основе численного моделирования с учетом степени засоленности мерзлых песчаных грунтов и залегания в них пластовых льдов разного состава и строения.

Защищаемые положения

1. По результатам изысканий и опубликованным данным охарактеризованы инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения для целей строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения. Сложность инженерно-геологических условий территории обосновывается изменчивостью состава и строения вмещающих подземные резервуары грунтовых толщ, которая проявляется в различной льдистости и степени засоленности мерзлых грунтов, наличии высокоминерализованных вод и мощных пластовых льдов разного состава, а также необходимостью выбора строительных площадок с плоским рельефом без развития опасных геологических процессов.

2. На основе анализа геологического строения Харасавэйского месторождения проведена общая характеристика и систематизация многолетнемерзлых грунтовых толщ территории, нижняя граница которых по результатам численного моделирования установлена на глубине 70 м; среди них выделены толщи, благоприятные для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения по признакам, отражающим состав, строение и современное состояние вмещающих их грунтов.

3. Установившееся течение льдов с 20% минеральных примесей пылеватого песка, моделирующих пластовые льды, встречающиеся в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения, развивается с меньшими скоростями деформации при постоянном уровне девиатора напряжений, чем это наблюдается у пластовых льдов без примесей.

4. При строительстве подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения не прогнозируется развитие пластических зон при условии оптимальной формы емкости. Размещение подземных резервуаров в мерзлых средnezасоленных песчаных грунтах не приведет к изменению их формы и значительному оседанию земной поверхности над ними, однако спровоцирует большее снижение объема емкостей с течением времени по сравнению с сооружением подземных резервуаров только в слабозасоленных разностях. Наибольшее снижение объема подземных резервуаров с течением времени прогнозируется при их строительстве в грунтовых толщах, содержащих мощные слои чистого льда, в особенности в сочетании со средnezасоленными песчаными грунтами. При залегании мощного чистого льда в своде

подземных резервуаров с течением времени произойдет максимальное изменение их формы и оседание земной поверхности над ними.

Практическая значимость. Применяемый в работе принцип типизации грунтовых толщ территории и выделение среди них благоприятных для строительства подземных резервуаров позволяют распространить его на другие регионы в пределах криолитозоны. Использование полученных показателей физико-механических свойств трех типов льда возможно при выполнении проектирования подземных резервуаров во льдах, в том числе искусственно намороженных. Предложенная методика прогноза изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ может быть применена для прогноза эксплуатационной надежности подземных резервуаров в многолетнемерзлых грунтах. Полученные результаты численных расчетов изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ Харасавэйского месторождения могут помочь в составлении графиков заполнения подземных резервуаров отходами бурения.

Апробация работы и публикации. Основные результаты обсуждались на V Международной учебно-практической молодежной конференции по геотехнике (Москва, 2019), Международной научно-практической конференции «Физико-химическая геотехнология: инновации и тенденции развития» (Москва, 2020), Общероссийской научно-практической конференции и выставке «Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения» (Москва, 2022). Основные выводы изложены в журнале «Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)» (2021, № 3-1), индексируемом в базе данных Scopus; в журнале «Инженерная геология» (2020, № 2), входящем в список RSCI; в журнале «Грунтоведение» (2022, № 1(18)), входящем в перечень ВАК; в статьях, опубликованных в сборниках трудов международных и всероссийских научных конференций: «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии» (2021), «Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения» (2022), XXIII Сергиевские чтения «Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения» (2022).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 7 приложений и списка литературы из 115 наименований. Работа изложена на 325 страницах машинописного текста, включает 149 рисунков и 46 таблиц.

Фактический материал: данные бурения около 105 скважин по территории всего Харасавэйского месторождения и архивные данные (2013-2021); построенные инженерно-геологические разрезы; фондовые данные о составе и свойствах грунтов; результаты

испытаний методом трехосного сжатия 17 образцов мерзлых грунтов; 38 образцов трех типов искусственного льда.

Личный вклад автора. Анализ инженерно-геологической информации о грунтах, вскрытых в 105 скважинах, из них по 30 скважинам и опубликованным литературным данным проведено обобщение состава, строения, состояния и свойств грунтов 9 геолого-генетических комплексов. Построение инженерно-геологических разрезов территории. Выполнение типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения и выделение среди них благоприятных для строительства подземных резервуаров. Изготовление образцов трех типов льда. Проведение и обработка испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия. Изучение структурно-текстурных особенностей льда до и после проведения испытаний методом трехосного сжатия. Корректировка методики прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров. Выполнение численных расчетов изменения напряженно-деформированного состояния благоприятных грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары. Участие в полевом сопровождении строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения на территории Харасавэйского месторождения.

Благодарности. Научному руководителю д.г.-м.н., профессору Виктору Титовичу Трофимову за чуткое руководство, ценные советы и замечания, искреннюю поддержку и вдохновение для настоящей работы; научному руководителю к.т.н., доценту Анатолию Юрьевичу Мирному за внимание, конструктивные советы и значительную помощь в ходе выполнения работы; к.г.-м.н., доценту Светлане Казимировне Николаевой за внимательное рассмотрение, содействие работе, материнскую опеку и поддержку; к.г.-м.н., доценту Татьяне Ивановне Аверкиной за помощь в проведении типизации грунтовых толщ исследуемой территории; к.г.н., доценту Юрию Борисовичу Бадю за предоставление большого объема исходных данных по бурению скважин и литературы по территории Харасавэйского месторождения, д. г.-м.н., профессору Юрию Кирилловичу Васильчуку за ценную литературу по особенностям геологического строения Харасавэйского месторождения; к.г.-м.н., доценту Ванде Здиславовне Хилимонюк за ценные советы и идеи в исследовании физико-механических свойств и микростроения искусственных образцов льда; к.г.-м.н., доценту Римме Григорьевне Мотенко за помощь в реализации проведения исследований состава, строения, состояния и свойств мерзлых грунтов; к.г.-м.н., ст.пр. Ларисе Валентиновне Емельяновой за обучение численному моделированию теплового взаимодействия захораниваемых в подземный резервуар отходов бурения с мерзлыми грунтами; к.г.-м.н., с.н.с. Владимиру Евгеньевичу Гагарину и н.с. Денису Максимовичу

Фролову за предоставленную возможность и участие в исследованиях структурно-текстурных особенностей льда в лаборатории кафедры Криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; к.т.н., с.н.с. Валерию Александровичу Агеенко за помощь в проведении испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия; к.т.н. Степану Дмитриевичу Сурину и к.т.н. Олегу Игоревичу Савичу за ценные советы и идеи; к.т.н. Юрию Леонидовичу Филимонову за предоставленную возможность проведения лабораторных испытаний и полевых работ на территории Харасавэйского месторождения; к.г.-м.н., зав. лабораторией изучения состава и свойств грунтов Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН Федору Сергеевичу Карпенко за советы и рекомендации по методике проведения испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия; зав. лабораторией механики мерзлых грунтов и расчета оснований НИИОСП им. Н.М. Герсевича Эрике Станиславовне Гречищевой за идеи и литературу по методике подготовки образцов льда и методу трехосного сжатия мерзлых песчаных грунтов и льда.

Глава 1

Инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения

1.1. История инженерно-геологического изучения территории Харасавэйского месторождения

Изучение многолетнемерзлых грунтов Западного Ямала началось в первой половине XX века. В 1921 г. сотрудниками Плавучего морского научного института в ходе экспедиции были собраны сведения о донных осадках Карского моря [44].

До 1940-х годов на полуострове Ямал проводились единичные маршруты, по данным которых были получены первые представления о четвертичных отложениях и о распространении многолетнемерзлых пород [56]. Материалы по геокриологическим особенностям были собраны Г.Ф. Горобацким, В.Н. Андреевым В.П. Евладовым, Б.М. Житковым.

В 1953-1954 гг. при составлении государственной геологической карты СССР масштаба 1:1 000 000 институтом НИИ геологии Арктики были отсняты северные части полуострова Ямал.

Масштабные геологоразведочные работы 1960-1970-х гг. повлекли за собой открытие крупнейших месторождений. В 1967 г. силами «Главтюменьгеологии» были обнаружены нефтегазовые залежи в прибрежных отложениях юрского и мелового возраста. В 1974 г. открыто Харасавэйское месторождение. Определение границ месторождений и объемов запасов полезного ископаемого способствовало увеличению количества разведочных скважин. В соответствии с постановлениями Министерства нефтяной и газовой промышленности и Министерства геологии и охраны недр начинаются регулярные геофизические исследования, проводится глубоководное бурение в акватории Карского моря по поиску нефтегазовых залежей. Увеличение объемов работ, связанное с разведкой нефти и газа, способствовало накоплению важных инженерно-геологических данных [44].

В 1961 г. кафедра грунтоведения и инженерной геологии геологического факультета Московского государственного университета начала региональные мелкомасштабные инженерно-геологические исследования в пределах Западно-Сибирской плиты. Первоначально исследования проходили на западе и юге плиты, а с 1965 г. охватили и ее северную часть [39]. Инженерно-геологические исследования территории с отбором мерзлого керна проводились в 1970-х годах сотрудниками Тюменской экспедиции МГУ Ю.Б. Баду, Ю.К. Васильчуком, В.Г. Кудряшовым, Г.М. Терешковым, Н.Г. Фирсовым и др.

под руководством В.Т. Трофимова. По результатам исследований были составлены геологические карты, карты мерзлотных условий, геоморфологические карты, гидрогеологические карты, карты инженерно-геологических условий, карты инженерно-геологического районирования. Опубликованы монографии: «Полуостров Ямал» (1975 г.) [677], «Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты» (1977 г.) [66] и др. Результаты этих исследований послужили основой для мелкомасштабных карт мощности многолетнемерзлых пород и их льдистости, которые были изданы в 1985 г.

В 1972 г. научно-производственным объединением «Севморгео» организована экспедиция по инженерно-геологическому исследованию рельефа дна, донных отложений шельфа Карского и Баренцева морей. В 1975 г. на продолжении северо-западных нефтегазоносных площадей Ямала в Карском море обнаружены крупные положительные структуры (позже Русановское и Ленинградское месторождения) [44].

В 1977-1981 гг. Северная инженерно-геокриологическая партия Тюменской комплексной экспедиции ПГО «Главтюменьгеология» провела на территории Харасавэйского месторождения инженерно-геокриологическую съемку масштаба 1:200 000.

С 1975-х гг. ПНИИИС Госстроя СССР проводил детальные инженерно-геологические исследования территории коммуникаций между Бованенковским и Харасавэйским месторождениями.

Северным отделением НИИОСП имени Н.М. Герсеванова на территории пос. Харасавэй проводились исследования засоленных грунтов оснований свайных фундаментов.

ЮжНИИгипрогаз провел поиск местных строительных материалов и источников водоснабжения, а также выявил у мыса Бурунный на мелководье Харасавэйского месторождения запасы строительных материалов [44].

В 1978-1981 гг. Институтом мерзлотоведения СО АН СССР под руководством Н.Ф. Григорьева в прибрежной части западного Ямала проведены геокриологические исследования [44].

Лобоненской геологоразведочной партией по заказу ВНИИГАЗа Министерства газовой промышленности СССР проведено изучение геологического разреза до глубины 270 м прибрежной части Харасавэйского месторождения. Со сплошным отбором мерзлого керна пройдена скважина КТС-8. Описание, отбор и исследование грунтов было проведено Ю.Б. Бадю. В изучении участвовали также Г.И. Дубиков, Н.В. Иванова, В.В. Рогов, В.Г. Чеверев, Е.Н. Чувилин и др. [44].

В 1980-1990 гг. активно велись работы по изучению шельфа юго-западной части Карского моря. С применением геолого-геофизических методов изучались донные отложения, отбирались пробы для лабораторного определения химического состава воды, анализа водных вытяжек, определения физико-механических свойств грунтов и др. По результатам экспедиций составлялись карты районирования и инженерно-геологических условий шельфа юго-западной части Карского моря, в частности, Русановской и Ленинградской нефтегазоносных провинций. Для исследования шельфа Карского моря были организованы крупные экспедиции, такие как Арктическая морская инженерно-геологическая экспедиция, международная экспедиция на научно-исследовательском судне «Дмитрий Менделеев». Также в изучении принимали участие организации ВМНПО «Союзморгео», «Союзморинженергеология», ПО «Арктикморнефтегазразведка» [44].

В 2003 г. коллективом сотрудников ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России было произведено обобщение материалов по инженерно-геологическим и мерзлотным условиям Харасавэйского и Крузенштернского месторождений. В работу были приняты данные по инженерно-геологическим изысканиям ПНИИИСа 1970-х гг., а также материалы ВСЕГИНГЕО, НИИОСП им. Н.М. Герсевича и Тюменской инженерно-геологической экспедиции геологического факультета МГУ. По результатам была выпущена монография «Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштернского газоконденсатных месторождений» [33, 34, 38].

С 2003 г. комплексные инженерно-геологические изыскания на Харасавэйском месторождении возобновились силами ОАО «ВНИПИгаздобыча», ООО «Промнефтегазпроект», ООО «Геострой» и др.

В 2003-2008 гг. инженерные изыскания по объектам обустройства Харасавэйского месторождения проводило ОАО «ВНИПИгаздобыча».

В 2006 г. ООО «ТюменНИИгипрогаз» при участии Ю.Б. Бадю, Ю.К. Васильчука, М.М. Дубина, Г.В. Крылова, Е.Е. Подборного, выпустило монографию «Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения» [44].

В 2008 г. на территории Харасавэйского месторождения были выполнены комплексные инженерно-геологические изыскания, в состав которых вошли:

- работы по созданию комплекта специализированных инженерно-геокриологических карт масштаба 1:25 000, выполненные ООО «Промнефтегазпроект»;
- работы по исследованию современных и выявлению потенциально опасных криогенных процессов Харасавэйского месторождения, выполненные АИО ТюмГНГУ;

- предварительные геофизические исследования кустовых площадок Харасавэйского месторождения, выполненные ОАО «ВНИПИГаздобыча»;
- комплекс горнопроходческих работ параметрического бурения скважин на площадках кустов газовых скважин, выполненные ООО «Геострой»;
- инженерно-геологические изыскания площадок газовых кустов № 1, 2, 6, 8 и трасс линейной инфраструктуры к ним;
- комплекс геофизических исследований площадок кустов газовых скважин № 1, 2, 6, 8, выполненные ООО «Ингеоком»;
- комплекс геофизических исследований, направленных на изучение верхней части геологического разреза территории горного отвода Харасавэйского месторождения, выполненные ООО «Ингеоком».

В 2013 г. ОАО «ВНИПИГаздобыча» провело инженерные изыскания каждой из проектируемых кустовых площадок Харасавэйского месторождения.

В 2015-2016 гг. ООО НТФ «КРИОС» провело комплексные инженерно-геологические изыскания под строительство подземных резервуаров для захоронения отходов бурения до глубины 100 м в пределах трех проектируемых кустовых площадок на территории Харасавэйского месторождения. Проведено подробное изучение инженерно-геологических условий территории.

1.2. Физико-географические условия территории Харасавэйского месторождения

В территориально-административном отношении территория Харасавэйского месторождения относится к Ямальскому району Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области [86].

Территория Харасавэйского месторождения находится в прибрежной западной части Северного Ямала, в районе мыса Харасавэй (рис. 1). На территории месторождения расположен вахтовый поселок Харасавэй, ближайшие населенные пункты: п. Мордыяха – в 70 км и п. Марресале – 140 км от южной границы; п. Тамбей – 170 км от восточной границы месторождения. Площадь Харасавэйского месторождения составляет более 500 км² [86].

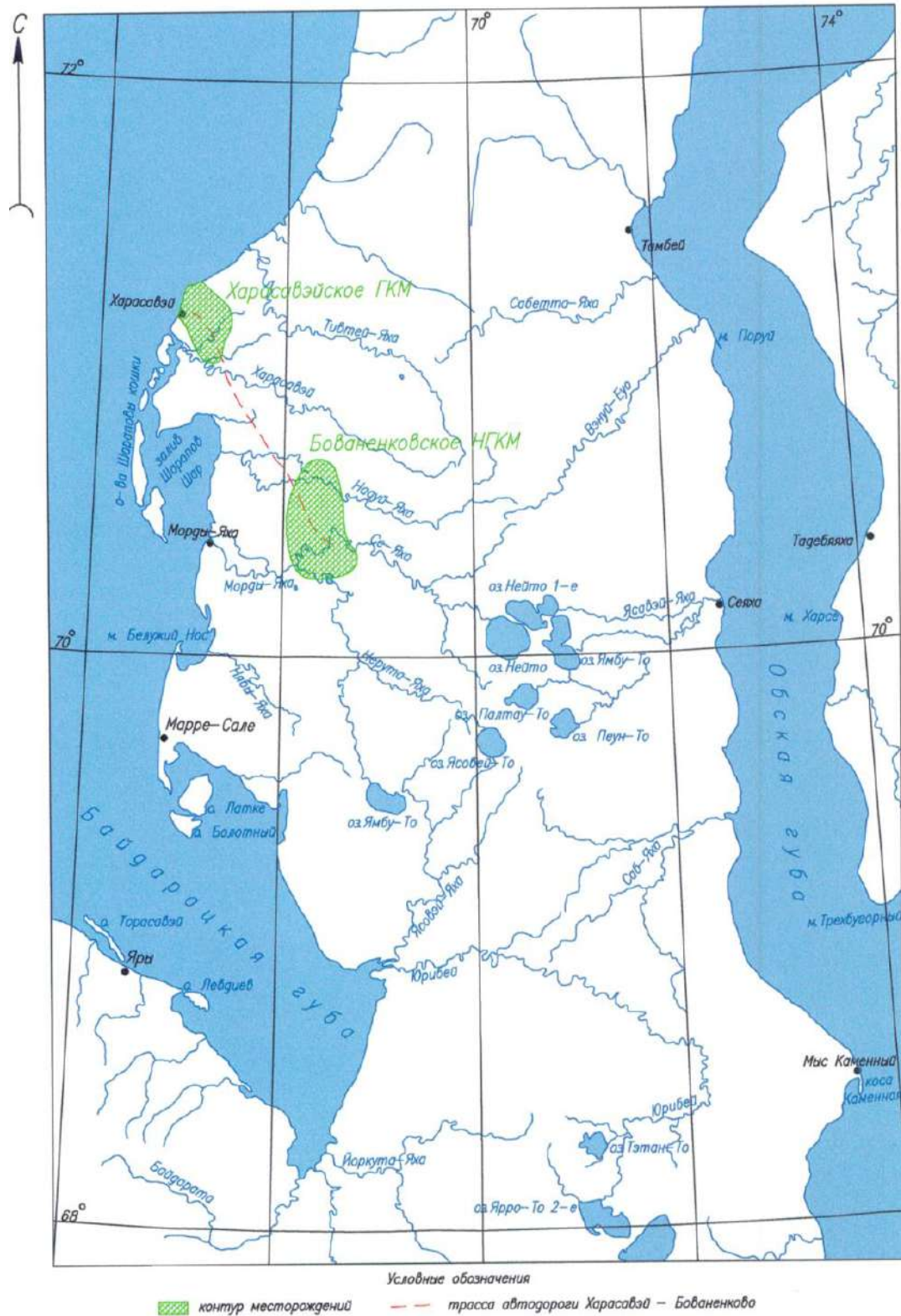


Рис. 1. Схема расположения Харасавэйского месторождения, масштаб 1: 2 000 000 [85]

Территория Харасавэйского месторождения характеризуется плоским и холмистым рельефом, расчлененным овражной и речной эрозией (рис. 2). Северо-восточную часть месторождения занимает поверхность III морской террасы с абсолютными высотными отметками 25-35 м. В центральной части выделяется уровень II морской террасы с

абсолютными отметками 12-25 м. Фрагментарно вдоль побережья, а также в южной части месторождения (междуречье р. Харасавэй и р. Сильяха) выделяется уровень I морской террасы с абсолютными высотами 8-12 м. Самым низким геоморфологическим уровнем террасового комплекса рассматриваемой территории является современная лаида с абсолютными высотами до 5 м. Террасированная поверхность области прорезана речными долинами корытообразной формы. Из менее крупных форм рельефа территории отмечают понижения округлой формы на месте спущенных озерных котловин – хасыреев, в длину достигающие 1,5-2 км, с крутыми бортами высотой до 8-12 м. По большей части они приурочены к междуречьям, но встречаются также на поверхности морских террас [85, 86].

Климат территории Харасавэйского месторождения арктический, характеризуется суровой продолжительной зимой с длительным залеганием снежного покрова, короткими переходными периодами, коротким холодным летом, поздними весенними и ранними осенними заморозками. Климат исследуемой территории складывается под влиянием двух барических максимумов (Азиатского материкового и Атлантического океанического). На равнинную территорию проникают воздушные массы с севера и юга. Близость Карского моря и сильные ветры обуславливают суровость климата. В течение суток возможны резкие изменения температуры воздуха [44, 85, 86].

Самым холодным месяцем является январь: средняя минимальная температура воздуха в январе у мыса Харасавэй составляет -21,8 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает -50,2 °С. Наиболее теплым месяцем года является июль со среднемесячной температурой воздуха плюс 7,3 °С. Абсолютный максимум достигает плюс 30 °С. Заморозки по усредненным данным начинаются в первой половине сентября, а заканчиваются в первой половине июля. Всего наблюдается 56 дней в году без заморозков [44, 85, 86].

Данные о среднемесячных и годовой температуре воздуха приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сведения о температуре воздуха по данным метеостанции Харасавэй, °С [83]

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
МС Харасавэй, мыс												
-21,8	-21,4	-14,2	-12,7	-5,3	+2,1	+7,3	+7,0	+3,5	-3,8	-12,5	-17,6	-7,5



Рис. 2. Рельеф территории Харсавзйского месторождения (фото автора)

Среднегодовое количество атмосферных осадков составляет 298 мм. В годовом ходе осадков минимум наблюдается в феврале и марте (16 мм), максимум приходится на сентябрь (в среднем 40 мм). В целом большее количество осадков выпадает летом,

меньшее – зимой. Более половины всех зимних осадков выпадает в первой половине зимы. Данные о количестве осадков по месяцам и за год приведены в табл. 2 [44].

Устойчивый снежный покров в среднем образуется в третьей декаде сентября. Разрушение снежного покрова обычно происходит в начале июня. Полный сход снежного покрова наблюдается в середине июня. Среднее число дней со снежным покровом составляет 239. Максимальная величина снежного покрова достигается в конце апреля – начале мая. Максимальная высота снежного покрова составляет 48 см, минимальная – 22 см. Плотность снежного покрова высокая, при наибольшей декадной высоте плотность достигает $0,34 \text{ г/см}^3$ [83, 86]. Под воздействием сильных ветров снег сдувается с возвышенностей и перемещается в понижения, где может накапливается мощностью до 4 м [44]. Такое распределение снежного покрова оказывает влияние на изменение деятельного слоя. Если мощность снежного покрова значительна, то сезонное оттаивание начинается позже.

Таблица. 2. Среднемесячное и годовое количество осадков, мм [44]

Январь	18
Февраль	16
Март	16
Апрель	17
Май	22
Июнь	26
Июль	34
Август	36
Сентябрь	40
Октябрь	32
Ноябрь	22
Декабрь	19
Год	298
Количество осадков за год, мм	
в т. ч. твердых	144
смешанных	32
жидких	122
Число дней с осадками за год	
в т. ч. с жидкими	48
с твердыми	98
со смешанными	19
Число дней с осадками > 0,1 мм за год	203
Суточный максимум осадков, мм	40
Средняя продолжительность осадков за год, ч	1646

Наиболее высокая относительная влажность воздуха достигается в начале лета (91%), наименьшая – в феврале (84%). Средняя годовая относительная влажность воздуха составляет 87%.

Среднегодовая скорость ветра равна 6,3 м/с. За год в исследуемом районе

наблюдается 55 дней с сильным ветром (> 15 м/с). Максимальная наблюдаемая скорость ветра на МС Марре-Сале составила 40 м/с. Муссонные ветры обуславливают преобладание юго-восточного и восточного направлений в зимний период времени, северо-западного и северного направлений в летний период [44, 85, 86].

Гидрографическая сеть на территории освоения Харасавэйского месторождения развита хорошо. Избыточное увлажнение, затрудненный дренаж, равнинный рельеф с впадинами и западинами способствует развитию рек, ручьев, озер и болот. Все реки территории принадлежат бассейну Карского моря.

Речная сеть в большей степени развита на юго-восточном участке месторождения, где она представлена относительно крупными реками Харасавэй и Сильяха. На остальной части территории из малых рек можно выделить реки: Нявоталоваяха, Хардьяха, Варкуяха, Мерцятаяха [44, 83, 85, 86].

В низовьях впадающих в море рек наблюдается малый уклон, что способствует подпору пресных вод соленой водой. В результате ветровых нагонов происходит перемещение морской воды вверх по течению некоторых рек.

Основное питание рек осуществляется талыми снеговыми водами, доля которых в общем объеме стока составляет 75–85%. По химическому составу вода в реках пресная, с минерализацией 35–210 мг/л, но в период нагонов ее минерализация может повыситься до величины 5,0–9,0 г/л. По минеральному составу вода относится преимущественно к гидрокарбонатно-натриевому классу. Для большинства рек региона характерны хорошо выработанные долины, достаточно большая глубина вреза и сильная извилистость русла. При этом надпойменные террасы рек территории выражены слабо. Пойменные участки речных долин заболочены, часто в их пределах присутствуют термокарстовые озера [85, 86] (рис. 3).

Особенностью Карского побережья является наличие незначительной глубины подводного склона. Так, на расстоянии около 3 км от берега прослеживается изобата 3 м, а на расстоянии 100 км располагается изобата 20 м. Прибрежная зона Карского моря без льда наблюдается 2-2,5 месяца в году. Льдообразование начинается в конце октября. Очищение от льда наблюдается в середине августа [29] (рис. 4).



Рис. 3. Реки на территории Харасавэйского месторождения и близ него (фото автора)



Рис. 4. Побережье Карского моря территории Харасавэйского месторождения в начале июня (фото автора)

Территория месторождения характеризуется развитием болот преимущественно низинного типа – арктических минеральных и органо-минеральных. Они наиболее часто встречаются в пределах пойм. Чаше развиты пушицево-гипновые болота (характерные для обводненных понижений рельефа) и осоково-сфагновые (на участках меньшей обводненности) [32].

Согласно почвенно-географическому районированию территории России,

местоположение Харасавэйского месторождения относится к Ямальскому низменному округу Северо-Сибирской провинции тундровых глеевых, болотно-тундровых и болотных мерзлотных почв. Основной фон почвенного покрова здесь составляют зональные тундрово-глеевые почвы различной степени оторфованности и оглеения. Совокупность местных факторов почвообразования определяет переувлажненность почв территории, ее высокую заболоченность и преобладание в почвенном покрове полугидроморфных и гидроморфных почв. Основными почвообразовательными процессами в этих условиях являются оглеение, гумусо- и торфообразование, которые осложняются явлениями криотурбации, тиксотропии, солифлюкции, термокарста и ветровой дефляции почв [83].

1.3. Инженерно-геологическая характеристика грунтов территории Харасавэйского месторождения

1.3.1. Основные черты строения верхней части геологического разреза территории Харасавэйского месторождения

В геологическом строении территории Харасавэйского месторождения с поверхности и до глубины 150-160 м принимают участие четвертичные отложения. Они широко распространены и покрывают чехлом всю площадь месторождения. Инженерно-геологическое изучение четвертичных грунтов территории проведено до глубины 70 м (см. главу 2). Соответственно, здесь и далее под верхней частью геологического разреза понималась толща грунтов с поверхности до исследуемой глубины.

Четвертичные отложения территории Харасавэйского месторождения в основном представлены песчаными, супесчаными, суглинистыми и глинистыми грунтами, большая часть которых имеет морской генезис [44, 67]. Последнее подтверждено многочисленными изучениями микро- и макрофауны В.И. Гудиной [31] и др., спорово-пыльцевыми исследованиями отложений А.К. Васильчук, радиоуглеродным датированием органического материала отложений Ю.К. Васильчука, геохимическими исследованиями грунтов Г.И. Дубикова, Ю.Б. Баду и др. [9, 44, 82]. Среди четвертичных отложений верхней части геологического разреза исследуемой территории выделены: морские отложения среднеплейстоценовой салехардской и верхнеплейстоценовой казанцевской свит; отложения серии верхнеплейстоцен-голоценовых морских террас; голоценовые морские, аллювиальные, озерные и болотные отложения.

Среднеплейстоценовые отложения салехардской свиты (m, gmII₂₋₄) распространены повсеместно на территории Харасавэйского месторождения, их кровля залегает на глубине от 12 м до 47 м от поверхности. Мощность толщи до глубины 70 м составляет от 22 м до 58 м [44, 67]. Морской и ледниково-морской генезис салехардской свиты отмечен в работах

В.Т. Трофимова, Ю.К. Васильчука, В.В. Баулина и др. [4, 5, 10, 11, 44, 67], Г.И. Лазукова [46, 47]. Формирование отложений свиты происходило во время повышения уровня моря при последней максимальной стадии ямальской трансгрессии, накапливались мощные толщи глубоководных морских, ледниково-морских осадков. Накопление шло в суровой климатической обстановке, на береговой части территории присутствовали лесотундровые и тундровые ландшафты [44]. В целом салехардская свита на территории Харасавэйского месторождения представлена глинистыми, суглинистыми, супесчаными, песчаными разностями с преобладанием глинистых и суглинистых разностей. Зачастую нижняя часть свиты сложена глинами с примазками и включениями органического вещества. В верхней части салехардской свиты наблюдается снижение дисперсности, чаще она представлена суглинками, местами с редкими, тонкими прослоями песка с примазками и вкраплениями органического вещества. Реже в верхней части свиты залегают опесчаненные разности, переслаивание суглинков, супесей и песков, образование которых связывается с началом обмеления Ямальского бассейна [44, 67, 83, 86].

В геологическом разрезе, преимущественно в низах толщи, встречено небольшое количество грубообломочного материала [73]. Наличие подобных редких включений указывает на ледниково-морской генезис их отложений и объясняется их приносом и вытаиванием из айсбергов, сформировавшихся из льда материкового оледенения берегов Ямальского бассейна [67].

Верхнеплейстоценовые отложения казанцевской свиты ($m, pt III_1$) широко распространены на территории Харасавэйского месторождения, их кровля залегает на глубине от 6 м до 28 м, подошва – от 12 м до 47 м от поверхности. Мощность толщи составляет от 5 м до 40 м.

Формирование отложений казанцевской свиты происходило в морских условиях в регрессивную фазу развития Ямальского бассейна, накапливались глинистые, суглинистые, супесчаные и песчаные отложения с преобладанием супесчаных и песчаных разностей. Отложения казанцевской свиты можно разделить на две пачки – нижняя образовывалась в более глубоководных условиях и сложена супесчано-суглинистыми разностями, верхняя пачка представлена песчаными отложениями. В супесчано-суглинистых отложениях нижней пачки преобладают пылеватые суглинки с горизонтальной слоистостью, присыпками супеси и пылеватого песка, прослоями песка и включениями растительных остатков. Местами вскрыты мощные песчаные отложения от 15-20 до 30-40 м и более. Песчаные разности в основном представлены мелкими и пылеватыми песками косо- и горизонтально слоистыми с включениями растительного детрита и редкими, тонкими прослоями суглинистого материала [44, 67, 83, 86].

Казанцевская свита несогласно залегает на салехардской свите, скважинами вскрыты небольшие размывы в ее основании. Климатические условия накопления нижней части разреза казанцевской свиты соответствуют межледниковому периоду с распространением северо-таежных лесов. Верхняя часть разреза казанцевской свиты формировалась в условиях общего похолодания [44, 67, 83, 86].

Верхнеплейстоценовые морские отложения третьей террасы ($mIII_{2-3}$) распространены преимущественно на северо-западной, северной и северо-восточной частях Харасавэйского месторождения, где выходят на поверхность и хорошо выражаются в рельефе с абсолютными отметками 25-35 м (рис. 5).

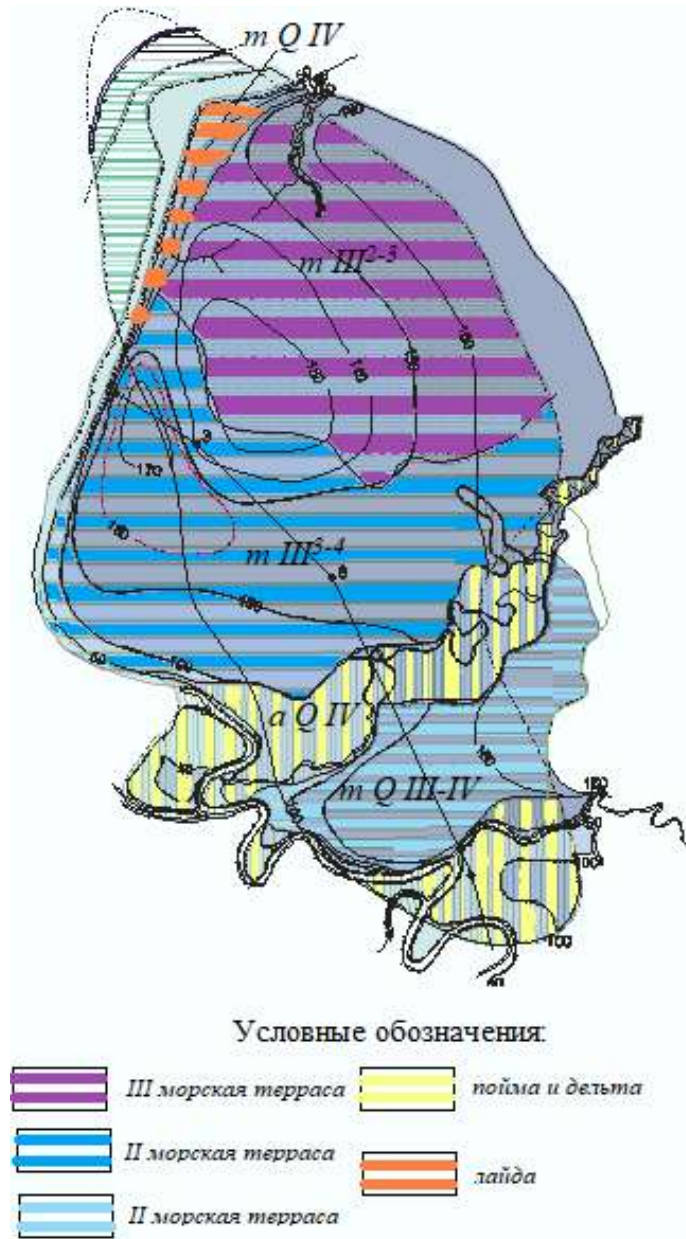


Рис. 5. Геоморфологическая схема Харасавэйского месторождения [44]

Мощность толщи достигает 30 м. Отложения третьей террасы сложно построены и представлены часто переслаивающимися суглинками, супесями и пылеватými песками с преобладанием суглинков. Верхняя и нижняя части толщи местами сложены супесчано-песчаными разностями. Для всех литологических разностей типичны включения органического материала и слоистость. Формирование отложений третьей террасы произошло в зырянско-каргинское время, в период регрессии морского бассейна [67, 83, 86].

Верхнеплейстоценовые морские отложения второй террасы (mIII₃₋₄) встречаются в центральной части Харасавэйского месторождения и примыкают к устьевой части долины реки Харасавэй (см. рис. 2). Отложения выходят на поверхность и слагают вторую морскую террасу с абсолютными отметками 18-25 м. Мощность толщи достигает 15 м. Верхнеплейстоценовые отложения второй террасы представлены сложным и фациально-невыдержанным переслаиванием песков, суглинков и глин с преобладанием тонкодисперсных разностей, вместе с тем вверх по разрезу нередко возрастает роль песков. По разрезу отмечаются включения углистого вещества, растительных остатков, намывного торфа и автохтонных комплексов морских организмов. Отложения второй террасы сформировались в каргинско-сартанское время в условиях обмеления Ямальского бассейна в период похолодания и перехода к тундровым и лесотундровым ландшафтам [44, 67, 83, 86].

Верхнеплейстоцен-голоценовые морские отложения первой террасы (mIII-IV) встречаются в южной части месторождения и занимают меньшую площадь по сравнению с отложениями более древних морских террас (рис. 5). Отложения первой морской террасы выходят на поверхность и слагают поверхность с абсолютными отметками 7-12 м. Мощность толщи достигает 10 м. Морские отложения первой террасы можно подразделить на две пачки. Верхняя пачка имеет мощность около 2,5-3 м и представлена пылеватыми и мелкими песками с прослоями супеси. Нижняя пачка более выдержана по площади, чем первая, и связана с последней постепенным переходом к суглинистым разностям. Ее мощность достигает 6-8 м. Нижняя пачка образовалась в период максимального уровня Ямальского бассейна в более глубоководных условиях под конец сартанского – начало голоценового времени. В отложениях встречены пропластки угольной крошки, включения растительных остатков и фрагменты морских раковин [44, 67, 83, 86].

Верхнеплейстоцен-голоценовые озерные отложения (IV) встречаются локально по всей территории Харасавэйского месторождения, часто занимают значительные площади по побережью пойм современных крупных озер, слагают днища древних озер, сдrenированных озерных котловин. Мощность толщи достигает 5-8 м.

Озерные отложения сложены суглинисто-глинистыми отложениями, реже супесями, пылеватыми и мелкими песками, зачастую заторфованными, с линзами и прослоями суглинков. Все отложения содержат значительное количество органического вещества. Верхняя часть разреза иногда перекрыта торфом [67, 83, 86].

Голоценовые морские отложения лайды (mIV) встречаются вдоль современного побережья Карского моря (рис. 5). Их подошва залегает ниже уровня современного моря, у устья реки Харасавэй она находится на уровне 2,5 м. Мощность голоценовых морских отложений лайды в среднем составляет 7,5 м. Отложения в основном сложены глинистыми и супесчано-суглинистыми разностями с второстепенными прослоями пылеватых песков. Суглинки морских отложений лайды тяжелые, с горизонтальной слоистостью. В них встречены тонкие прослои и линзы органического вещества. Песчаные отложения зачастую заилены, имеют четкую слоистость.

В настоящий момент на побережье Карского моря продолжается накопление осадочного материала на пляже, верхняя часть которого сложена песком и иногда имеет включения гальки и гравия, которые вымываются из более древних грунтов.

Голоценовые аллювиальные отложения (aIV) встречаются в поймах всех рек, наиболее широко развиты в поймах крупных рек Тивтейяха, Сильяха, Нгурияха, Харасавэй и др. Аллювиальные отложения сложены песчаными, гравийно-галечными и супесчано-суглинистыми отложениями с преобладанием последних. Пески мелкие и пылеватые, реже крупные с частыми включениями растительного детрита. Переслаивающиеся суглинисто-песчаные отложения заторфованы. В отложениях часто встречаются прослои и линзы торфа мощностью в среднем от 1 до 5 см, реже до 40 см.

Геологический разрез поймы рек изменяется от их истока к устью. От верховьев к низовьям наблюдается увеличение дисперсности отложений, при этом в среднем и нижнем течениях они имеют значительные включения органического вещества. В пойменных отложениях рек иногда встречаются галька и гравий.

В осадконакоплении речных долин имеют значение сгонно-нагонные процессы, за счет которых в разрезах пойменного аллювия зачастую встречаются остатки морской фауны, не имеющие следов переотложения [86].

Голоценовые болотные отложения (bIV) распространены локально на всех геоморфологических уровнях территории. Мощность толщи в среднем составляет 0,3-0,5 м, реже до 1 м и более. Болотные отложения представлены плохо разложившимся торфом, местами с тонкими минеральными прослоями. Преобладают осоково-моховой и моховой плохо разложившиеся торфы, в нижней части разреза иногда переходящие в

среднеразложившиеся и хорошо разложившиеся. Характерны включения остатков болотной и кустарничковой растительности хорошей сохранности [86].

Наибольшее развитие торфяники имеют в тыловых частях пойм крупных рек и на плоских водораздельных участках. Как правило, они сосредоточены в депрессиях рельефа [83, 86].

1.3.2. Состав, строение, состояние и свойства грунтов верхней части геологического разреза территории Харасавэйского месторождения

В пределах Харасавэйского месторождения обширно развита мощная толща четвертичных отложений, в разрезе которой выделено 9 геолого-генетических комплексов (см. раздел 1.3.1). Анализ инженерно-геологической характеристики грунтов Харасавэйского месторождения проведен по результатам исследований, полученным Лобненской геологоразведочной партией при изучении геокриологических условий Ямала в 1980-х гг., по данным региональных инженерно-геологических исследований полуострова Ямал 1969-1972 гг., по результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных ОАО «ВНИПИгаздобыча», ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект» в 2013-2016 гг. [83, 85, 64-89].

Исследование состава, строения, состояния и свойств грунтов приведенных выше геолого-генетических комплексов проведено по данным:

1) 21 параметрической скважины, пробуренных до глубины 150 м в 2013 г. ООО НТФ «КРИОС» в пределах кустовых газовых площадок при подготовке месторождения к разработке сеноман-аптских залежей по заказу ООО «ВНИПИгаздобыча» [89-109];

2) комплексных инженерных изысканий под подземные резервуары для захоронения отходов бурения на площадках КГС № 4, 5, 13 на глубину 100 м в 2015-2016 гг. ООО НТФ «КРИОС по заказу ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект» [110-112];

3) исследований скважины КТС-8, пробуренной до глубины 270 м Лобненской геологоразведочной партией по заказу ВНИИГАЗа Мингазпрома СССР в 1987 г. [44].

Отложения салехардской свиты

Песчаные разности салехардской свиты на 98-99% состоят из минералов легкой фракции, 85-95% из которых составляет кварц. Тяжелая фракция верхней песчаной части салехардской свиты представлена лимонитом, эпидотом, пироксенами и амфиболами [67]. Глинистые отложения свиты имеют полевошпатово-кварцевый или кварцевый состав пылеватых, тонко- и мелкопесчаных фракций. Тяжелые минералы в верхах свиты до 15 м

представлены лимонитом, эпидотом, пироксенами и амфиболами, ниже присутствуют ильменит, эпидот и амфиболы [44, 67]. Глинистая фракция имеет полиминеральный состав, который включает хлорит, каолинит, гидрослюда и монтмориллонит. Причем последние три глинистых минерала являются преобладающими (табл. 3) [44].

В разрезе салехардской свиты с глубины 57 м присутствуют пирит-марказит в виде округлых мелких стяжений и других образований неправильной формы [44].

Таблица. 3. Минералогический состав отложений салехардской и казанцевской свит по данным скважины КТС-8 [44]

№	Глубина, м	По данным		
		рентгеноструктурного анализа, %	дериватографического анализа (в порядке убывания), %	электронномикроскопического анализа (в порядке убывания)
Казанцевская свита				
1	23,0	Монтмориллонит – 38 Гидрослюда – 31 Каолинит – 31 Хлорит – следы	-	-
2	43,0	Монтмориллонит – 37 Гидрослюда – 34 Каолинит – 29 Хлорит – следы	Гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, хлорит (6-8), гетит	Монтмориллонит, гидрослюда, каолинит
3	48,5	Монтмориллонит – 42 Каолинит – 31 Гидрослюда – 26 Хлорит – 1	-	-
Салехардская свита				
4	60,0	Каолинит – 36 Гидрослюда – 34 Монтмориллонит – 30, хлорит, полевые шпаты – следы	-	-
5	68,0	Гидрослюда – 36 Монтмориллонит – 32 Каолинит – 32, хлорит, полевые шпаты – следы	Гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, хлорит (6-8), гетит	Гидрослюда, монтмориллонит, каолинит

Общее содержание водорастворимых солей в грунтах салехардской свиты достаточно высоко и составляет в среднем 1%, доходя до 2-2,7% в части Харасавэйского месторождения у побережья Карского моря (приложение 1). В составе ионов преобладают натрий и хлор, что доказывает морской генезис отложений свиты [11, 47]. В целом состав солей вытяжки грунтов салехардской свиты хлоридно-натриевый. Водная вытяжка большинства исследованных проб характеризуется слабощелочной реакцией – рН в среднем от 7,2 до 8,3.

Относительное содержание органического вещества в отложениях салехардской свиты для песков в среднем составляет 0,02 д.ед. В глинистых разностях это значение достигает 0,08 д.ед., среднее значение – 0,06 д.ед. (табл. 4).

Отложения салехардской свиты представлены грунтами от пылеватых песков до легких глин. В толще преобладают легкие пылеватые и тяжелые суглинки, а также легкие глины. В целом на территории Харасавэйского месторождения наблюдается увеличение

дисперсности глинистых грунтов свиты вниз по разрезу. Наиболее развиты в отложениях свиты суглинки, они в основном слагают более 70% разреза, глинистые разности имеют меньшее распространение – менее 30%, они чаще всего представлены легкими глинами. Наиболее дисперсными встреченными отложениями являются тяжелые глины. По данным керна скважины КТС-8 тяжелые глины хорошо отсортированы, суммарное содержание частиц менее 0,005 мм в них колеблется от 61 до 85%, количество пылевой фракции от 12 до 38%, доля песчаной фракции незначительна – 1-6% [44, 67].

Глинистые отложения в естественных условиях находятся в агрегированном состоянии. По данным микроагрегатного анализа, глинистые частицы в основном образуют микроагрегаты тонко- и среднепылевого размера (выход глинистой фракции не более 6-7%) [44]. По данным исследований микростроения отложений салехардской свиты по скважине КТС-8 на глубине 68 м отложения являются неоднородными, представлены пылево-глинистыми разностями с редкими включениями песка. Пылево-глинистые отложения слабо агрегированы, глины имеют матричную микротекстуру, встречены включения вивианита. Поры образованы песчаными зернами и песчано-глинистыми агрегатами. На глубине около 70 м встречены участки ожелезнения с конкрециями в диаметре до 0,3 мм. Глинистая фракция является полиминеральной, в ее составе замечены: изометрично-пластинчатая гидрослюда, измененная, по толщине частицы от непрозрачных до прозрачных; монтмориллонит собран в агрегаты в виде мелких тонких чешуек с нечеткими контурами; каолинит представлен в виде псевдогексагональных изометричных пластинок с четкими контурами толщиной до 0,1 мм. В отложениях свиты встречены примеси в виде обломков диатомовых водорослей, кальцита и гидроксидов железа. Микротекстура отложений является микролинзовидной с мелкими волнистыми линзочками до 0,05-0,08 мм в толщине и до 2 мм в длине, которые располагаются наклонно и горизонтально [44].

Многолетнемерзлые грунты салехардской свиты относятся к числу эпигенетически промерзших грунтов. Их криогенное строение зависит от литологического состава, влажности до промерзания и др. Суглинистые и глинистые отложения салехардской свиты территории Харасавэйского месторождения в большинстве своем представлены слабльдистыми и нельдистыми грунтами, при этом с глубиной наблюдается снижение льдистости. Характерные значения льдистости представлены ниже в главе 2 [89-109].

У суглинистых и глинистых отложений свиты наиболее часто встречается массивная криотекстура с редкими разнонаправленными и субвертикальными шлирами льда толщиной в среднем 1-3 мм. В верхах разреза толщи наблюдаются сетчатые, сетчато-слоистые и тонкошлировые криотекстуры. Местами толщина слоев достигает до 5-8 мм. Для

супесчано-песчаных отложений свиты характерны массивные криогенные текстуры [89-109].

Исследования керна скважины КТС-8 показали, что толща салехардских отложений представлена мерзлыми грунтами, твердосцементированными льдом-цементом и сегрегационным льдом с прослоями пластичномерзлых суглинков [44].

Суммарная влажность мерзлых грунтов салехардской свиты Харасавэйского месторождения зависит от их дисперсности и криогенного строения. Она изменяется в диапазоне от 15 до 55% (табл. 4). Наименьшие значения влажности, в среднем 22-23%, свойственны песчаным отложениям свиты с массивной криогенной текстурой. Наиболее развиты глинистые отложения с массивной криогенной текстурой и средней влажностью 30-33%. Более высокие значения влажности до 40-55% встречаются реже и свойственны в основном глинистым грунтам с сетчато-слоистыми и тонкошлировыми криотекстурами [44, 67, 89-109].

Плотность отложений салехардской свиты изменяется в широком диапазоне от 1,6 до 2,0 г/см³, средние значения варьируют от 1,97 г/см³ у песчаных разностей до 1,89 г/см³ у глинистых. Плотность твердых частиц грунтов свиты наиболее часто встречается в диапазоне от 2,65 до 2,75 г/см³. В среднем наименьшие значения 2,66 г/см³ характерны для песчаных разностей, а наибольшие до 2,71 г/см³ для глинистых разностей. Плотность скелета грунта изменяется от 1,26 г/см³ до 1,81 г/см³.

Наибольшими ее средними значениями обладают супесчаные и песчаные разности, наименьшими и наиболее часто встречающимися – суглинки тяжелые и глины легкие [89-109].

Коэффициент пористости отложений салехардской свиты изменяется в диапазоне от 0,55 до 1,50. Песчаные разности имеют более плотное сложение, их коэффициент пористости в среднем составляет 0,63-0,66. Глинистым отложениям характерны более высокие значения коэффициента пористости, в среднем от 0,71 до 0,93, причем с увеличением дисперсности его значения возрастают [89-109].

Температура начала замерзания мерзлых грунтов свиты зависит от их дисперсности и концентрации порового раствора. Она колеблется в широком диапазоне от -0,5 °С до -2,7 °С. Для песчаных и супесчаных разностей характерны достаточно высокие значения температуры начала замерзания, в среднем -0,6÷-0,7 °С. Суглинистые и глинистые отложения имеют температуру начала замерзания в среднем от -1,4 °С до -1,9 °С (табл. 5) [89-109].

Объемная теплоемкость песчаных грунтов в мерзлом состоянии составляет в среднем 1,92 Дж/(м³·°С)·10⁶, в талом – 2,67 Дж/(м³·°С)·10⁶; теплопроводность в мерзлом

состоянии $3,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$, в талом – $1,97 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Глинистые разности в среднем имеют объемную теплоемкость $2,35\text{-}2,41 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{С})\cdot 10^6$ в мерзлом состоянии и $2,96\text{-}3,01 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{С})\cdot 10^6$ в талом состоянии. Их теплопроводность составляет $1,57\text{-}1,72 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ в мерзлом состоянии, в талом – $1,09\text{-}1,29 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ (табл. 5) [89-109].

Таблица 4. Некоторые показатели состава и свойств грунтов салехардской свиты Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески пылеватые	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые и легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые	
Суммарная влажность w_{tot} , д.ед.	0,22 0,19-0,25 (16)	0,23 0,15-0,29 (52)	0,31 0,23-0,38 (56)	0,30 0,20-0,55 (586)	0,30 0,20-0,44 (367)	0,33 0,22-0,41 (108)	
Плотность грунта, $\text{г}/\text{см}^3$	1,97 1,88-2,09 (12)	1,98 1,84-2,08 (27)	1,89 1,81-2,04 (67)	1,87 1,57-2,05 (350)	1,89 1,68-2,05 (306)	1,88 1,71-2,03 (81)	
Плотность твердых частиц грунта, $\text{г}/\text{см}^3$	2,66 2,65-2,66 (4)	2,67 2,65-69 (6)	2,68 2,66-2,72 (11)	2,69 2,66-2,75 (61)	2,69 2,67-2,73 (48)	2,71 2,69-2,72 (14)	
Плотность скелета грунта, $\text{г}/\text{см}^3$	1,63 1,54-1,72 (4)	1,64 1,51-1,74 (8)	1,56 1,31-1,81 (34)	1,45 1,30-1,67 (122)	1,45 1,26-1,70 (106)	1,41 1,27-1,62 (52)	
Коэффициент пористости	0,63 0,55-0,71 (4)	0,66 0,53-0,68 (8)	0,71 0,54-0,85 (11)	0,90 0,63-1,50 (59)	0,85 0,62-1,08 (48)	0,93 0,70-1,04 (19)	
Пластичность	верхний предел, %	-	23,4 20,8-24,1 (6)	31,1 29,8-34,7 (11)	36,5 26,9-48,4 (61)	37 28,4-46,0 (48)	42,3 40,5-46,7 (14)
	нижний предел, %	-	17,8 14,8-19,0 (6)	19,5 18,4-21,8 (11)	23,6 18,3-32,0 (61)	22,8 19,0-30,7 (48)	23,1 22,2-26,6 (14)
	число пластичности	-	5,6 5,3-6,2 (6)	10,6 9,8-14,9 (11)	13 7,2-16,9 (61)	14,2 10,9-16,9 (48)	19,2 17,1-21,8 (14)
Содержание орг. вещества I_r , д.ед.	0,02 (4)	0,03 0,01-0,04 (6)	0,06 0,04-0,07 (11)	0,05 0,03-0,08 (55)	0,06 0,04-0,07 (51)	0,06 0,04-0,08 (19)	

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения и количество определений.

Следует отметить, что в прибрежной части Карского моря встречены сильнозасоленные салехардские отложения, которые имеют значительные отличия в показателях теплофизических и других свойств. Так, температура начала замерзания песчаных, супесчаных разностей достигает $-2\div-3,5^\circ\text{С}$. Это объясняется наличием в толщах высокоминерализованных вод (криопэгов) (см. раздел 1.4).

Коэффициент сжимаемости мерзлых грунтов салехардской свиты колеблется от $0,01 \text{ МПа}^{-1}$ до $0,11 \text{ МПа}^{-1}$. В целом наименьшие коэффициенты сжимаемости характерны для супесчаных и песчаных разностей, в среднем $0,01\text{-}0,02 \text{ МПа}^{-1}$. Большая способность к

деформированию свойственна суглинистым и глинистым отложениям, они имеют коэффициент сжимаемости в среднем $0,04 \text{ МПа}^{-1}$ (табл. 6) [89-109].

Таблица 5. Показатели теплофизических свойств грунтов салехардской свиты Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески пылеватые	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Температура начала замерзания $T_{\text{bf}}, ^\circ\text{C}$	-0,60 -0,5 – -0,8 (5)	-0,71 -0,60 – -0,9 (5)	-1,41 -0,9 – -1,9 (15)	-1,70 -1,1 – -2,4 (15)	-1,85 -1,9 – -2,7 (13)
Удельная теплоемкость скелета грунта $C_{\text{уд.ск.}}, \text{Дж/кг}^\circ\text{C}$	734 724-744 (5)	758 742-776 (5)	767,4 754-785 (15)	774,4 730-822 (15)	785,9 755-810 (13)
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии $C_{\text{th}}, \text{Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C}) 10^6$	2,67 2,61-2,83 (5)	2,87 2,74-3,08 (5)	2,87 2,74-3,06 (15)	2,96 2,79-3,17 (15)	3,01 2,94-3,07 (13)
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии $C_{\text{f}}, \text{Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C}) 10^6$	1,92 1,88-1,96 (5)	2,08 1,98-2,26 (5)	2,25 2,14-2,47 (15)	2,35 2,14-2,5 (15)	2,41 2,28-2,78 (13)
Температуропроводность грунта в талом состоянии $a_{\text{th}}, \text{м}^2/\text{с} 10^{-6}$	0,74 0,65-0,80 (5)	0,74 0,64-0,80 (5)	0,47 0,38-0,58 (15)	0,44 0,35-0,59 (15)	0,36 0,34-0,41 (13)
Температуропроводность грунта в мерзлом состоянии $a_{\text{f}}, \text{м}^2/\text{с} 10^{-6}$	1,59 1,58-1,84 (5)	1,09 0,94-1,18 (5)	0,81 0,57-1,06 (15)	0,73 0,53-1,11 (15)	1,57 1,43-1,7 (13)
Теплопроводность грунта в талом состоянии $\lambda_{\text{th}}, \text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$	1,97 1,84-2,05 (5)	2,11 1,97-2,22 (5)	1,36 1,12-1,61 (15)	1,29 1,08-1,74 (15)	1,09 1,02-1,22 (13)
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии $\lambda_{\text{f}}, \text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$	3,05 3,11-3,45 (5)	2,27 2,12-2,38 (5)	1,83 1,36-2,27 (15)	1,72 1,28-2,5 (15)	1,57 1,43-1,7 (13)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения и количество определений.

Таблица 6. Коэффициенты сжимаемости и оттаивания мерзлых грунтов салехардской свиты Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески пылеватые	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Коэффициент сжимаемости $m, \text{МПа}^{-1}$, температура $-5,5^\circ\text{C}$	0,01 0,01-0,04	0,02 0-0,04	0,04 0,02-0,08	0,04 0,01-0,11	0,03 0,01-0,07
Коэффициент оттаивания A_{th} , температура $-5,5^\circ\text{C}$	0,01 0-0,05	0,01 0-0,01	0,03 0-0,08	0,03 0-0,11	0,04 0-0,1

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения.

Многолетнемерзлые грунты салехардской свиты при оттаивании демонстрируют различную осадку в зависимости от их дисперсности и криогенного строения. Наибольшая осадка характерна для суглинистых и глинистых разностей с сетчато-слоистой и тонкошпировой криотекстурами. Так, осадка при оттаивании от действия собственного веса глинистых отложений в среднем составляет 73 мм/м, суглинистых – 65 мм/м. Максимальные значения осадки при оттаивании характерны для грунтов с включением шпиров и линз льда в верхах разреза свиты. Так, для суглинистых разностей осадка при оттаивании от собственного веса грунта доходит до 95 мм/м, а для глинистых – 120 мм/м, хотя такие значения встречаются достаточно редко. Наименьшие осадки при оттаивании дают песчаные и супесчаные разности, их среднее значение составляет 23 мм/м и максимальное 35 мм/м [89-109].

Отложения казанцевской свиты

Песчаные отложения казанцевской свиты в основном состоят из частиц минералов легкой фракции, среди которых наиболее часто встречается кварц. Минералы тяжелой фракции представлены пироксенами, эпидотом и лимонитом [67]. Пылеватые, тонко- и мелкопесчаные частицы глинистых отложений свиты имеют полевошпатово-кварцевый и кварцевый состав. В небольшом количестве встречаются амфиболы, слюды, эпидот, пироксены и рудные минералы. Среди слюд наиболее распространены зеленые слюды и биотит, их количество резко возрастает в глинистых разностях в переслаивающихся супесчано-суглинистых отложениях. Аутигенные минералы в разрезе представлены сидеритом, на глубине более 20 м он встречается в форме мелких зерен неправильной формы [44]. Глинистая фракция отложений казанцевской свиты состоит из хлорита, каолинита, гидрослюды и монтмориллонита. Среди них преобладают монтмориллонитовые и гидрослюдистые минералы (табл. 3). В отложениях свиты встречены примеси кальцита, обломки диатомовых водорослей и гидроксиды железа [44].

Общее количество водорастворимых солей в отложениях казанцевской свиты в целом невелико. Наименьшее их содержание отмечено в песчаных и супесчаных отложениях и колеблется в среднем от 0,1 до 0,2%. Более высокие значения характерны для суглинистых отложений, где суммарное содержание солей в среднем составляет 0,4%. В толщах со вскрытыми высокоминерализованными водами, в основном в пределах молодых геоморфологических элементов, например, морской лайды, наблюдается резкое увеличение солей в отложениях. Так, их суммарное содержание в суглинках доходит до 1,8%, а в песках колеблется от 0,6 до 2,1% (приложение 1). В водных вытяжках отложений казанцевской свиты преобладает хлор-ион среди анионов и натрий-ион среди катионов. В

отдельных вытяжках наблюдается увеличение гидрокарбонат-иона и сульфат-иона; рН водных вытяжек большинства исследованных проб варьирует от 6,9 до 8,7, в среднем составляет 7,6 [89-109].

Относительное содержание органического вещества изменяется от 0 до 0,05 д.ед. Для песчаных разностей среднее значение составляет 0,01 д.ед., супесчаных – 0,02 д.ед., для суглинистых отложений – 0,05 д.ед. (рис. 6, табл. 7) [89-109].



Рис. 6. Прослой неразложившегося органического вещества в песчаных грунтах казанцевской свиты в керне одной из скважин площадки строительства подземных резервуаров на территории Харасавэйского месторождения (фото автора)

Отложения казанцевской свиты являются менее дисперсными по сравнению с толщей салехардской свиты. Тут встречаются песчаные, супесчаные и суглинистые разности, причем последние распространены меньше. Местами в разрезах свиты

присутствует мощная регрессивная пачка, которая более чем на 90% состоит из супесчаных и песчаных разностей. Среди них наиболее распространены пылеватые пески, хотя местами можно встретить и мелкие пески [89-109]. Суглинистые разности представлены тяжелыми, средними и легкими суглинками, зачастую пылеватыми с опесчаненными тонкими прослоями. Нередко встречаются переслаивания легких и тяжелых суглинков. По данным керна скважины КТС-8 отложения казанцевской свиты представлены супесями, суглинками и глинами, при значительном преобладании суглинков тяжелых пылеватых и средних. Глинистая фракция в них колеблется от 17 до 40%. Содержание песчаных частиц в глинистых и суглинистых отложениях изменяется от 10% до 50% соответственно. Количество пылеватых частиц варьирует в среднем от 30 до 40%, достигая местами 60% [44].

По данным керна скважины КТС-8 суглинистые отложения казанцевской свиты имеют матричную микроструктуру, реже скелетную. На глубине 26 м отложения представлены средними суглинками и средними пылеватыми суглинками. Пылеватоглинистая масса распределена равномерно и обволакивает песчаные частицы. Тут встречаются неотсортированные и неоднородные песчаные прослойки с кварцевыми слабо окатанными и угловатыми частицами пылеватой размерности. В прослойках присутствует неразложившаяся органика, пятна ожелезнения и поры размером около 0,1 мм. Часть пор заполнена включениями льда различной формы в виде вытянутых скоплений или пятен, встречаются пустые поры (рис. 7) [44].

На глубине 40 м глинистые разности представлены гидрослюдистыми минералами в виде удлиненных и изометричных пластинчатых частиц и их агрегатов с неотчетливыми контурами. Каолинит встречен в форме псевдогексагональных кристаллов с четкими контурами.

С глубины 54 м суглинки свиты имеют четкую слоистость по дисперсности. Песчаные разности тут распределены неоднородно в виде тонких прослоек с изометричной формой кварцевых зерен. В отложениях свиты встречаются поры диаметром около 0,05 мм, прослойки сегрегационного льда и растительные остатки разной степени разложения. Ледцемент тут залегает в виде включений изометрической формы, достигающих размером до 1 мм (рис. 8) [44].

Отложения казанцевской свиты сложены эпигенетическими и сингенетическими мерзлыми грунтами. Последние слагают верхи разреза свиты и представлены чаще супесчано-песчаными грунтами регрессивной пачки.

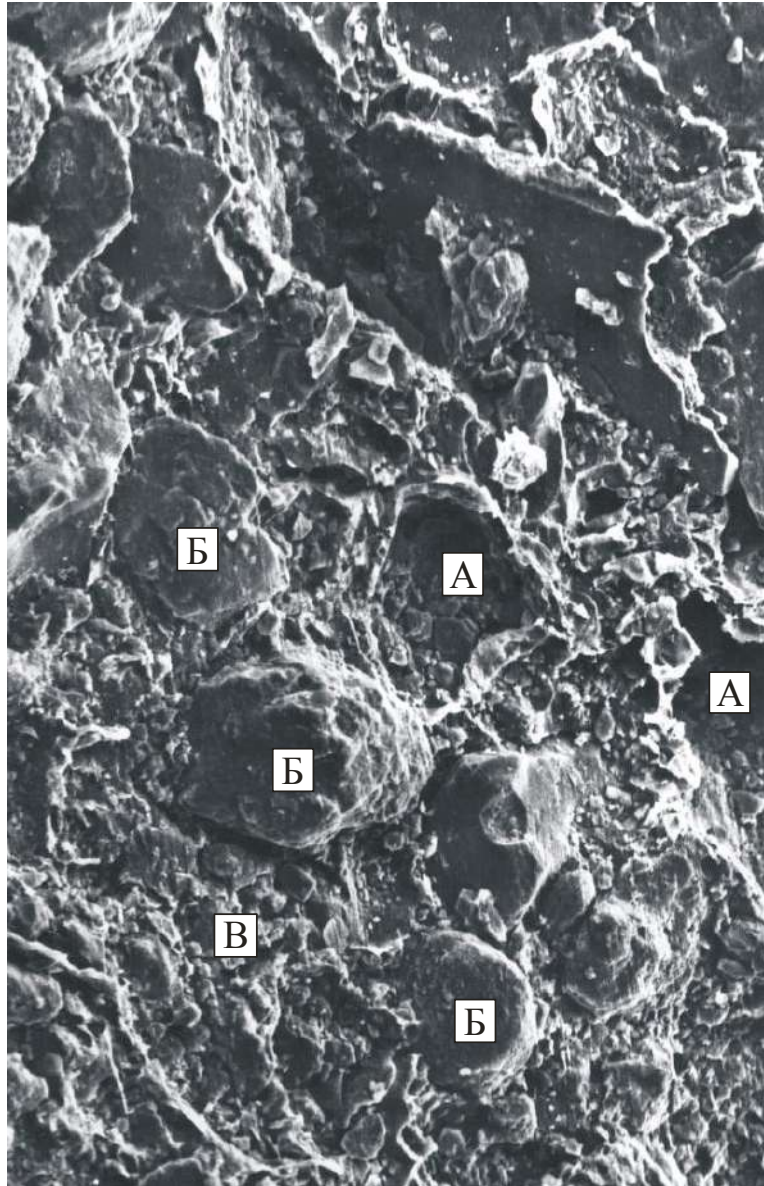


Рис. 7. Микростроение суглинистых опесчаненных отложений казанцевской свиты на глубине 26 м по данным исследования керна скважины КТС-8: А –лед-цемент; Б – песчаные частицы; В – пылевато-глинистые отложения. Увеличение 300 х, РЭМ [44]

Сингенетические мерзлые грунты казанцевской свиты сформировались в условиях мелководья за счет обмеления Ямальского бассейна и промерзания накапливающихся осадков. Эпигенетические грунты слагают остальную часть разреза и представлены супесчано-песчаными, суглинистыми и реже глинистыми разностями. Грунты казанцевской свиты в основном являются слабльдистыми и льдистыми грунтами, локально встречаются более льдистые разности [89-109].

Криогенное строение суглинистых и глинистых отложений казанцевской свиты характеризуется в основном массивной и реже слоистой криогенными текстурами местами с наклонными и субвертикальными шлирами толщиной 1-5 мм.

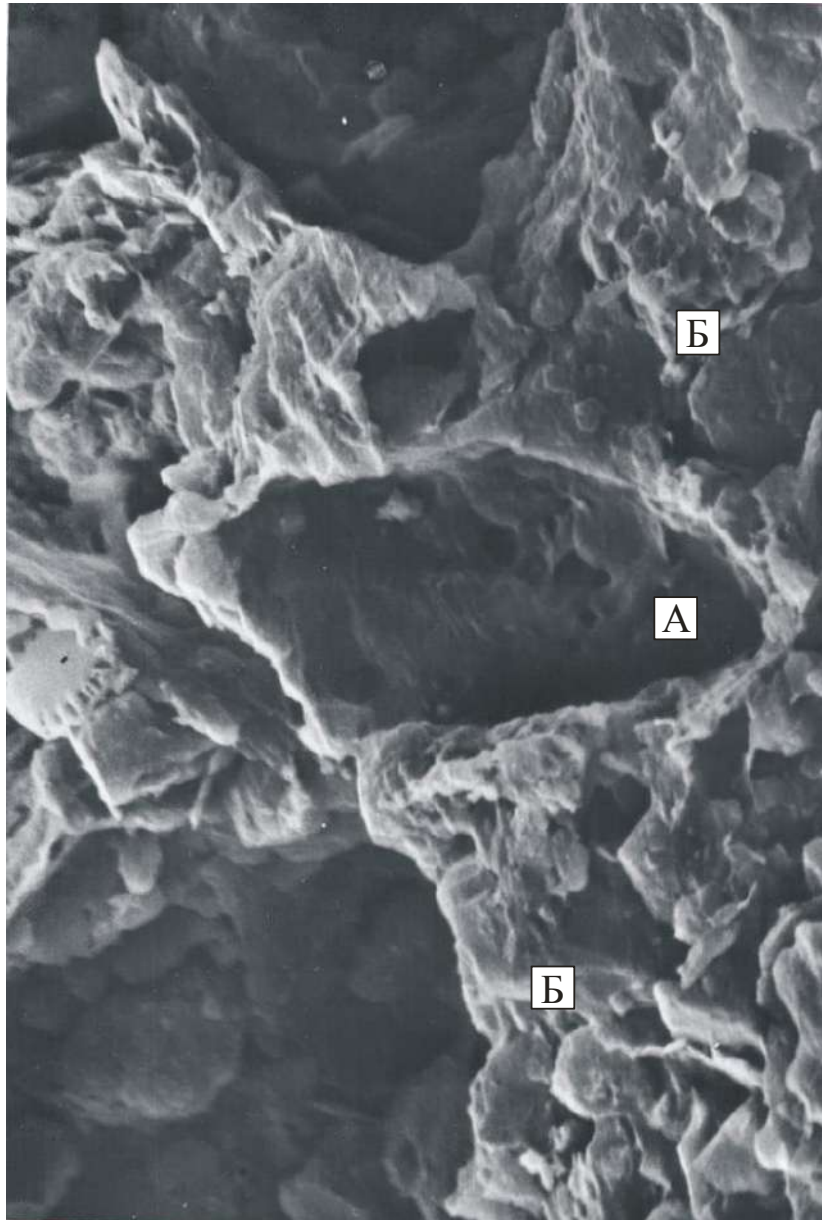


Рис. 8. Микростроение суглинистых отложений казанцевской свиты на глубине 54 м по данным исследования керна скважины КТС-8: А –лед-цемент до 0,5 мм;
Б – монтмориллонит. Увеличение 2000х, РЭМ [44]

Для песчаных отложений наиболее распространена массивная криогенная текстура. Однако в песчаной пачке местами присутствуют сильнольдистые и очень сильнольдистые разности с базальной, линзовидно-слоистой и слоистой криогенными текстурами. Они встречены преимущественно в верхней, реже в средней частях свиты. Шлиры льда тут варьируют от 1-10 мм, местами доходя до 30 мм. Мощность горизонта сильнольдистых и очень сильнольдистых песчаных отложений изменяется от 1 м до 5 м. Также в многолетнемерзлых грунтах казанцевской свиты встречаются пластовые льды, мощность которых варьирует от 0,5 м до нескольких метров и более. Это существенно увеличивает льдистость отложений свиты и изменяет их криогенное строение (см. раздел 1.4).

Отложения казанцевской свиты в основном находятся в твердомерзлом и пластичномерзлом состоянии. Однако местами вскрыты охлажденные грунты с высокоминерализованными водами с отрицательной температурой (см. раздел 1.4 и главу 2) [89-109].

Суммарная влажность отложений казанцевской свиты изменяется от 17% до 141%. Ее максимальные значения характерны для сильнольдистых песчаных и суглинистых разностей с базальной, линзовидно-слоистой и слоистой криотекстурами. Наименьшие значения влажности 17-21% свойственны супесчано-песчаным и легким суглинистым отложениям с массивной криогенной текстурой. В среднем суммарная влажность песчаных, супесчаных и легких суглинистых грунтов составляет 28%. Тяжелые суглинки обладают большей суммарной влажностью, она колеблется от 26% до 50% при среднем значении 33% [89-109].

Плотность отложений казанцевской свиты изменяется в диапазоне от 1,57 г/см³ до 2,13 г/см³. Для песчаных разностей ее среднее значение составляет 1,85 г/см³, местами доходя до 2,00 г/см³. Наибольшие значения плотности свойственны суглинкам легким пылеватым и песчанистым, ее среднее значение равно 1,94 г/см³, изменяясь от 1,73 до 2,13 г/см³. Снижение плотности наблюдается у отложений со слоистой и базальной криотекстурами (табл. 7) [89-109].

Средние значения плотности твердых частиц грунта колеблются в узком диапазоне от 2,66-2,67 г/см³ у супесчано-суглинистых отложений до 2,68 г/см³ у суглинистых разностей.

Плотность скелета грунта в среднем изменяется от 1,49-1,53 г/см³ у песчаных и супесчаных разностей до 1,38-1,51 г/см³ у суглинистых тяжелых и легких отложений соответственно (табл. 7) [89-109].

Коэффициент пористости грунтов казанцевской свиты зависит от их дисперсности и льдистости. Так, наименьшее среднее значение коэффициента пористости 0,77 характерно для песчаных разностей. Менее плотное сложение имеют более дисперсные отложения, например, коэффициент пористости тяжелых суглинков в среднем составляет 0,96 при минимальном значении 0,86. Достаточно высокие коэффициенты пористости отмечаются у более льдистых отложений. Так, у пылеватых песков это значение доходит до 1,11 и выше, у суглинистых и супесчаных грунтов до 1,06. (табл. 7) [89-109].

Таблица. 7. Некоторые показатели состава и свойств грунтов казанцевской свиты Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели		Пески пылеватые	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые и песчаные	Суглинки тяжелые пылеватые
Суммарная влажность w_{tot} , д.ед.		0,28 0,17-1,4 (876)	0,28 0,21-0,41 (20)	0,28 0,19-0,38 (12)	0,33 0,26-0,5 (14)
Плотность грунта, г/см ³		1,85 1,57-2,00 (659)	1,89 1,69-2,00 (14)	1,94 1,73-2,13 (9)	1,82 1,7-1,93 (10)
Плотность твердых частиц грунта, г/см ³		2,66 2,63-2,69 (156)	2,67 2,65-2,69 (3)	2,68 2,67-2,68 (9)	2,68 2,66-2,70 (2)
Плотность скелета грунта, г/см ³		1,49 1,29-1,76 (253)	1,53 1,49-1,62 (14)	1,51 1,32-1,69 (9)	1,38 1,32-1,43 (2)
Коэффициент пористости		0,77 0,66-1,11 (149)	0,83 0,73-1,00 (14)	0,81 0,58-1,04 (9)	0,96 0,86-1,06 (2)
Пластичность	верхний предел, %	-	18,1 24,3-27,5 (8)	28,6 24,5-32,6 (9)	37,3 (2)
	нижний предел, %	-	14,4 17,0-22,0 (8)	20,4 16,9-23,8 (9)	20,9 (2)
	число пластичности	-	5,0 4,7-6,5 (8)	8,2 7,6-8,8 (9)	16,4 (2)
Отн. содержание орг. вещества I_r , д.ед.		0,01 0-0,04 (156)	0,02 0,01-0,04 (8)	0,05 (9)	0,05 (2)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения и количество определений.

Температура начала замерзания отложений казанцевской свиты зависит от их степени дисперсности и засоленности. Так, наименьшая средняя температура замерзания $-0,22^{\circ}\text{C}$ характерна для пылеватых песков. Для сильнозасоленных песчаных разностей, встречающихся локально, например, в прибрежной части Харасавэйского месторождения, свойственны более низкие температуры начала замерзания, достигающие $-2,1^{\circ}\text{C}$. Для супесчаных и суглинистых отложений средняя температура начала замерзания колеблется от $-1,1$ до $-1,4^{\circ}\text{C}$ (табл. 8) [89-109].

Объемная теплоемкость песчаных грунтов в мерзлом состоянии составляет в среднем $1,93 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}) \cdot 10^6$, в талом – $2,70 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}) \cdot 10^6$; теплопроводность в мерзлом состоянии $3,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$, в талом – $1,83 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Суглинистые разности в среднем имеют объемную теплоемкость $2,33-2,42 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}) \cdot 10^6$ в мерзлом состоянии и

2,97-3,05 Дж/(м³·°C)·10⁶ в талом состоянии. Их теплопроводность составляет 1,45-1,63 Вт/(м °C) в мерзлом состоянии, в талом – 1,15-1,21 Вт/(м °C) (табл. 8) [89-109].

Таблица 8. Показатели теплофизических свойств грунтов казанцевской свиты Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески пылеватые	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые
Температура начала замерзания T_{bf} , °C	-0,22 0 – -2,1 (35)	-1,3 (3)	-1,4 (2)	-1,1 (2)
Удельная теплоемкость скелета грунта $C_{уд.ск.}$, Дж/кг·°C	720 628-786 (35)	780 (3)	766 (2)	772 (2)
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии C_{th} , Дж/(м ³ ·°C) 10 ⁶	2,70 2,55-2,86 (35)	2,90 (3)	2,97 (2)	3,05 (2)
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_f , Дж/(м ³ ·°C) 10 ⁶	1,93 1,83-2,04 (35)	2,23 (3)	2,42 (2)	2,33 (2)
Температуропроводность грунта в талом состоянии a_{th} , м ² /с 10 ⁻⁶	0,68 0,56-1,06 (35)	0,61 (3)	0,39 (2)	0,40 (2)
Температуропроводность грунта в мерзлом состоянии a_f , м ² /с 10 ⁻⁶	1,57 1,20-2,12 (35)	0,96 (3)	0,60 (2)	0,70 (2)
Теплопроводность грунта в талом состоянии l_{th} , Вт/(м °C)	1,83 1,57-2,97 (35)	1,76 (3)	1,15 (2)	1,21 (2)
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии l_f , Вт/(м °C)	3,03 2,36-4,04 (35)	2,15 (3)	1,45 (2)	1,63 (2)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения и количество определений.

Наименьшей способностью к деформированию обладают пылеватые пески казанцевской свиты, их коэффициент сжимаемости колеблется от 0,003 до 0,06 МПа⁻¹, среднее значение составляет 0,017 МПа⁻¹. Среднее значение коэффициента оттаивания пылеватых песков также наименьшее среди всех остальных типов грунтов свиты и составляет 0,027 МПа⁻¹. Более дисперсные отложения обладают большими коэффициентами сжимаемости и оттаивания, первый для супесчаных отложений составляет 0,037 МПа⁻¹, суглинистых разностей – 0,05 МПа⁻¹ (табл. 9) [89-109].

Таблица 9. Коэффициенты сжимаемости и оттаивания мерзлых грунтов казанцевской свиты Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески пылеватые	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые
Коэффициент сжимаемости m , МПа ⁻¹ , температура -5,5 °С	0,017 0,003-0,06	0,037 0,024-0,08	0,056 0,035-0,08	0,05
Коэффициент оттаивания A_{th} , температура -5,5 °С	0,027 0-0,072	0,056 0-0,142	0,035 0,004-0,109	0,076

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения.

Отложения казанцевской свиты в целом имеют большую осадку при оттаивании по сравнению с отложениями салехардской свиты. Это объясняется тем, что первые сложены преимущественно слабльдистыми и льдистыми отложениями, а последние нельдистыми. Наибольшие величины осадки при оттаивании от действия собственного веса наблюдаются у супесчаных и суглинистых отложений казанцевской свиты, их среднее значение составляет 99 мм/м и 97 мм/м соответственно. Песчаные разности при оттаивании в зависимости от льдистости демонстрируют различную осадку. Так, осадка при оттаивании отложений высокой льдистости с базальной и линзовидно-слоистой криотекстурами может достигать 380 мм/м и более. При наличии в песчаных толщах пластовых льдов осадка может составлять 960 мм/м и более, достигая 1000 мм/м при наличии мощных льдов и ледогрунтов. Тем не менее такие высокие значения распространены локально, а наиболее распространенная осадка при оттаивании песчаных отложений составляет 40 мм/м [89-109].

Отложения третьей морской террасы

Отложения третьей морской террасы сложены преимущественно суглинками легкими и тяжелыми пылеватыми и их переслаиванием, местами встречаются глины легкие пылеватые. Супесчано-песчаные отложения встречаются гораздо реже и залегают в основном в верхней части толщи [89-109].

Минералогический состав отложений третьей морской террасы схож с составом нижележащих отложений. Так, песчаные разности в основном представлены кварцевым песком с минералами тяжелой фракции: эпидотом, амфиболами и лимонитом. Глинистые отложения имеют схожий состав. Их глинистая фракция представлена в большей степени гидрослюдистыми минералами, реже встречаются монтмориллонит, каолинит и хлорит. Присутствуют включения органического вещества [67].

Количество водорастворимых солей в отложениях третьей морской террасы изменяется от 0,12% до 0,91%, а среднее значение составляет 0,60%. В водной вытяжке

наиболее часто встречаются ионы натрия и хлора. Местами можно наблюдать снижение количества хлоридов и увеличение гидрокарбонатов (приложение 1) [89-109].

Относительное содержание органического вещества в отложениях третьей морской террасы изменяется в пределах 0,01-0,09 д.ед. Его наименьшее количество наблюдается в менее дисперсных супесчаных отложениях, среднее значение тут составляет 0,02 д.ед. Для суглинистых и глинистых отложений характерны средние значения относительного содержания органического вещества 0,05-0,07 д.ед. (табл. 10) [89-109].

Отложения третьей морской террасы представлены в основном сингенетическими мерзлыми грунтами. Верхняя часть разреза сложена льдистыми и сильнольдистыми грунтами, тут чаще всего встречаются слоистые, линзовидно-слоистые, толсто-, средне- и тонкошпировые, слоисто-сетчатые, иногда атакситовые криогенные текстуры. Толщина шпиров изменяется от 2 мм до 20 мм. С глубиной слоистые криотекстуры переходят в слоисто-сетчатые и сетчатые, расстояние между шпиром увеличивается. Нижняя часть разреза отложений третьей морской террасы местами имеет более низкую льдистость, здесь характерны массивные криогенные текстуры. Однако в некоторых разрезах наблюдается иная картина, в низах свиты встречаются сильнольдистые отложения с атакситовой и слоистой криотекстурами. Также в толще грунтов третьей морской террасы присутствуют пластовые льды и повторно-жильные льды, которые существенно повышают льдистость отложений (см. раздел 1.4) [89-109].

Отложения третьей морской террасы находятся преимущественно в твердомерзлом состоянии. Местами присутствуют пластичномерзлые разности, которые представлены в основном средnezасоленными и сильнозасоленными грунтами [89-109].

Суммарная влажность отложений третьей морской террасы превосходит влажность подстилающей толщи. Средние значения влажности от 46 до 49% свойственны легким пылеватым глинами и тяжелым пылеватым суглинкам. Наибольшая суммарная влажность отмечена у легких пылеватых суглинков, расположенных в самой верхней части разреза, где ее среднее значение составляет 102%, при минимальном 63% и максимальном более 200%. Наименьшие значения влажности характерны для отложений с массивной криогенной текстурой, расположенных в нижних частях толщи, их значения составляют 26% у глинистых отложений, 21-23% у супесчаных и суглинистых разностей (табл. 10) [89-109].

Плотность большинства грунтов третьей морской террасы изменяется от 1,68 г/см³ до 1,78 г/см³, хотя местами встречаются сильнольдистые разности, которые имеют более низкие значения. Так, суглинкам легким пылеватым свойственна средняя плотность 1,28 г/см³, при минимальной 1,13 г/см³ и максимальной 1,40 г/см³. Глины легкие пылеватые

имеют минимальную плотность 1,38 г/см³, суглинки тяжелые пылеватые – 1,34 г/см³. Наибольшие значения плотности характерны для отложений с массивной криогенной текстурой. Так, суглинки тяжелые пылеватые и глины легкие пылеватые имеют максимальную плотность грунта 2,02 г/см³ и 1,94 г/см³ (табл. 10) [89-109].

Таблица 10. Некоторые показатели состава и свойств грунтов третьей морской террасы Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели		Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Суглинки легкие и тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Суммарная влажность w_{tot} , д.ед.		0,32 0,23-0,46 (12)	1,02 0,63-2,00 (22)	0,49 0,21-2,40 (100)	0,36 0,21-0,86 (201)	0,46 0,26-0,88 (43)
Плотность грунта, г/см ³		1,78 1,40-1,91 (10)	1,28 1,13-1,40 (13)	1,73 1,34-2,02 (74)	1,76 1,49-2,02 (154)	1,68 1,38-1,94 (35)
Плотность твердых частиц грунта, г/см ³		2,68 2,66-2,70 (4)	2,66 2,58-2,70 (4)	2,69 2,66-2,71 (12)	2,70 2,59-2,74 (36)	2,70 2,69-2,72 (8)
Плотность скелета грунта, г/см ³		1,36 0,96-1,56 (4)	0,64 0,52-0,74 (5)	1,21 0,74-1,58 (12)	1,31 0,61-1,61 (47)	1,27 1,19-1,48 (14)
Коэффициент пористости		0,82 0,72-0,90 (4)	0,76 0,72-0,80 (4)	1,39 0,7-2,61 (12)	0,97 0,82-2,53 (25)	1,47 0,93-1,53 (19)
Пластичность	верхний предел, %	23,6 21-25,1 (2)	36,7 30-42 (4)	41,6 36,3-48,7 (12)	33,4 25-41 (36)	42,4 40-49 (8)
	нижний предел, %	17,3 15,-18,6 (4)	27,3 22,8-31,7 (4)	25,4 20,4-32,9 (12)	21,3 15-27,5 (36)	24,2 22,0-28,0 (8)
	число пластичности	6,5 6,4-6,5 (4)	9,4 7,4-10,3 (4)	16,2 15,8-16,6 (12)	11,9 8,3-16,6 (36)	18,4 17,0-23,0 (8)
Отн. содержание орг. вещества I_r , д.ед.		0,02 0,01-0,02 (4)	0,07 0,04-0,09 (2)	0,06 0,06-0,07 (12)	0,05 0,03-0,09 (36)	0,06 0,05-0,08 (8)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения и количество определений.

Плотность твердых частиц грунта отложений третьей морской террасы в среднем изменяется от 2,66 г/см³ до 2,70 г/см³. Глины легкие пылеватые, суглинки тяжелые и переслаивание суглинков легких и тяжелых пылеватых имеют в среднем плотность твердых частиц 2,69-2,70 г/см³. Для супесей пылеватых и суглинков легких пылеватых это значение в среднем составляет 2,68 г/см³ и 2,66 г/см³ соответственно (табл. 10) [89-109].

Отложения третьей морской террасы имеют довольно большой разброс по плотности скелета грунта. Наибольшие значения присущи супесчаным пылеватым

разностям с массивной криогенной текстурой, среднее значение плотности скелета грунта составляет $1,36 \text{ г/см}^3$, при максимальном $1,56 \text{ г/см}^3$. С увеличением дисперсности и льдистости отложений наблюдается снижение плотности скелета грунта. Так, ее среднее значение для сильнольдистых суглинков легких пылеватых составляет $0,64 \text{ г/см}^3$, минимальное для сильнольдистых суглинков тяжелых пылеватых – $0,74 \text{ г/см}^3$. Среднее значение плотности скелета грунта переслаивающихся суглинков легких, тяжелых пылеватых и глин легких пылеватых равно $1,31 \text{ г/см}^3$ и $1,27 \text{ г/см}^3$ соответственно (табл. 10) [89-109].

Коэффициент пористости отложений третьей морской террасы изменяется от 0,70 до 2,61. Наиболее дисперсные отложения имеют большие значения коэффициента пористости, его средние значения для глин легких пылеватых и суглинков тяжелых пылеватых составляют 1,47 и 1,39 соответственно. Заметно более плотное сложение имеют супесчаные отложения толщи, среднее значение коэффициента пористости для них равно 0,82, при минимальном 0,72 и максимальном 0,90. Сильнольдистые отложения толщи – суглинки легкие пылеватые верхней части разреза – имеют наиболее низкие средние значения коэффициента пористости 0,76. Таким образом наблюдается закономерность увеличения коэффициента пористости с увеличением дисперсности отложений и со снижением их льдистости (табл. 10) [89-109].

Показатели теплофизических свойств определены для трех типов грунта – суглинков легких пылеватых, суглинков тяжелых пылеватых и глин легких пылеватых. Среди них выделяются суглинки тяжелые пылеватые, которые ввиду более высокой засоленности большинства исследуемых образцов (до 0,8%) имеют несколько отличающиеся показатели свойств. Так, температура начала замерзания средне- и сильнозасоленных тяжелых пылеватых суглинков составляет в среднем $-1,17 \text{ }^\circ\text{C}$, местами доходя до $-2 \text{ }^\circ\text{C}$. Их объемная теплоемкость в талом состоянии в среднем составляет $2,99 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \cdot 10^6$, в мерзлом – $2,34 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \cdot 10^6$. Теплопроводность суглинков тяжелых пылеватых в талом состоянии в среднем равна $1,21 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, в мерзлом – $1,7 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ (табл. 11) [89-109].

Температура начала замерзания суглинков легких пылеватых в среднем равна $-0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, при минимальном $-0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ и максимальном $-1,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Для легких пылеватых глин это значение составляет в среднем $-0,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Объемная теплоемкость суглинков легких пылеватых в талом состоянии в среднем равна $2,86 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \cdot 10^6$, в мерзлом – $2,14 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \cdot 10^6$. Для глинистых разностей она в среднем составляет $3,04 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \cdot 10^6$ в талом состоянии и $2,68 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \cdot 10^6$ в мерзлом состоянии.

Теплопроводность суглинков легких пылеватых в талом состоянии в среднем равна 1,34 Вт/(м °С), при минимальной 1,22 Вт/(м °С) и максимальной 1,46 Вт/(м °С). В мерзлом состоянии ее среднее значение составляет 1,94 Вт/(м °С), при минимальном 1,79 Вт/(м °С) и максимальном 2,04 Вт/(м °С). Теплопроводность легких пылеватых глин в талом состоянии в среднем составляет 1,24 Вт/(м °С), в мерзлом – 1,83 Вт/(м °С) (табл. 11) [89-109].

Таблица 11. Показатели теплофизических свойств грунтов третьей морской террасы Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Температура начала замерзания $T_{bf}, ^\circ\text{C}$	-0,38 -0,1 – -1,2 (4)	-1,17 -0,2 – -2 (11)	-0,7 (2)
Удельная теплоемкость скелета грунта $C_{уд.ск.}, \text{Дж/кг}^\circ\text{C}$	752 742-763 (4)	781 747-798 (11)	806 (2)
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии $C_{th}, \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 10^6	2,86 2,72-3,0 (4)	2,99 2,84-3,59 (11)	3,04 (2)
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии $C_f,$ $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}) 10^6$	2,14 2,03-2,32 (4)	2,34 2,26-2,42 (11)	2,68 (2)
Температуропроводность грунта в талом состоянии $a_{th}, \text{м}^2/\text{с} * 10^{-6}$	0,47 0,41-0,51 (4)	0,41 0,38-0,5 (11)	0,41 (2)
Температуропроводность грунта в мерзлом состоянии $a_f, \text{м}^2/\text{с} 10^{-6}$	0,91 0,77-1,0 (4)	0,73 0,65-0,79 (11)	0,68 (2)
Теплопроводность грунта в талом состоянии $l_{th}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	1,34 1,22-1,46 (4)	1,21 1,1-1,42 (11)	1,24 (2)
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии $l_f, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	1,94 1,79-2,04 (4)	1,7 1,51-2,04 (11)	1,83 (2)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения и количество определений.

Коэффициент сжимаемости отложений третьей морской террасы колеблется от 0 до $0,72 \text{ МПа}^{-1}$. Наименьшая способность к деформированию отмечается у супесчаных отложений, тут коэффициент сжимаемости в среднем составляет $0,03 \text{ МПа}^{-1}$. Наибольшие средние значения коэффициента сжимаемости $0,21$ и $0,22 \text{ МПа}^{-1}$ присущи суглинкам легким пылеватым и глине легкой пылеватой соответственно (табл. 12) [89-109].

Таблица 12. Коэффициенты сжимаемости и оттаивания мерзлых грунтов третьей морской террасы Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Супеси пылеватые	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глина легкая пылеватая
Коэффициент сжимаемости m , МПа ⁻¹ , температура -5,5 °С	0,033	0,207 0-0,69	0,091 0-0,723	0,224 0,101-0,347
Коэффициент оттаивания A_{th} , температура -5,5 °С	0,021	0,138 0,031-0,284	0,092 0,004-0,247	0,226 0,186-0,265

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения.

Отложения третьей морской террасы имеют различную осадку при оттаивании, наибольшие ее значения характерны для отложений с высокой льдистостью, особенно при наличии в их толще шлиров и прослоев льда. В целом она превосходит осадку при оттаивании нижележащих отложений казанцевской и салехардской свиты (за исключением промежутков с мощными пластовыми льдами). При оттаивании глинистые отложения демонстрируют осадку от действия собственного веса в среднем равную 180 мм/м, при минимальной 80 мм/м и максимальной 358 мм/м. Большие средние значения осадки присущи супесчаным и суглинистым отложениям. Так, осадка при оттаивании от действия собственного веса супесчаных отложений составляет в среднем 230 мм/м, а суглинистых – 317 мм/м. Максимальное ее значение в 726 мм/м зафиксировано для сильнольдистых суглинистых отложений. Отложения с массивной криогенной текстурой имеют значительно меньшие осадки: для супесчаных отложений ее минимальное значение составляет 36 мм/м, а для суглинистых – 19 мм/м.

Отложения второй морской террасы

Отложения второй морской террасы представлены суглинистыми, глинистыми и реже супесчаными разностями. Среди первых преобладают суглинки тяжелые и легкие пылеватые, среди глинистых – глины легкие пылеватые. Супесчаные отложения встречаются ограниченно и представлены пылеватыми разностями [89-109].

Минералогический состав глинистой и песчаной фракций в целом схож с вышеописанными морскими отложениями Харасавэйского месторождения. В отложениях встречаются также расщепленные обесцвеченные по краям пластинки зеленых слюд и обесцвеченный и лимонитизированный биотит. В суглинистых отложениях второй морской террасы присутствуют следующие аутигенные минералы: вивианит, пирит-марказит и сидерит, первый из них указывает на восстановительные условия осадконакопления.

Минералы окислительных условий осадконакопления – гидроксиды железа – встречаются гораздо реже и только в самых верхних частях разреза до глубины в среднем 3 м [44, 67].

В отложениях второй морской террасы встречаются растительные остатки, среди них наиболее распространены неразложившиеся красноватые волокна с клеточной структурой [44].

Общее содержание водорастворимых солей в отложениях третьей морской террасы изменяется в широком пределе от 0,09% до 1,02%, его среднее значение составляет 0,43%. Местами прослеживается снижение засоленности грунта вверх по разрезу, так, в скважине 2 на юго-восточной части месторождения общее содержание солей суглинистых отложений на глубине 8 метров составляет 0,61%, 5 метров – 0,59%, а в верхах разреза на глубине 2,5 м снижается до 0,37%. Такая же закономерность прослеживается в отложениях, вскрытых скважинами 3, 6, 13 и др. (приложение 1).

В составе водной вытяжки отложений второй морской террасы преобладает натрий-ион, реже встречается повышение кальций-иона. Среди анионов наблюдается наибольшее содержание хлор-иона, однако местами его количество превосходит гидрокарбонат-ион, реже сульфат-ион. Водная вытяжка в основном имеет слабощелочную реакцию, рН в среднем составляет 7,2. Местами в самой верхней части разреза (первые 3-4 м) отмечена слабокислая и кислая реакция с рН от 4,7 до 5,9 (приложение 1) [89-109].

Относительное содержание органического вещества в отложениях второй морской террасы достаточно велико и превосходит по количеству нижележащие отложения. Так, его средние значения для суглинистых отложений составляют 0,05-0,08 д.ед., а для глинистых – 0,07 д.ед. Максимальное относительное содержание органического вещества отмечено в глинах легких пылеватых и суглинках тяжелых пылеватых, оно составляет 0,10 д.ед. и 0,14 д.ед. соответственно (табл. 13) [89-109].

Скелет суглинистых отложений второй морской террасы, вскрытых скважиной КТС-8 на глубине 2,5 м, состоит из агрегированных пылеватых и глинистых частиц с включением слабо окатанных песчаных частиц в основном кварцевого состава. Большая часть агрегатов имеют ветвистую, сложную форму. Крупные агрегаты размером до 3 мм встречены в местах ожелезнения, их форма преимущественно изометричная. Большие частицы облачены глинистым веществом, которое скрепляет их друг с другом. На контакте грунтовых частиц с растительными остатками местами отмечается ожелезнение и увеличение льдистости. В отложениях встречены шпирьы льда 1-2 мм, с преобладанием наклонной ориентировки. Ледяные включения тут представлены кристаллами различной формы, в горизонтальных слоях льда встречены многоугольные изометричные кристаллы, в наклонных и вертикальных – кристаллы, удлиненные вдоль контактов. В целом

наблюдается хаотичная ориентировка кристаллов. Лед-цемент заполняет пространство между агрегатами, имеет сложную форму с размером в поперечнике до 0,5 мм (рис. 9) [44].

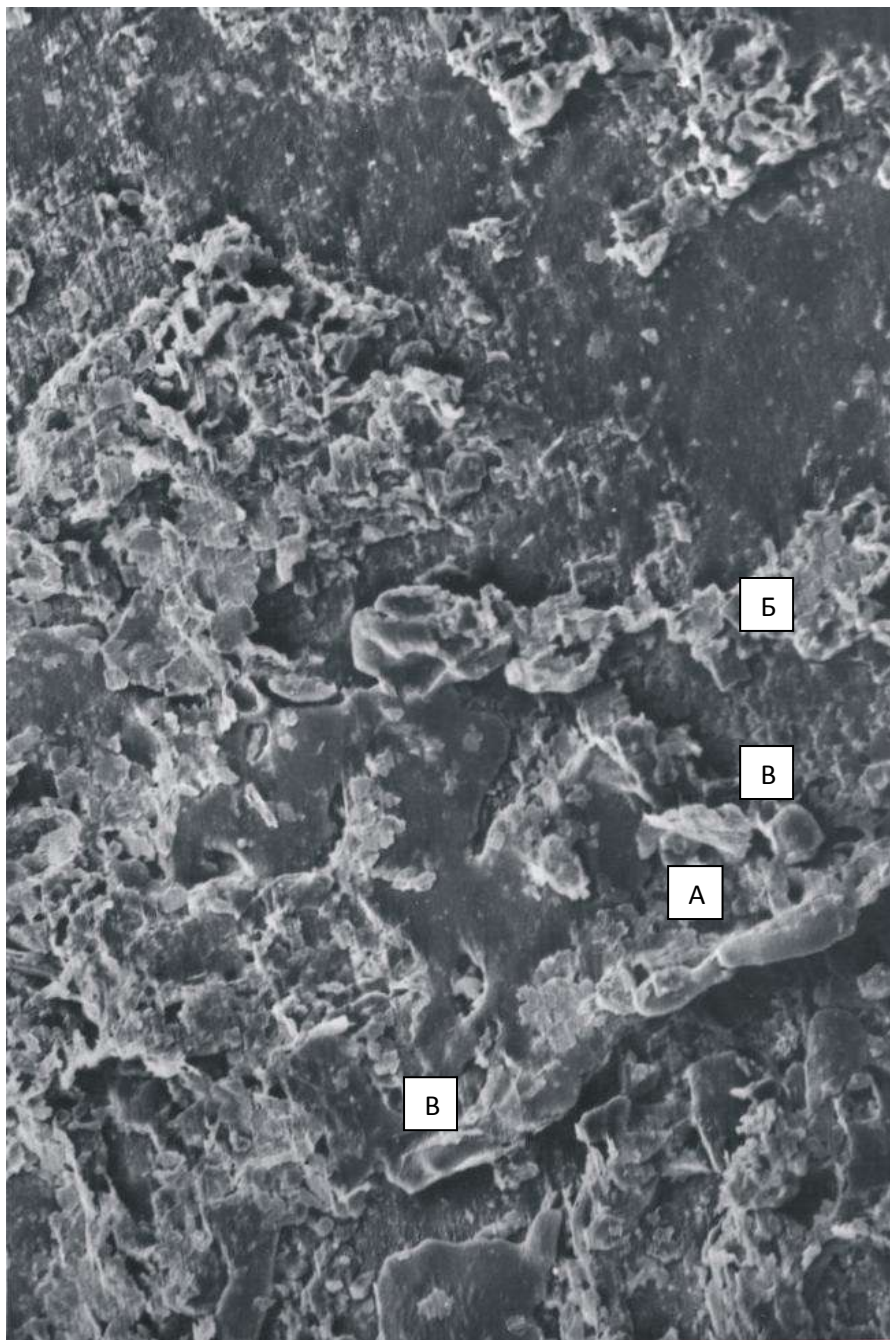


Рис. 9. Микростроение суглинистых отложений второй морской террасы на глубине 2,5 м по данным исследования керна скважины КТС-8: А – лед-цемент; Б – суглинистые частицы; В – песчаные частицы [44]

По данным керна скважины КТС-8 на глубине 13 м отложения второй морской террасы представлены супесчаными разностями кварцевого состава. Светло-серые супеси залегают пачками толщиной до 10 мм, внутри которых прослеживается параллельная слоистость. Содержание глинистых и пылеватых частиц тут невелико, они залегают вдоль песчаных прослоек. Песчаные частицы слабо окатаны, их поверхность покрыта

глинистыми рубашками. Лед-цемент отмечен между песчаными частицами, местами он частично заполняет поры. Зачатки шлиров льда присутствуют в пылеватых и глинистых прослоях (рис. 10) [44].

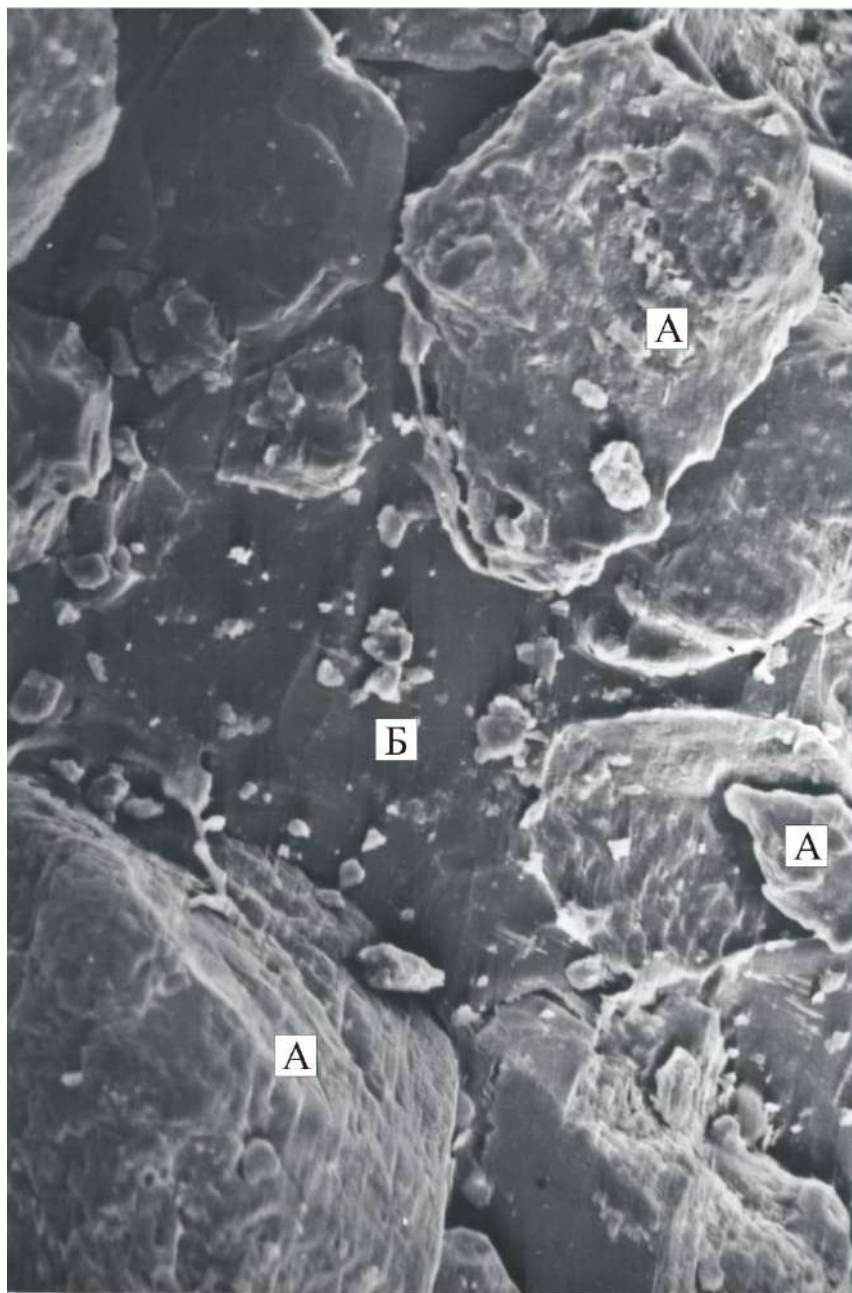


Рис. 10. Микростроение супесчаных отложений второй морской террасы на глубине 13 м по данным исследования керна скважины КТС-8: А – песчаные частицы; Б – лед-цемент.

Увеличение 250 х, РЭМ [44]

Многолетнемерзлые грунты второй морской террасы относятся преимущественно к сингенетически промерзшим грунтам. Их криогенное строение изменяется с глубиной, наиболее льдистые отложения верхней части разреза имеют преимущественно линзовидную, слоистую и атакситовую криогенные структуры, с глубиной они сменяются сетчатой и массивной криогенными текстурами. Толщина шлиров льда в отложениях

второй морской террасы изменяется от первых миллиметров до 20-40 мм. В целом криогенное строение схоже со строением грунтов третьей морской террасы. Так, верхняя часть разреза местами сложена сильнольдистыми и очень сильнольдистыми отложениями, тут также встречаются прослойки ледогрунта. В разрезе присутствуют пластовые льды и повторно-жильные льды (см. раздел 1.4). Отложения второй морской террасы представлены твердомерзлыми и пластичномерзлыми грунтами.

Среднее значение суммарной влажности отложений второй морской террасы варьирует от 32% до 44%. Ее значение зависит от дисперсности грунта и его криогенного строения, так, наибольшая средняя влажность 44% отмечена у глин легких и суглинков тяжелых со слоистой и линзовидной криогенными текстурами, при максимальной 73% и 76% соответственно. Суглинки легкие пылеватые и, местами, песчанистые имеют среднее значение влажности 32% при максимальном 57%. У отложений с массивной криогенной текстурой значение влажности снижается до 18-20% у суглинков легких и тяжелых и до 26% у глин легких.

Плотность грунта отложений второй морской террасы изменяется в широком пределе от 1,35 до 2,07 г/см³. Плотность легких глин в среднем составляет 1,70 г/см³, однако местами можно встретить более низкие значения около 1,35 г/см³, характерные для сильнольдистых разностей со слоистой и линзовидной криогенными текстурами. Суглинки тяжелые имеют аналогичные значения плотности. У менее дисперсных и менее льдистых суглинков легких пылеватых и песчанистых наблюдается наибольшее значение средней плотности грунта около 1,85 г/см³. Плотность твердых частиц грунта отложений второй морской террасы изменяется в среднем от 2,69 г/см³ до 2,71 г/см³. Ее максимальное значение 2,75 г/см³ отмечается у пылеватых легких глин, минимальное 2,46 г/см³ наблюдается у суглинков тяжелых пылеватых. Плотность скелета грунта отложений изменяется от 0,90 г/см³ до 1,69 г/см³. Наибольшие значения характерны для менее дисперсных грунтов – суглинков легких пылеватых и песчанистых, наименьшие – для глин легких пылеватых.

Коэффициент пористости отложений второй морской террасы изменяется в широком пределе от 0,59 до 1,92. Его наибольшие значения свойственны глинам легким пылеватым, среднее значение тут составляет 1,32 при максимальном 1,92. Более плотными отложениями являются суглинки легкие пылеватые и песчанистые, среднее значение коэффициента пористости равно 0,91. (табл. 13) [89-109].

Таблица. 13. Некоторые показатели состава и свойств грунтов второй морской террасы Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели		Суглинки легкие пылеватые и песчанистые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Суммарная влажность w_{tot} , д.ед.		0,32 0,20-0,57 (70)	0,44 0,18-0,76 (81)	0,44 0,26-0,73 (115)
Плотность грунта, г/см ³		1,85 1,59-2,01 (43)	1,73 1,36-2,07 (55)	1,70 1,35-1,92 (76)
Плотность твердых частиц грунта, г/см ³		2,69 2,67-2,69 (7)	2,69 2,46-2,70 (11)	2,71 2,68-2,75 (18)
Плотность скелета грунта, г/см ³		1,41 1,21-1,61 (11)	1,23 1,36-1,69 (11)	1,19 0,90-1,43 (22)
Коэффициент пористости		0,91 0,66-1,23 (10)	1,17 0,59-1,72 (11)	1,32 1,35-1,92 (18)
Пластичность	верхний предел, %	33,0 28,6-39,3 (10)	42,2 32,0-57,0 (11)	49,0 37,0-64,0 (18)
	нижний предел, %	20,4 16,7-26,9 (10)	27,1 18,3-42,0 (11)	29,5 21,0-38,0 (18)
	число пластичности	12,7 9,7-16,4 (10)	15,1 13,6-16,7 (11)	18,9 16,3-27,1 (18)
Отн. содержание орг. вещества I_r , д.ед.		0,05 0,05-0,07 (7)	0,08 0,04-0,14 (11)	0,07 0,05-0,10 (18)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения и количество определений.

Температура начала замерзания суглинистых отложений в основном составляет $-0,47 \div -0,53$ °С, для глинистых она снижается до $-0,86$ °С. Реже встречаются суглинки и глины со значительно более низкой температурой начала замерзания $-1,3 \div -1,5$ °С, что характерно для средне- и сильнозасоленных разностей.

Объемная теплоемкость суглинистых грунтов в мерзлом состоянии составляет в среднем $2,25-2,28$ Дж/(м³·°С)·10⁶, в талом – $2,9-3,0$ Дж/(м³·°С)·10⁶; теплопроводность в мерзлом состоянии – $1,72-1,88$ Вт/(м·°С), в талом – $1,37-1,39$ Вт/(м·°С). Глинистые разности в среднем имеют объемную теплоемкость $2,38$ Дж/(м³·°С)·10⁶ в мерзлом состоянии и $3,05$ Дж/(м³·°С)·10⁶ в талом состоянии. Их теплопроводность составляет $1,57$ Вт/(м °С) в мерзлом состоянии, в талом – $1,16$ Вт/(м °С) (табл. 14) [89-109].

Таблица 14. Показатели теплофизических свойств отложений второй морской террасы Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Температура начала замерзания $T_{bf}, ^\circ\text{C}$	-0,53 -0,1 – -1,3 (3)	-0,47 0 – -1,5 (10)	-0,86 -0,3 – -1,4 (8)
Удельная теплоемкость скелета грунта $C_{уд.ск.}, \text{Дж/кг}^\circ\text{C}$	762 734-786 (3)	781 758-802 (10)	785 707-816 (8)
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии $C_{th}, \text{Дж/(м}^3\cdot^\circ\text{C)}$ 10^6	2,9 2,78-2,97 (3)	3,0 2,77-3,23 (10)	3,05 2,93-3,19 (8)
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии $C_f,$ $\text{Дж/(м}^3\cdot^\circ\text{C)}$ 10^6	2,25 2,2-2,28 (3)	2,28 2,15-2,36 (10)	2,38 2,26-2,56 (8)
Температуропроводность грунта в талом состоянии $a_{th}, \text{м}^2/\text{с}$ 10^{-6}	0,48 0,4-0,61 (3)	0,46 0,33-0,63 (10)	0,38 0,33-0,42 (8)
Температуропроводность грунта в мерзлом состоянии $a_f, \text{м}^2/\text{с}$ 10^{-6}	0,84 0,71-0,9 (3)	0,76 0,57-1,1 (10)	0,66 0,52-0,91 (8)
Теплопроводность грунта в талом состоянии $l_{th}, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,39 1,2-1,7 (3)	1,37 1,05-1,74 (10)	1,16 1,1-1,24 (8)
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии $l_f, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,88 1,61-2,05 (3)	1,72 1,34-2,51 (10)	1,57 1,25-2,06 (8)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения и количество определений.

Среднее значение коэффициента сжимаемости суглинистых и глинистых отложений второй морской террасы составляет $0,06-0,07 \text{ МПа}^{-1}$. Наиболее подвержены деформированию суглинки тяжелые пылеватые, максимальное значение коэффициента сжимаемости тут доходит до $0,24 \text{ МПа}^{-1}$ (табл. 15).

Таблица 15. Коэффициенты сжимаемости и оттаивания мерзлых грунтов второй морской террасы Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Суглинки легкие пылеватые	Суглинки тяжелые пылеватые	Глины легкие пылеватые
Коэффициент сжимаемости $m, \text{МПа}^{-1},$ температура $-5,5 ^\circ\text{C}$	0,064 0,01-0,211	0,068 0,007-0,243	0,060 0,014-0,106
Коэффициент оттаивания $A_{th},$ температура $-5,5 ^\circ\text{C}$	0,136 0,018-0,278	0,119 0,019-0,392	0,095 0,039-0,205

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения.

Осадка при оттаивании суглинистых и глинистых отложений от действия собственного веса в среднем составляет 115-140 мм/м. Наиболее льдистые разности со слоистой и линзовидной криогенными текстурами при оттаивании дают осадку 350, 400 мм/м и более. При наличии в отложениях пластовых льдов и повторно-жильных льдов осадка может составлять 980 мм/м и более до полного оттаивания [89-109].

Отложения первой морской террасы

Отложения первой морской террасы имеют ограниченное распространение и встречаются в пределах южной части Харасавэйского месторождения (см. рис. 5). Верхняя часть разреза чаще всего сложена суглинисто-глинистыми отложениями, нижняя – песками. Среди первых развиты суглинки легкие, местами с прослоями пылеватого песка и торфа. Песчаные отложения представлены преимущественно пылеватыми разностями, хотя местами вскрыты мелкозернистые пески. В толще отложений встречаются органические остатки, ожелезнения и гнезда торфа [67, 83].

В целом состав, строение, состояние и свойства рассматриваемого комплекса схожи с вышеописанными отложениями третьей и второй морских террас. Так, пески и песчаная фракция глинистых отложений характеризуется кварцевым составом с эпидотом, амфиболами и лимонитом среди тяжелых минералов. Глинистая фракция имеет полиминеральный состав, тут встречаются хлорит, каолинит, монтмориллонит и гидрослюда, причем последние преобладают [67].

В составе водной вытяжки преобладают Na^+ и Cl^- . Общее содержание солей в отложениях первой морской террасы достаточно велико, грунты зачастую являются средnezасоленными. Так, в районе нижнего течения р. Харасавэй суммарное содержание солей в них составляет около 0,53-0,93%. Водная вытяжка исследованных проб характеризуется нейтральной реакцией – pH от 6,9 до 7,0 (табл. 16) [67].

Таблица 16. Состав и содержание водорастворимых солей в грунтах первой морской террасы Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [67]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Сухой остаток %
			мг-экв / %	мг-экв / %	мг-экв / %	мг-экв / %	мг-экв / %	мг-экв / %	
Левый берег реки Харасавэй, район устья протоки Хясяресе									
1,0-1,2	глина	7,0	0,80/0,05	5,60/0,20	1,23/0,06	0,40/0,008	0,20/0,002	7,03/0,15	0,53
6,6-6,9	глина	6,9	0,72/0,04	8,00/0,28	1,25/0,06	0,40/0,008	0,20/0,002	9,17/0,21	0,93

Многолетнемерзлые грунты первой морской террасы относятся к сингенетически промерзшим отложениям и повсеместно представлены твердомерзлыми разностями. Их криогенное строение зависит от глубины залегания и литологического состава. Суглинки

верхней части разреза относятся к сильнольдистым и льдистым отложениям, значения видимой льдистости тут достигает 70%. Криогенное строение суглинистых отложений изменяется от слоистых и шлировых к сетчатым и массивным криогенным текстурам с увеличением глубины залегания. Толщина шлиров льда варьирует от первых миллиметров до 5-6 мм и более. Местами встречаются пластовые залежи льда и повторно-жильные льды (см. раздел 1.4). Песчаные отложения в основном имеют массивную криогенную текстуру, хотя местами в верхних частях разреза можно встретить атакситовую.

Влажность отложений рассматриваемого комплекса изменяется в широком пределе от 10-20% до 70-90%. Наиболее высокие значения влажности имеют суглинисто-глинистые сильнольдистые грунты со слоистой криогенной текстурой, наиболее низкие – песчаные с массивной криотекстурой. В целом наиболее часто встречаются значения влажности от 30% до 40% [67].

Плотность суглинистых отложений первой морской террасы изменяется от $0,94 \text{ г/см}^3$ до $2,12 \text{ г/см}^3$. Наиболее часто встречается плотность суглинистого грунта в диапазоне от $1,50 \text{ г/см}^3$ до $2,00 \text{ г/см}^3$. Песчаные разности имеют более высокие значения плотности грунта от $1,51$ до $2,36 \text{ г/см}^3$. При этом наиболее часто ее значение составляет более $2,00 \text{ г/см}^3$ и $1,61-1,80 \text{ г/см}^3$. Плотность скелета грунта отложений рассматриваемого комплекса чаще всего у суглинистых отложений составляет $1,30-1,70 \text{ г/см}^3$, а у песчаных – $1,21-1,40 \text{ г/см}^3$ и $1,90-1,93 \text{ г/см}^3$ [67].

Коэффициент пористости отложений первой морской террасы изменяется от 0,37 до 1 и более. Глинистые отложения в целом имеют менее плотное сложение, наиболее часто встречаемые значения коэффициента пористости 0,81-1,5. У песчаных разностей коэффициент пористости колеблется 0,37-1,4 при среднем значении 0,96. [67].

Осадка при оттаивании грунтов первой морской террасы в верхней части разреза. Без учета повторно-жильного льда под нагрузкой в 10 кПа осадка глинистых грунтов составляет около 320 мм/м. Осадка при оттаивании грунтов нижней части комплекса, обладающих более низкой льдистостью, снижается до десятков сантиметров [67].

Современные морские отложения

Современные морские отложения лайды встречаются вдоль прибрежной части Харасавэйского месторождения. Они представлены различными по гранулометрическому составу грунтами: от суглинисто-глинистых до песчаных разностей. Среди последних распространены пески пылеватые и мелкие. В настоящее время продолжается накопление осадков вдоль побережья Карского моря, которые в основном представлены песчаными

отложениями пляжной фации. На заливаемых территориях морских лайд идет образование илистых отложений.

Минералогический состав морских отложений лайды схож с составом вышеописанных морских грунтов. Песчаная фракция практически полностью состоит из легких минералов с доминированием кварца. Среди тяжелых минералов в песчаных отложениях наиболее часто встречаются амфиболы, лимонит, эпидот и др.

Суммарное содержание водорастворимых в морских отложениях лайды достаточно велико, в среднем оно составляет 1% и более. Грунты рассматриваемого комплекса относятся к средне- и чаще сильнозасоленным разностям. В составе водной вытяжки в большинстве случаев преобладают Na^+ и Cl^- . Водная вытяжка исследованных проб характеризуется нейтральной и слабощелочной реакцией – pH от 6,9 до 7,9 (табл. 17, 18) [67, 89-109].

Таблица 17. Состав и содержание водорастворимых солей в отложениях лайды Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [89-109]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Сухой остаток	Суммарное содержание солей
			мг	мг	мг	мг	мг	мг		
Скв. 1 Северная часть месторождения, близ озера Вархыто										
2,1-2,7	песок	7,3	17,1	18,5	14,9	2,8	2,7	17,0	0,1	0,07
7,5-8,1	песок	7,9	12,2	285,1	26,9	11,6	7,5	174,6	0,5	0,52

Таблица 18. Состав и содержание водорастворимых солей в отложениях лайды близ Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [67]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Сухой остаток
			мг-экв	мг-экв	мг-экв	мг-экв	мг-экв	мг-экв	
Западное побережье северного Ямала, устье реки Сядорьяха, 50 км на Север от Харасавэйского месторождения									
3,0-3,5	суглинок	6,9	0,32	6,80	4,16	0,10	1,70	9,48	0,71
5,0-5,5	песок	7,3	0,36	12,8	4,16	0,60	1,40	17,26	1,34
6,0-6,5	суглинок	6,9	0,64	10,8	2,49	0,40	0,40	13,13	1,11
10,0-10,1	глина	7,6	0,84	14,4	3,12	1,10	0,40	16,86	1,33

Современные морские отложения относятся к типу сингенетически промерзших грунтов, их температура изменяется от -5°C до -8°C (см. раздел 1.4). Отложения морской лайды наиболее часто имеют слоисто-сетчатую и слоистую криогенные текстуры, их объемная льдистость доходит до 60%. Песчаным отложениям свойственна массивная криогенная текстура. Сплошность многолетнемерзлых грунтов морской лайды зачастую

прерывается слоями охлажденных грунтов, насыщенных высокоминерализованными водами-криопэгами. Учитывая особенность данного комплекса отложений, следует избегать их использования для строительства подземных резервуаров (см. раздел 1.4) [67, 89-109].

Влажность современных морских отложений изменяется от 20% до 70-80% и более. Наиболее распространенные значения влажности составляют 20-45%. Наибольшая влажность отмечается у суглинисто-глинистых грунтов со слоистой и слоисто-сетчатой криогенными текстурами – до 80% и более. Суммарная влажность песчаных разностей в среднем составляет 25%, ее значения для отложений с массивной криогенной текстурой колеблются от 20 до 30% (табл. 19) [67, 89-109].

Таблица. 19. Некоторые показатели состава и свойств отложений морской лайды Харасавэйского месторождения

Показатели		Пески мелкие и пылеватые
Суммарная влажность w_{tot} , д.ед.		0,25 0,20-0,29 (23)
Плотность грунта, г/см ³		1,90 1,83-1,95 (17)
Плотность твердых частиц грунта, г/см ³		2,64 2,63-2,65 (5)
Плотность скелета грунта, г/см ³		1,53 1,49-1,58 (5)
Коэффициент пористости		0,74 0,67-0,78 (2)
Пластичность	верхний предел, %	-
	нижний предел, %	-
	число пластичности	-

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения и количество определений.

Плотность грунта суглинистых и глинистых отложений рассматриваемого комплекса изменяется от 1,04 до 2,08 г/см³. При этом наиболее распространенной является плотность суглинистого грунта от 1,60 до 1,95 г/см³. Плотность песчаных разностей в целом выше, ее значения варьируют в пределах от 1,20 до 2,08 г/см³. Чаще всего можно встретить песчаные грунты с плотностью 1,60-1,90 г/см³. Плотность твердых частиц песчаных морских отложений лайды в среднем составляет 2,64 г/см³. Ее значения изменяются от 2,63

г/см³ до 2,65 г/см³ (табл. 19) [67, 89-109]. Плотность скелета суглинистых и глинистых отложений изменяется в широком диапазоне от 0,66 до 1,75 г/см³, хотя чаще можно встретить значения от 1,10 до 1,60 г/см³. Для песчаных разностей она колеблется от 0,78 до 1,58 г/см³, при наиболее распространенных значениях от 1,20 до 1,50 г/см³ (табл. 19) [67, 89-109].

Коэффициент пористости глинистых отложений изменяется от 0,59 до 4, наиболее часто встречаются значения от 0,67 до 1,5. Песчаные разности имеют более плотное сложение, их коэффициент пористости в среднем составляет 0,74. (табл. 19) [67, 89-109].

Коэффициент сжимаемости песчаных слабозасоленных отложений морской лайды в среднем составляет 0,023 МПа⁻¹, коэффициент оттаивания – 0,024 МПа⁻¹ (табл. 20) [89-109].

Осадка при оттаивании современных морских отложений зависит от их гранулометрического состава и льдистости. Суглинистые и глинистые отложения, в основном со слоистыми криогенными текстурами, имеют осадку при оттаивании без нагрузки до 360 мм/м. Песчаные отложения с массивной криогенной текстурой характеризуются значительно меньшими значениями осадки, ее среднее значение составляет около 30 мм/м, при максимальном 45-50 мм/м [89-109].

Таблица 20. Коэффициенты сжимаемости и оттаивания мерзлых грунтов отложений морской лайды Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески мелкие
Коэффициент сжимаемости m , МПа ⁻¹ , температура -5,5 °С	0,023 0,009-0,044
Коэффициент оттаивания A_{th} , температура -5,5 °С	0,024 0,022-0,029

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальное значения.

Температура начала замерзания современных морских отложений сильно зависит от величины их засоленности. В толще исследуемых отложений часто встречаются сильнозасоленные грунты с низкой температурой начала замерзания -3 ÷ -5 °С и ниже. Их теплофизические свойства отличаются от выше рассмотренных комплексов и требуют отдельного рассмотрения. Ниже приведены показатели теплофизических свойств слабозасоленных песчаных отложений морской лайды, вскрытых в двух скважинах на прибрежной части Харасавэйского месторождения. Средняя температура начала замерзания песчаных разностей исследуемого комплекса составляет -0,2 °С, при максимальной -0,5 °С. Их объемная теплоемкость в мерзлом состоянии равна в среднем 1,90 Дж/(м³·°С)·10⁶, в талом – 2,68 Дж/(м³·°С)·10⁶; теплопроводность в мерзлом состоянии – 3,5 Вт/(м·°С), в талом – 2,15 Вт/(м·°С) (табл. 21) [89-109].

Таблица 21. Показатели теплофизических свойств отложений лайды Харасавэйского месторождения [89-109]

Показатели	Пески мелкие
Температура начала замерзания T_{bf} , °C	-0,2 0 – -0,5 (2)
Удельная теплоемкость скелета грунта $C_{уд.ск.}$, Дж/кг °C	705 (2)
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии C_{th} , Дж/(м ³ ·°C) 10 ⁶	2,68 (2)
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_f , Дж/(м ³ ·°C) 10 ⁶	1,90 (2)
Температуропроводность грунта в талом состоянии a_{th} , м ² /с 10 ⁻⁶	0,8 (2)
Температуропроводность грунта в мерзлом состоянии a_f , м ² /с 10 ⁻⁶	1,84 (2)
Теплопроводность грунта в талом состоянии l_{th} , Вт/(м °C)	2,15 (2)
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии l_f , Вт/(м °C)	3,5 (2)

Примечание: указаны среднее значение, минимальное - максимальные значения и количество определений.

Современные аллювиальные отложения

Среди аллювиальных отложений чаще всего встречается голоценовый аллювий, слагающий поймы рек территории Харасавэйского месторождения. Наибольшее распространение он имеет в пределах южной части исследуемой территории, где ширина пойм крупных рек достигает несколько километров (см. рис. 5).

Аллювиальные отложения имеют различный гранулометрический состав – от песков до суглинистых и глинистых разностей, которые местами переслаиваются в разрезе. Пойменный аллювий можно подразделить на две пачки. Нижняя часть разреза, русловая фация аллювия, в большинстве случаев сложена мелкими, реже средней крупности, и пылеватыми песками с включениями детрита и торфа. Выше по разрезу наблюдается увеличение дисперсности отложений – тут залегает пойменная фация, сложенная супесчано-суглинистыми и глинистыми отложениями. Верхняя часть разреза зачастую оторфована, кроме того, в большинстве случаев присутствуют включения плохо разложившихся растительных остатков, прослой и линзы намывного торфа и оторфованных песков. Для песков характерна типичная аллювиальная слоистость,

включения гравийно-галечного материала. В целом пески характеризуются большим содержанием пылеватых частиц (до 50-80%). В тыловых частях пойм некоторых рек встречаются горизонты погребенного минерализованного торфа толщиной до 20 см [44, 67, 86, 88].

Среди минералов аллювиальных отложений фракции 0,25-0,05 мм преобладает кварц (от 84 до 98%). Минералы тяжелой фракции представлены эпидотом, лимонитом, гранатом, лейкоксеном, сфеном, пироксеном и амфиболами. Глинистая фракция исследуемого комплекса состоит из гидрослюды, каолинита, смешаннослойных образований монтмориллонитово-гидрослюдистого состава, гидроксидов железа и др. Преобладают гидрослюды и смешаннослойные образования монтмориллонитово-гидрослюдистого состава [67].

Общее содержание водорастворимых солей в аллювиальных отложениях зависит от их расположения относительно устья реки в продольном направлении и русла реки в поперечном направлении. В низовьях рек отложения оказываются в зоне влияния нагонных и приливных явлений со стороны Карского моря. Это приводит к увеличению степени засоления аллювиальных грунтов, тут общее содержание солей может достигать до 3-4%. При удалении от устья рек степень засоления начинает снижаться, и на расстоянии более 50 км, вне зоны нагонного влияния, общее количество солей в среднем составляет менее 0,2-0,3% (табл. 22). Интересно, что в том же направлении меняется и тип засоления аллювиальных отложений, переходя от хлоридного к хлоридно-сульфатному и затем к гидрокарбонатному. Также наблюдается снижение степени засоления по мере приближения к руслу рек в поперечном направлении [44, 67, 86].

Таблица 22. Состав и содержание водорастворимых солей в аллювиальных отложениях Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [67]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	РН	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Сухой остаток %
			МГ-ЭКВ	МГ-ЭКВ	МГ-ЭКВ	МГ-ЭКВ	МГ-ЭКВ	МГ-ЭКВ	
Правый берег реки Харасавэй, 26 км ниже устья реки Лэрухейяха									
6,6-6,9	суглинок легкий	6,6	0,24	2,86	0,94	0,20	0,20	3,64	0,246
8,6-8,9	суглинок средний	6,8	0,54	3,94	0,82	0,20	0,20	4,9	0,336

Многолетнемерзлые грунты рассматриваемого комплекса сформировались сингенетическим путем. В большинстве своем они представлены сильнольдистыми грунтами с льдистостью более 40%, в которых зачастую развиты полигонально-жильные

льды (см. главу 4). Участки распространения таких льдов наиболее четко идентифицируются на поймах с полигонально-валиковым микрорельефом. Песчаные грунты имеют массивную и зачастую слоистую криогенные текстуры. Суглинисто-супесчаным и глинистым отложениям свойственны слоистые и слоисто-сетчатые и реже массивные криогенные текстуры [44, 67, 86].

Естественная влажность аллювиальных отложений зависит от их криогенного строения и дисперсности. Влажность песчаных отложений со слоистой криогенной текстурой доходит до 72%, ее значение у отложений с массивной текстурой обычно не превышает 25%. Оторфованные песчаные разности имеют влажность 35-50% и более. Влажность суглинисто-глинистых отложений со слоистой криогенной текстурой часто превышает 60% и более, для разностей с массивной криогенной текстурой это значение снижается до 45%.

Многолетнемерзлые грунты рассматриваемого комплекса при оттаивании дают значительные осадки. Суглинистые и глинистые грунты при оттаивании без нагрузки дадут осадку в среднем 220-240 мм/м, однако в сильнольдистых отложениях со слоистой криогенной текстурой это значение может доходить до 380 мм/м и более. Супесчаные грунты в среднем имеют осадку при оттаивании 100-170 мм/м и более. Песчаные разности при оттаивании без нагрузки дают осадку 80-150 мм/м. Такие значения у песчаных грунтов объясняются достаточно высокой льдистостью, в том числе за счет включения сегрегационного льда [44, 67, 86].

Современные болотные отложения

Современные болотные отложения локально распространены на всех геоморфологических уровнях территории Харасавэйского месторождения. Они представлены торфом различной степени разложения, который местами содержит тонкие минеральные прослойки. Наибольшее распространение имеют осоково-моховой и моховой слаборазложившийся торф, который в нижней части разреза может переходить в средне- и хорошо разложившийся. В торфах зачастую встречаются включения остатков болотной и кустарничковой растительности хорошей сохранности. Наибольшее развитие торфяники имеют в тыловых частях пойм крупных рек и на плоских участках водоразделов. Мощность торфов изменяется от 0,1-0,5 м, реже ее значение доходит до 1-2 м и более [83, 86].

Торфяные отложения в пределах рассматриваемой территории в основном находятся в мерзлом состоянии, их образование происходило сингенетическим путем. Криогенное строение торфа отличается избыточным льдовыделением, тут в основном фиксируются атакситовые криогенные текстуры. Также в торфяниках зачастую

развиваются сингенетические повторно-жильные льды, мощность которых в 90% случаев составляет 2-4 м, а ширина по верху – 1-2 м (см. раздел 1.4) [44, 67, 83].

Торфа имеют весьма высокую естественную влажность, малую плотность, большую влагоемкость и весьма значительную и неравномерную сжимаемость. Так, естественная влажность торфа может достигать до 1000% и более, в среднем это значение составляет 360%. Торф в основном относится к сильнольдистым отложениям, его видимая льдистость достигает 50-60%, а местами доходит до 90% и более [67].

Плотность торфа наиболее часто находится в диапазоне от 0,80 г/см³ до 0,90 г/см³, доходя иногда до 1,20 г/см³. Плотность скелета грунта достигает 0,70 г/см³ и наиболее часто встречается в диапазоне от 0,15 г/см³ до 0,20 г/см³ [67].

Ввиду высокой льдистости торфяных залежей, у них наблюдается значительная осадка при оттаивании. Так, ее значение местами составляет 400-600 мм/м и зачастую доходит до 600-800 мм/м [67].

Современные озерные отложения

Озерные отложения встречаются локально по всей территории Харасавэйского месторождения. Они слагают днища древних и современных озер, сдренированных озерных котловин. В подавляющем большинстве случаев озерные отложения представлены заиленными суглинками, реже супесями с тонкой горизонтальной слоистостью (типа ленточной). Характерно большое количество включений плохо разложившихся растительных остатков, отмечаются прослойки погребенного осоково-мохового торфа. В озерных суглинках встречаются тонкие прослойки супесей и песков, ожелезнение в виде пятен, слоев и отдельных горизонтов. Повышенное ожелезнение в верхней части разреза озерных отложений косвенно свидетельствует о формировании чаши протаивания под акваториями бывших озер и ее последующем промерзании. Мощность озерных отложений варьирует от 1 до 5 м, редко более. Зачастую озерные отложения перекрыты не мощным слоем торфяных залежей [86].

Озерные отложения в основном являются незасоленными или слабозасоленными. Степень засоления суглинисто-глинистых отложений в среднем колеблется в диапазоне 0,05-0,20%. Грунты характеризуются преимущественно хлоридно-сульфатным и сульфатным составом солей [88].

Озерные отложения вне акваторий находятся в мерзлом состоянии. Они сформировались сингенетическим путем и сложены в основном сильнольдистыми разностями. К отложениям рассматриваемого комплекса также зачастую приурочены сингенетические повторно-жильные льды (см. раздел 1.4).

Естественная влажность озерных отложений может достигать 80-90% и более. Для суглинисто-глинистых грунтов часто встречаются значения влажности от 30 до 55% и выше. Плотность озерных глинистых грунтов изменяется от 0,89 г/см³ до 2,30 г/см³. Их плотность скелета колеблется в диапазоне 0,59-1,95 г/см³. Пористость глинистых озерных отложений изменяется от 45% до 80% [67].

При оттаивании мерзлые озерные отложения дают значительную осадку. Без воздействия нагрузки осадка при оттаивании супесчано-суглинистых грунтов составляет 170-450 мм/м [67].

1.4. Мерзлотные и гидрогеологические условия территории Харасавэйского месторождения

Территория Харасавэйского месторождения относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов, которые наблюдаются повсеместно в пределах водоразделов, в долинах малых и средних рек, на морских пляжах и мелководьях [44, 67].

Мощность многолетнемерзлых грунтов изменяется от первых метров в субаквальных частях месторождения и до 180 м в его континентальной части. В пределах исследуемой территории прослеживается зависимость мощности мерзлых грунтов от возраста и генезиса геоморфологического уровня. Наибольшие мощности характерны для более древних геоморфологических уровней. Так, ее значение в пределах позднеплейстоценовых III-II морских террас колеблется от 130 до 180 м. В границах одного геоморфологического уровня наблюдается снижение мощности мерзлых грунтов от его тыловых частей к прибрежным. В пределах более молодых элементов, в южной части месторождения в районе поймы реки Харасавэй и западной прибрежной части лайды, мощность мерзлых грунтов снижается до 50 м и ниже [44].

На общую картину распределения мощностей многолетнемерзлых грунтов территории Харасавэйского месторождения оказывает влияние газоносный купол, расположенный на глубине более 700 м в районе позднеплейстоценовых террас. Это обстоятельство несколько нарушает общую закономерность ступенчатого увеличения мощности от молодых к древним геоморфологическим уровням и изменяет криогенное строение мерзлых грунтов. Так, над центральной частью газовой залежи, в пределах третьей и частично второй морских террас, мощность многолетнемерзлых грунтов сокращается до 130 м. Также тут изменяется соотношение пластичномерзлых и твердомерзлых грунтов, отмечается меньшее количество инъекционных пластовых залежей и др. (рис. 11) [44].

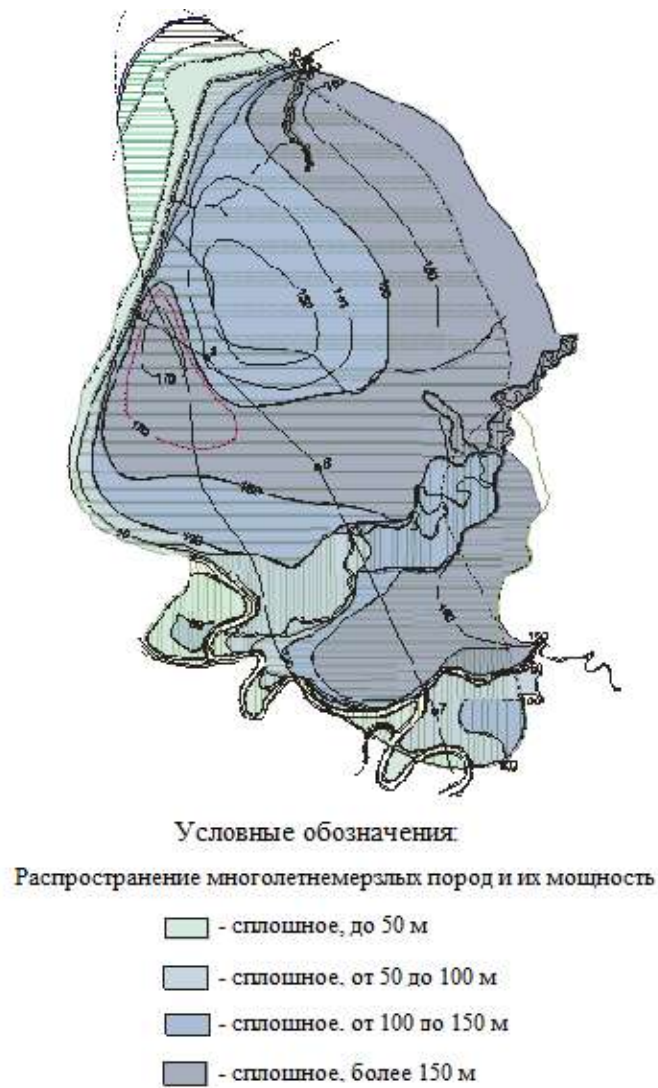


Рис. 11. Схема распространения многолетнемерзлых грунтов и их мощность на территории Харасавэйского месторождения [44]

Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов территории Харасавэйского месторождения до глубины 70 м охарактеризована в главе 2 и приведена в приложении 2. Здесь же дается информация о температуре мерзлых грунтов до глубины 10 м по данным инженерно-геокриологического районирования Харасавэйского месторождения, выполненного ООО «НПП ГЕОСИСТЕМ» в 2003 г. [83].

Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов до глубины 10 м изменяется от $-2 \div -8$ °С. Наиболее низкие значения температуры грунта $-6 \div -8$ °С отмечены в северо-западной и центральной прибрежных частях территории месторождения. Эти участки, например, лайда, зачастую лишены растительного и снежного покровов, что обуславливает низкие температуры мерзлых грунтов на фоне террасовой части месторождения. Аналогичную температуру можно встретить у многолетнемерзлых грунтов пойм крупных рек (рис. 12).

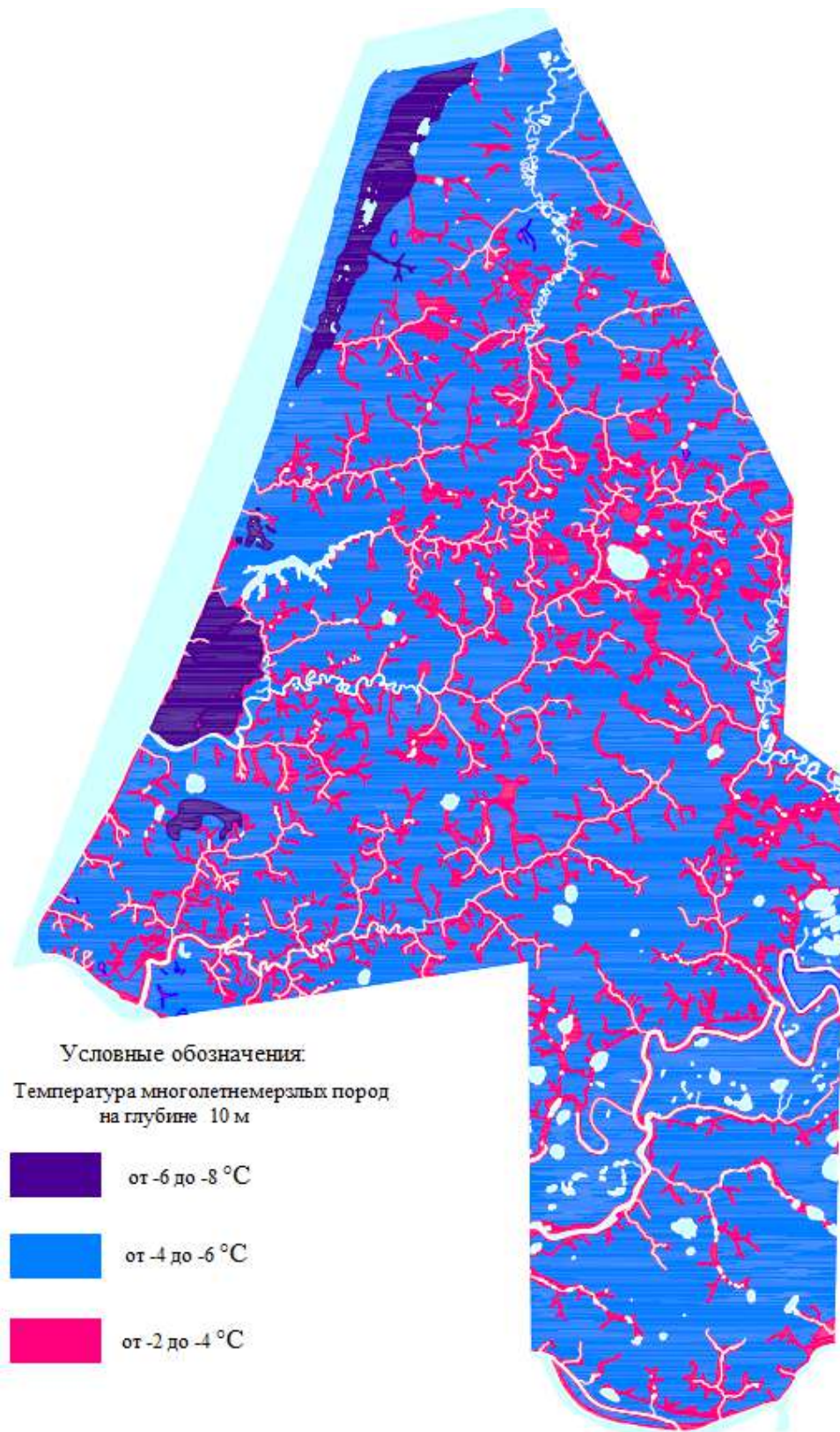


Рис. 12. Схема распределения среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов территории Харасавэйского месторождения на глубине 10 м [83]

Наиболее высокая температура грунтов (от -2 °С до -4 °С) наблюдается на участках повышенного снегонакопления – в днищах малых водотоков, в логах, ложбинах стока, оврагах, в нижних частях склонов, поросших густым ивняком. Такая же температура

наблюдается на более дренированных пойменных участках, часто занятых ивняками. На пляжах, береговых валах температура грунтов варьирует от -2°C до -5°C . В пределах участков травяно-сфагновых болот и торфяников температура грунтов изменяется в среднем от -5 до -6°C . В центральных частях плоских морских террас среднегодовая температура грунтов в среднем составляет $-4 \div -6^{\circ}\text{C}$ (рис. 12) [83].

На территории Харасавэйского месторождения развиты эпигенетически и сингенетически промерзшие многолетнемерзлые грунты. Верхняя часть мерзлой толщи месторождения сложена сингенетическими мерзлыми грунтами, а нижняя – эпигенетическими, которые преобладают до исследуемой глубины.

Сингенетические мерзлые грунты представлены образованиями голоценового и верхнеплейстоценового возрастов. Для них характерно распространение преимущественно сегрегационного и полигонально-жильного льдов. Первый встречается в виде частых слоев, шпиров и линз, ориентировка которых наклонная или горизонтальная. В разрезах встречено сетчатое расположение шпиров льда. Лед-цемент распространен гораздо меньше и характерен в основном для песчаных разностей. Отличительной особенностью этого типа отложений является более высокая льдистость по сравнению с нижележащими эпигенетически промерзшими отложениями [67].

Отложения регрессивной песчаной пачки казанцевской свиты являются наиболее древними сингенетическими грунтами. Для них характерна массивная криогенная текстура с льдом-цементом, реже встречаются тонкие шпирьы льда до 0,2 мм. Последнее характерно для пылеватых оторфованных песков, объемная льдистость которых достигает 50%. Мощность синкриогенных грунтов казанцевской свиты равна мощности ее регрессивной пачки и в среднем составляет 3-5 м, доходя местами до 10-12 м.

Для отложений третьей морской террасы наиболее характерны линзовидно-слоистые, слоисто-сетчатые, атакситовые и шпировые криотекстуры. Толщина шпиров льда чаще всего составляет первые миллиметры, местами доходит до 20 мм. Разрез суглинистых грунтов венчают линзовидно-слоистая и слоистая криотекстуры, которые с глубиной сменяются сетчатой. Суммарная льдистость здесь колеблется от 20-30% до 60%. Песчаные отложения третьей морской террасы имеют массивную криогенную текстуру, их объемная льдистость чаще равна 45%, изредка достигает 60% [67, 89-109].

Отложения второй морской террасы имеют в верхах разреза слоистую, линзовидно-слоистую криотекстуры, которые к низу переходят в слоисто-сетчатую и сетчатую. Объемная льдистость суглинистых отложений достигает 50-60%, из которых около 25-35% приходится на сегрегационный лед. Для отложений первой морской террасы характерна тонкошпировая частослоистая, сетчатая криотекстуры, объемная льдистость достигает

55%. Отложения лайды в целом имеют схожее криогенное строение с отложениями второй и первой террас. Криогенные текстуры тут от массивных у пылеватых песков до слоистых и сетчатых у супесей и суглинков. Объемная льдистость суглинистых и супесчаных грунтов колеблется от 50 до 70%, а у песчаных составляет 45-50% [67, 89-109].

В целом мощность синкриогенного горизонта отложений морских и голоценовых террас равна мощности их регрессивных пачек, в среднем составляет около 3-6 м. Голоценовые аллювиальные отложения имеют тонкошлировые слоистые криогенные текстуры. Объемная льдистость пылеватых песков доходит до 50%. Голоценовые озерные и болотные отложения, сложенные суглинком и торфом, имеют тонкошлировую линзовидно-плетенчатую криогенную текстуру. Для песчаных разностей характерна массивная криотекстура. Объемная льдистость суглинков за счет сегрегационного льда достигает 80-85%, в торфах – 60%. Мощность синкриогенных грунтов аллювиального генезиса равна суммарной мощности руслового и пойменного аллювия и доходит до 8-10 м [67].

Для сингенетических отложений территории Харасавэйского месторождения характерно широкое развитие полигонально-жильных льдов, которые приурочены к отложениям III-I морских террас, отложениям лайды, поймы рек и торфяникам.

В разрезах исследуемой территории встречены современные развивающиеся полигонально-жильные льды и неразвивающиеся (реликтовые). Первые из них залегают в синкриогенных отложениях аллювия речных долин, на лайдах морского побережья и в торфяниках разных геоморфологических уровней. Они выражены в рельефе полигональными валиковыми ваннами, тетрагональной формы в плане. Современные полигонально-жильные льды зачастую имеют ярусное строение: верхний ярус расширяется книзу в виде жилы до 50 см высотой и состоит из тонких жилок толщиной около 0,3 см. Нижний более крупный ярус, шириной до 2 м и высотой до 4 м, состоит из жилок шириной 1 см и высотой до 0,6 м. На пойменных участках также распространены повторно-жильные льды на глубинах до 2 м от поверхности, перекрытые сверху сезонно-талым слоем грунта. Их клиновидная форма постепенно расширяется к верхам, ширина доходит до 2 м, а высота до 5 м [67].

В целом в пойменных и лайдовых отложениях мощность повторно-жильных льдов в основном составляет 2-4 м, ширина 1-2 м по верху, объемная макрольдистость (льдистость мерзлых грунтов за счет полигонально-жильных льдов) в суглинистых и супесчаных отложениях составляет 6-10%, в песчаных – 3-8% [44]. Химический состав современных ледяных жил в пределах пойм рек и лайды – ультрапресный, минерализация в среднем составляет 0,03-0,05 г/л [67].

Повторно-жильные льды в пределах торфяников по высоте достигают 2-6 м, по ширине по верху 0,2-2 м, их объемная макрольдистость варьирует от 3 до 10%. Их рост продолжался на протяжении голоцена, включая период голоценового оптимума, в настоящее время жилы развиваются преимущественно в низинных полигональных торфяниках [44].

Неразвивающиеся повторно-жильные льды в синкриогенных грунтах приурочены к позднеплейстоценовым отложениям. Так, в пределах третьей и второй морских террас они имеют ширину около 1 м, реже больше, их мощность по вертикали доходит до 5-6 м. Глубина залегания реликтовых повторно-жильных льдов в позднеплейстоценовых отложениях изменяется от 2-5 м, достигая местами 8-10 м. В торфяных массивах развиты наиболее крупные ледяные жилы высотой до 15 м и шириной по верху 4 м, объемная макрольдистость составляет 20-35%. Химический состав повторно-жильных льдов верхнеплейстоценовых и голоценовых отложений морских террас – хлоридно-натриевый и хлоридно-кальциевый с общей минерализацией от 0,2 до 0,5 г/л [44, 67].

Схематическая карта льдистости сингенетических отложений верхней части разреза (до глубины 10-20 м) с учетом льдистости за счет повторно-жильных льдов для территории Харасавэйского месторождения представлена на рис. 13.

Эпигенетические многолетнемерзлые грунты слагают нижнюю часть разреза исследуемой толщи, залегая под синкриогенным горизонтом. Они представлены глинистыми, супесчано-суглинистыми и песчаными грунтами верхнего и среднего плейстоцена. Эпикриогенные грунты территории Харасавэйского месторождения характеризуются убыванием льдистости с глубиной от льдистых и слабольшдистых к нельдистым разностям. В целом им присущи включения льда-цемента и сегрегационного льда, причем первый из них наиболее распространен. При этом в толщах эпикриогенных грунтов залегают полигонально-жильные и мощные пластовые льды, последние распространены шире и имеют большое значение для сооружения подземных резервуаров для захоронения отходов бурения (см. ниже).

Для глинистых и суглинистых эпигенетических отложений салехардской свиты наиболее характерна массивная криогенная текстура. В верхней части ее разреза встречаются тонкошлировые, сетчато-слоистые и сетчатые текстуры. Толщина шлиров в среднем составляет 1-3 мм, местами доходя до 8 мм. Песчаные и супесчаные отложения свиты, развитые преимущественно в верхах, характеризуются массивной криогенной текстурой. Суммарная льдистость грунтов салехардской свиты в среднем составляет 25-29%, местами может доходить до 33-36%. В целом отложения свиты являются нельдистыми, реже встречаются слабольшдистые разности.

Условные обозначения:

1. Криогенетические типы и льдистость ММП

Генетические типы толщ		Синкриогенные в пределах верхних 10-12 м				Синкриогенные, подстилаемые эпикриогенными
Состав толщ		Песчаные грунты	Глинистые грунты	Песчаные мощностью 3-5 м, перекрытые глинистыми	Переслаивание песчаных и глинистых грунтов, с преобладанием песчаных	Песчаные грунты
Льдистость						
За счет цементации и шпирового льда	Льдистые $0,2 < L_i < 0,4$					
	Сильнольдистые $L_i > 0,4$					
За счет полигонально-жильного льда	$0,05 < L_i < 0,2$					
	$L_i > 0,2$					

2. Генетические типы залежеобразующих льдов

- инъекционные и сегрегационно-инъекционные льды

3. Прочие знаки

- граница многолетнемерзлых грунтов

- граница участков, сложенных разными по составу и льдистости грунтами

- граница геоморфологических уровней



Рис. 13. Схематическая карта льдистости мерзлых отложений до глубины 10-20 м Харасавэйского месторождения [44]

Песчаные грунты казанцевской свиты характеризуются массивной криогенной текстурой. Их суммарная льдистость в среднем составляет 40%. Распространены слабольдистые и льдистые песчаные разности, последние из которых преобладают. Местами они имеют редкослоистые криотекстуры с разнонаправленными шлирами льда толщиной в среднем 1-6 мм, местами до 12 мм. Глинистые разности казанцевской свиты представлены слоисто-сетчатыми и слоистыми криогенными текстурами. Льдистость тут доходит до 50-60%, по разрезу встречаются субвертикальные шлиры льда толщиной от 1 мм до 7 мм.

Эпигенетические отложения III-I морских террас сложены суглинистыми и глинистыми разностями, они залегают под синкриогенным горизонтом на глубинах около 3-6 м. Они характеризуются слоисто-сетчатой и слоистой криотекстурами и достаточно высокой льдистостью.

Эпигенетические повторно-жильные льды в пределах территории Харасавэйского месторождения распространены реже, чем сингенетические. Неразвивающиеся (реликтовые) жильные льды располагаются под сезонно-талым слоем на глубине около 3-4 м. Их высота составляет менее 3 м, а ширина по верху 0,5-1 м, за счет них льдистость мерзлых грунтов увеличивается в среднем на 5%. Реликтовые эпигенетические жильные льды также отмечаются в сингенетических грунтах верхнего плейстоцена и голоцена в морских и аллювиальных отложениях вместе с сингенетическими повторно-жильными льдами [44].

Одной из важнейших особенностей криогенного строения многолетнемерзлых грунтов территории Харасавэйского месторождения является наличие *в них крупных пластовых льдов¹ в виде линз и пластов*. Они встречаются в отложениях разного возраста и генезиса. Наиболее широко пластовые льды распространены в отложениях плейстоцена третьей и второй морских террас и голоцена первой морской террасы, реже приурочены к грунтам озерно-болотного, аллювиального генезисов и морским отложениям лайды [44].

Пластовые льды залегают в мерзлых грунтах преимущественно на контактах песчаных и глинистых слоев. По данным Г.И. Дубикова более 4/5 льдов перекрыты глинистыми отложениями и около 2/3 залегают над песчаными грунтами [33, 44].

Глинистые и суглинистые отложения, перекрывающие инъекционные пластовые льды, зачастую являются льдонасыщенными с атакситовой или сетчатой криогенной текстурой. При этом распределение льдистости в перекрывающих отложениях зависит от глубины заложения пласта льда. Если его кровля располагается на глубине около 20 м и

¹ В настоящей работе под понятием «пластовый лед» подразумевается мощный слой льда более 0,5 м толщиной в виде линзы, пласта или лакколита.

более, то перекрывающие отложения будут иметь трехслойное строение. В верхней от поверхности части (около 5-10 м) их льдистость будет составлять в среднем 40-50%, криотекстура слоистая и сетчато-слоистая. В средней части (10-15 м) будет наблюдаться снижение льдистости до 20-30%, криотекстура – сетчатая. А в нижней, наиболее близкой части к пласту льда, льдистость будет возрастать до 60-80%, криотекстура – атакситовая. Если ледяной пласт залегает на глубинах менее 5-10 м от поверхности, то средняя слабольдистая часть будет отсутствовать, льдистость глинистых отложений будет равномерно возрастать с глубиной [67].

Наиболее распространены пластовые залежи льда без нарушения слоистости вмещающих грунтов с высокой льдистостью отложений над кровлей ледяных тел. Реже встречаются льды, внедренные в отложения с деформациями вмещающих грунтов [67].

Основная часть пластовых льдов находится на глубинах до 15-25 м, реже они встречаются глубже (до 50 и 100 м) [35, 44]. Кровля подземных льдов в более чем 90% случаев располагается на глубине менее 20 м. Протяженность подземных льдов различна – от 10 м до 200 м и более (табл. 23) [44, 67].

Мощность пластовых льдов территории Харасавэйского месторождения в среднем колеблется от 2 до 4 м. Наибольшее количество льда (около 60%) имеет толщину до 2 м, около 30% от 2 до 6 м. Реже встречаются мощные льды более 9 м (рис. 14) [83, 89-109, 110-112].

Таблица 23. Встречаемость глубины залегания кровли и подошвы пластовых льдов в пределах территории Харасавэйского месторождения [83, 89-109, 110-112]

Глубина залегания, м	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
Кровля пластового льда						
Встречаемость, %	65,7	12,9	16,4	2,6	1,4	0,7
Число случаев	92	16	21	3	2	1
Подошва пластового льда						
Встречаемость, %	52,1	17,1	19,7	7,0	2,8	0,7
Число случаев	74	25	24	7	4	1

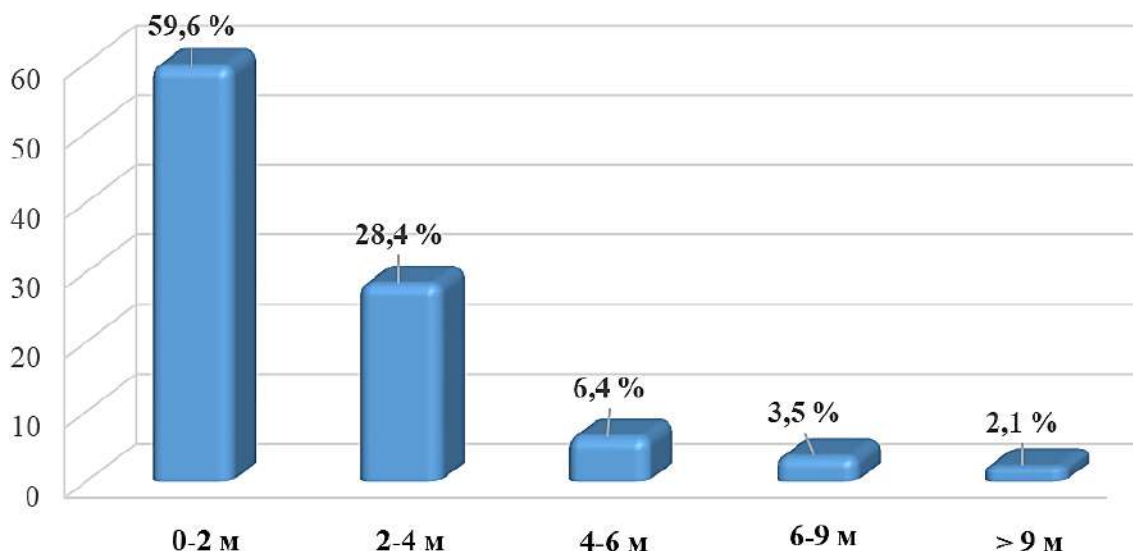


Рис.14. Встречаемость пластовых льдов различной мощности в многолетнемерзлых грунтах территории Харасавэйского месторождения [83, 89-109, 110-112]

Для полного анализа криогенного строения грунтовых толщ Харасавэйского месторождения необходимо рассмотреть все многообразие условий залегания, строения и состава пластовых льдов территории. С этой целью был собран и проанализирован следующий материал.

1. Данные исследований Ю.К. Васильчука и др. [9-12], В.В. Орлянского [51]; М.А. Великоцкого и Ю.В. Мудрова [13], Н.Ф. Григорьева [29]; Ф.А. Каплянской [42], Г.И. Дубикова [33-35] и др.

2. Фактические данные, полученные по результатам:

- инженерных изысканий бурения более 50 скважин глубиной 10-15 м под обустройство Харасавэйского месторождения и специальных скважин глубиной 50 м на кустовых площадках [83, 85, 86];

- инженерно-геологических изысканий по данным более 30 скважин, пробуренных на территории всего Харасавэйского месторождения в 2013–2016 гг. ОАО «ВНИПИгаздобыча», ООО Научно-технической фирмой «Криос» [89-109, 110-112];

- бурения более 25 технологических скважин с отбором керна на площадках строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в 2017-2021 гг. ООО «СЦ СБМ».

Для начала приведем результаты имеющихся исследований, представленных в работах [9-12], [42], [51].

Ю.К. Васильчук описал пластовые залежи льда в отложениях второй морской террасы, вскрытые в 15-м береговом обрыве протяженностью около 300 м близ поселка

Харасавэй. Лед здесь состоит из чистого льда с малым количеством минеральных примесей и ледогрунта. Последний представляет собой субгоризонтальное чередование ледяных шпиров от 5-12 см и песчаных прослоев до 3 см. Пластовые чистые льды с малым количеством минеральных примесей вскрыты в разных частях рассматриваемого обнажения, местами их верхняя часть замутнена молочно-белым льдом или имеет прослой песка. Молочно-белый лед имеет существенные текстурные отличия, его слой насыщен мелкими пузырьками воздуха (около 5%) 1 мм в диаметре с множеством изломанных и пересекающих друг друга плоскостей скола. Общая мощность пластовых льдов в среднем составляет более 1,5 м, они залегают как в виде горизонтальных слоев протяженностью более 10-15 м, так и в форме штока размерами 1,5 на 1,3 м [10, 44].

Ф.А. Каплянской обследован береговой обрыв абразионного уступа у поселка Харасавэй высотой 5-14 м и длиной 1 км. В мерзлых отложениях вскрыты мощные пластовые льды, которые имеют признаки совместного пластического течения. Кровля залежей льда неровная, она местами поднимается до высоты уровня моря 6 м, а местами опускается ниже него. Отмечено различное залегание льда от горизонтального до крутонаклонного, местами достигающее до вертикального, что формирует в отложениях пологие и крутые складчатые дислокации. По-видимому, такое залегание является следствием выдавливания грунтовых и ледяных масс вверх [44, 42] (рис. 15).

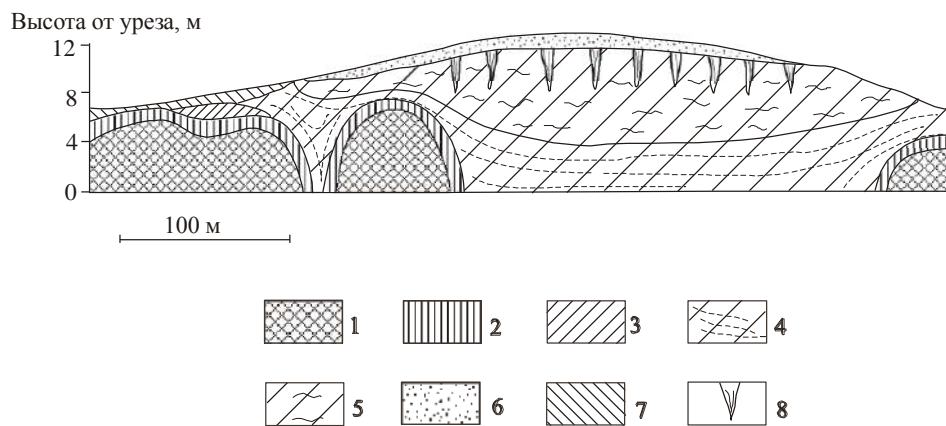


Рис. 15. Схема строения обрыва абразионного берега у поселка Харасавэй [44, 42]:

1 – ледяные пласты с супесями; 2 – суглинки; 3 – делювиально-солифлюкционные позднеледниковые отложения; 4 – ленточно-слоистые и плитчатые озерные отложения; 5 – неясно и скрытослоистые озерные отложения; 6 – покровные песчаные отложения; 7 – современные делювиально-солифлюкционные отложения; 8 – ледяные жилы

Пластовые льды рассматриваемого обнажения имеют различное строение, местами встречаются льды с небольшими слоями грунта, в других случаях имеют место отдельные ледяные тела с малым количеством минеральных примесей. Последние в подавляющем

большинстве случаев являются прозрачными и чистыми с включением взвешенных агрегатов грунта и реже представлены молочно-белым льдом. Преобладают в разрезе ледогрунтовые тела с чередованием слоев льда и грунта толщиной от 1 см до 20 см, реже до 0,5 м. Их общая льдистость варьирует от 40 до 70%. Грунт тут в основном представлен супесью и тонкозернистым песком [44, 42].

Интересное описание строения пластовых льдов близ поселка Харасавэй приводит А.М. Хименков [44]. В обнажении вскрыты суглинисто-супесчаные отложения, деформированные подстилающей ледогрунтовой толщей со следами течения и включением блоков льда. Строение ледогрунтовой толщи можно подразделить на три группы ледяных тел. *Первая* представляет собой изометричные отдельные ледяные тела размером от десятка сантиметров до нескольких метров. Они состоят из чистого льда и зон с повышенным количеством воздушных включений. Ледяные тела включены в деформированную ледогрунтовую массу. По данным структурных исследований выявлено, что размер кристаллов льда в поперечнике составляет 3-4 см при большом содержании воздуха и 10-15 см с малым содержанием воздуха. В ледяных телах с трещинами наблюдается перестройка кристаллов льда с выращенной полигональностью внутри них. Кристаллы тут разделены на прямоугольные секторы, по границам которых присутствуют воздушные включения. *Вторая группа* представляет собой ледяные тела со следами течения, которые залегают согласно слоистости ледогрунтовой третьей зоны. Длина этих льдов составляет десятки сантиметров, их форма разнообразна, но зачастую вытянута параллельно слоистости. Следы течения выражаются в наличии множества сколов, параллельно общей слоистости вмещающей толщи. В ледяных телах присутствует большое количество трещин, заполненных грунтовыми примесями. Кристаллы льда тут зачастую имеют округлую форму, что говорит о пластическом деформировании льда. *Третья группа* представляет собой мощную ледогрунтовую слоистую массу, в которой взвешены блоки первой группы и ледяные тела второй группы. Слои льда чередуются с прослоями ледогрунта, их толщина изменяется от нескольких миллиметров до 20 см. В ледогрунте встречено чередование прослоев песка 1-5 см и льда 10-15 см. Залегание слоев различное – от горизонтального до вертикального, слои смяты в складки. В целом такое строение пластового льда говорит о его пластическом течении – ледогрунтовая масса двигалась и увлекала всю толщу, блоки льда и грунта, приподнимая перекрывающие супесчано-суглинистые отложения [44].

М.А. Великоцкий и Ю.В. Мудров описали криогенное строение двух обнажений с пластовыми льдами [13, 44]. Первое из них расположено в 15 км к северу от мыса Бурунный и представляет собой обрывистый берег высотой около 25 м. В нижней части обнажения

вскрыты дислоцированные пески с неровной кровлей мощностью более 10 м. На контакте песков и вышележащих суглинистых-глинистых отложений встречены пластовые льды мощностью до 5 м и протяженностью по простиранию до 150 м. Пески и пластовые льды местами смяты в диапировые складки и проникают в перекрывающие отложения. Формирование складок, по-видимому, происходило путем перемещения вверх грунтов с меньшей плотностью и большей пластичностью, сквозь вышележащие более плотные грунты с дальнейшим прорывом и смятием в стадии диагенеза [13]. Второе обнажение высотой 12 м и протяженностью более 1 км расположено близ поселка Харасавэй. В его верхней части вскрыты суглинистые отложения мощностью до 15 м. Ниже по разрезу залегают песчаные грунты с приуроченными к ним пластовыми льдами (рис. 16).

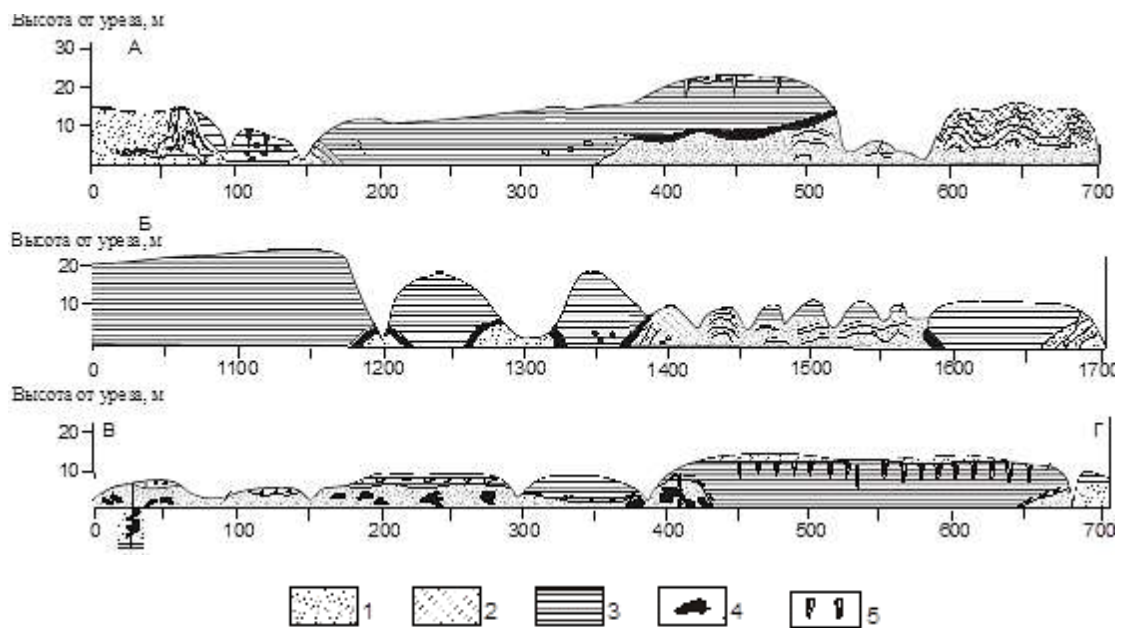


Рис. 16. Пластовые льды в отложениях Харасавэйского района: А-Б – обнажение «Черный берег» в 15 км к северу от мыса Бурунный; В-Г – обнажение у пос. Харасавэй; 1 – песок; 2 – супесь; 3 – глина; 4 – ледяные пласты; 5 – повторно-жильные льды [44]

Пластовые льды в рассмотренных обнажениях залегают согласно с горизонтальными или дислоцированными пачками вмещающих отложений. Они повторяют форму складок и часто приурочены к верхним частям крыльев. Особенностью является приуроченность пластовых льдов к зоне контакта песчаных и перекрывающих их суглинистых грунтов. Мощность пластовых тел здесь колеблется от десятков сантиметров до 3-5 м. По данным М.А. Великоцкого и Ю.В. Мудрова в разрезе многолетнемерзлых грунтов выделяются три следующих вида пластовых льдов [13, 44].

Первый вид льда – это прозрачный и чистый лед (стекловидный). В его толще наблюдаются редкие сплюснутые пузырьки воздуха диаметром 2-5 мм, достигающие

местами 10 мм. Изредка во льду встречаются отдельные комочки и прослойки грунта. Чистый лед часто залегает в нижних частях мощных линз молочно-белого льда и под супесчаными отложениями. Он состоит из кристаллов, имеющих размер от 5 до 15-20 см, иногда встречаются вытянутые кристаллы, расположенные вкрест простираения слоев льда.

Второй вид льда представлен непрозрачным молочно-белым льдом с большим количеством мелких пузырьков воздуха и отдельными комочками, и прослоями грунта. Здесь встречаются сплюснутые, скрученные в спирали пузырьки воздуха диаметром от 0,3 мм до 2 мм, толщиной до 1 мм и овальные пузырьки диаметром до 5 мм. Молочно-белый тип льда чаще встречается обособленными линзами, окаймленными слоистыми ледогрунтами и льдами, его кристаллы имеют различный размер – от крупных 20 см в поперечнике до мелких 0,5-1 см в поперечнике.

Третий вид льда – это слоистый лед или ледогрунт. Он состоит из переслаивания льда, песка, супеси, иногда органических включений. Лед прослоек чистый и прозрачный, его толщина варьирует от 1-2 мм до 10 см, края расплывчатые и неровные с удлиненными до 10 см пузырьками воздуха шириной 2 мм, расположенными поперек слоистости. Слойки минеральных частиц и органики также неровные с хлопьевидными очертаниями. Пески и супеси зачастую образуют плоские мелкие линзочки [13]. Рассмотренные 3 вида льда в большинстве случаев сочетаются и переслаиваются друг с другом в разрезах.

В.В. Орлянский изучил пластовые залежи льда по профилю протяженностью около 80 км на побережье Харасавэйского месторождения, проходящему по I-III морским террасам, а также в береговых обнажениях рек, озер и морского побережья [51]. Он тоже отмечает закономерность залегания пластовых залежей на контакте песчаных и суглинисто-глинистых отложений. Причем пластовые льды зачастую встречаются в форме линз, приуроченных к куполовидным поднятием подошвы перекрывающих глинистых отложений. Образованные тем самым складки имеют расстояния между крыльями по подошве несколько десятков метров и амплитуду 10-20 м. Пример такого залегания пластовых льдов у мыса Харасавэй приведен на рис. 17.

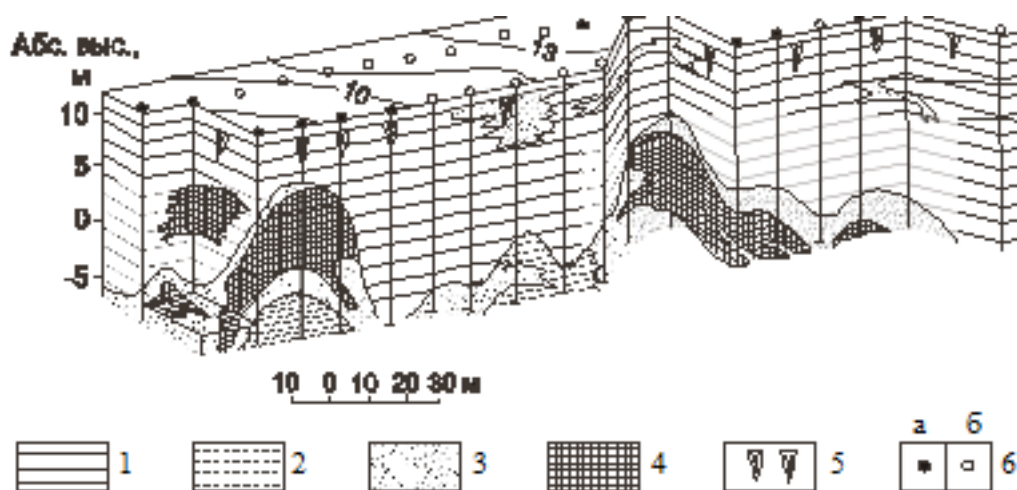


Рис. 17. Залежи пластовых льдов в районе мыса Харасавэй [44, 51]:

1 – глины и суглинки; 2 – супеси; 3 – пески; 4 – инъекционные льды; 5 – повторно-жильные льды и льдопесчаные жилы; 6 – скважины, вскрывшие (а) и не вскрывшие (б) подземные льды

Теперь проведем анализ фактического материала, собранного по данным бурения скважин при инженерных изысканиях [83, 85, 86, 89-109, 110-112] и при строительстве подземных резервуаров на площадках Север и Центр в пределах исследуемой территории.

В работе [83, 85] представлены результаты исследований керна более чем 50 скважин, пробуренных по территории всего Харасавэйского месторождения. Во вскрытых мерзлых грунтах различного возраста встречено огромное количество пластовых залежей льда на глубинах от 5 м до 20 м и более. К сожалению, их литологическое описание не является достаточно подробным, в связи с чем с использованием данного материала можно привести лишь следующее, ориентировочное криогенное строение. Большинство вскрытых пластовых льдов приурочены к кровле песчаных отложений, их строение представляет собой чередование слоев толщиной около 10 см чистого льда с мутным льдом, который содержит рассеянные частицы грунта и слои пылеватого песка с нечеткими границами. Льдистость таких пластовых льдов колеблется от 70 до 100%, а мощность составляет в среднем 2-7 м [83, 85].

Более подробное описание пластового льда проведено при инженерных изысканиях в 2013-2016 гг., в ходе которых льды были обнаружены более чем в 8 скважинах на территории Харасавэйского месторождения (рис. 18-21) [88-109]. Подробное описание условий их залегания и характеристик приведены в приложении 3.

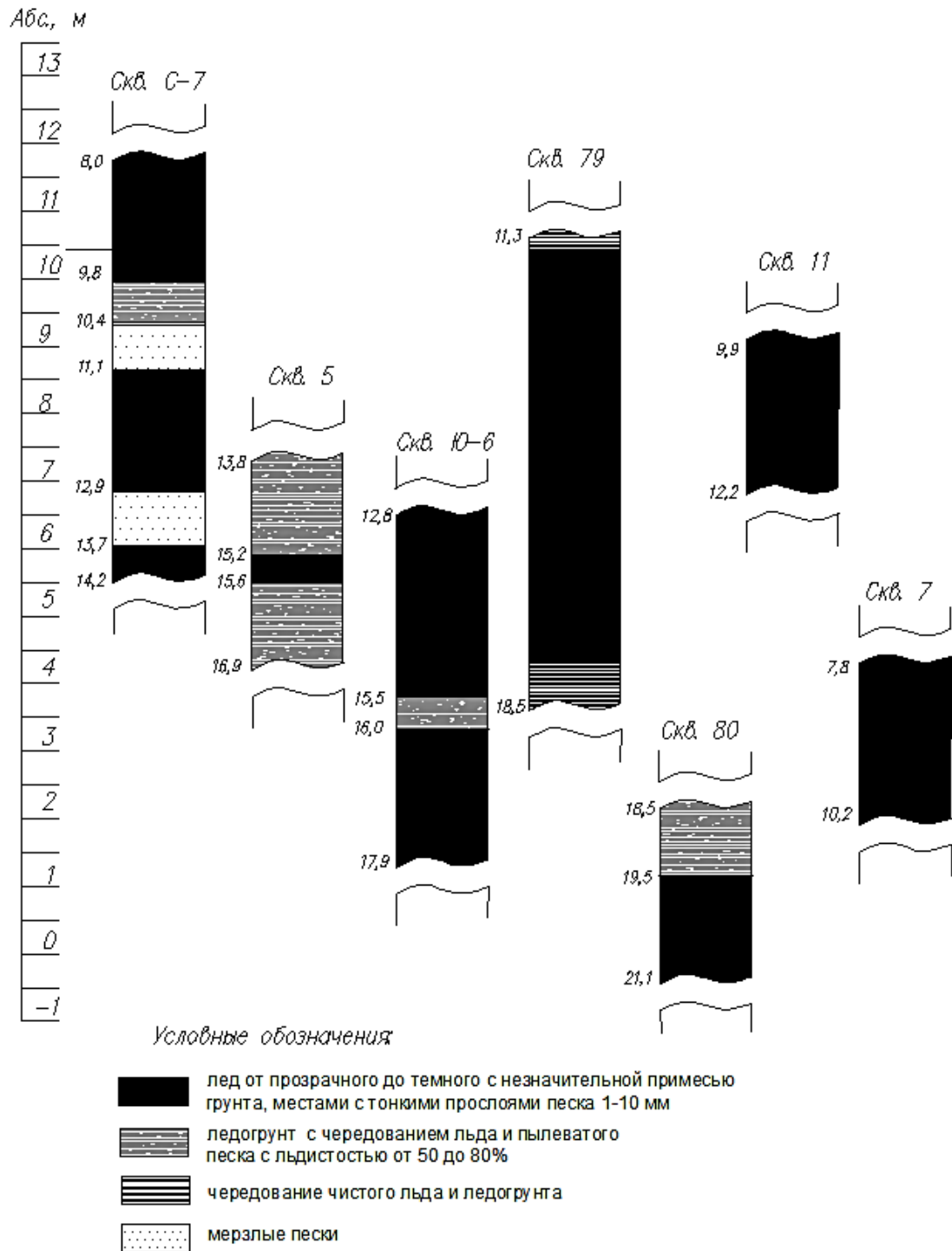


Рис. 18. Строение пластовых залежей льда по данным [88-109]

По большей части вскрытые пластовые залежи льда имеют сложное строение и представляют собой сочетание в разрезе ледяных тел с различным составом и количеством минеральных примесей – тут встречены как отдельные мощные слои льда и ледогрунта, так и их чередование друг с другом и с грунтовыми прослоями различной мощности. Исходя из особенностей строения данных пластовых льдов, их можно подразделить на несколько видов. *Первым* из них является слоистый лед, который характеризуется переслаиванием чистого льда, ледогрунта и местами мерзлого грунта в различных процентных

соотношениях. Последний чаще всего представлен мерзлым пылеватым песком, реже мелким, мощность которого может достигать десятков сантиметров. Например, к первому виду отнесены слоистые пластовые залежи, вскрытые в скважинах с-7 и 80. В скважине с-7 пластовый лед мощностью 6,2 м в средней и нижней частях содержит два достаточно толстых слоя мерзлых песков – 0,7 м и 0,8 м. При этом над слоем верхнего песка залегает слой ледогрунта мощностью 0,6 м и льдистостью до 80%. Остальная часть залежи здесь сложена льдом полупрозрачным и мутным с малым количеством минеральных примесей. В скважине 80 пластовый лед примерно на 40% состоит из ледогрунта, который залегает в его верхней части. Ледогрунт здесь представляет чередование слоев чистого льда и льда с песчаными включениями толщиной от 1 см и более. Ниже встречен чистый лед с малым количеством минеральных примесей (менее 5%), в нем наблюдаются редкие прослои песка от 1 до 5 мм и редкие слойки песка (рис. 18).

Несколько иное строение наблюдается у пластовых льдов, вскрытых в скважине 5. Они сложены преимущественно ледогрунтами с редкими прослоями чистого льда, мощностью менее 15% залежи. Ледогрунты здесь характеризуются чередованием пылеватого песка и льда толщиной от 1-2 мм. Пластовые льды с преимущественным распространением ледогрунтов можно отнести *ко второму виду пластовых залежей льда* (рис. 18).

Третий вид пластовых залежей льда вскрыт в скважинах 7, 11, ю-6, 79, хотя по литературным данным встречается достаточно редко. Его строение характеризуется преимущественно мощными слоями чистого льда с незначительным количеством примесей, которые местами могут включать редкие и тонкие прослои грунта и ледогрунта. Чистый лед в рассматриваемом виде составляет более чем 85-90% пластовой залежи льда, его цвет и прозрачность варьирует от серого, мутного и непрозрачного до белого, полупрозрачного и прозрачного. В разрезах зачастую можно встретить чередование прозрачного и мутного льда, последний чаще расположен в верхних и нижних частях залежи.

В 2017-2022 гг. на двух площадках строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения производилось бурение технологических скважин с отбором керна. В ходе работ выполняли изучение литологического строения вскрытых грунтов с целью использования этих данных для расчета технологического регламента размыва каждого резервуара (см. главу 4). Полученные фактические материалы поинтервального описания керна оказались достаточно подробными и были использованы для анализа строения пластовых льдов территории.

Первая площадка строительства Центр размерами около 540 x 255 м (площадь более 130 тыс. м²) находится в центральной части месторождения (см. ниже рис. 27). В ее пределах было пробурено порядка 36 скважин, в четырех из которых вскрыли мощные пластовые льды (рис. 19). Их строение имеет общие черты с вышеописанными 3 видами пластовых залежей. В скважинах 2 и 6 рассматриваемой площадки в разрезе залегают ледогрунтовые тела *второго вида залежей*. Они на всю мощность сложены ледогрунтами с чередованием льда 3-15 см, местами 20 см, и пылеватого песка 1-20 мм, местами до 20 см. Реже в качестве грунтовых прослоев могут встретиться суглинки с толщиной слоев от 5-15 мм до 24 см. Лед прослоев залежи зачастую является прозрачным. Общая льдистость ледогрунтов изменяется от 60 до 90%.

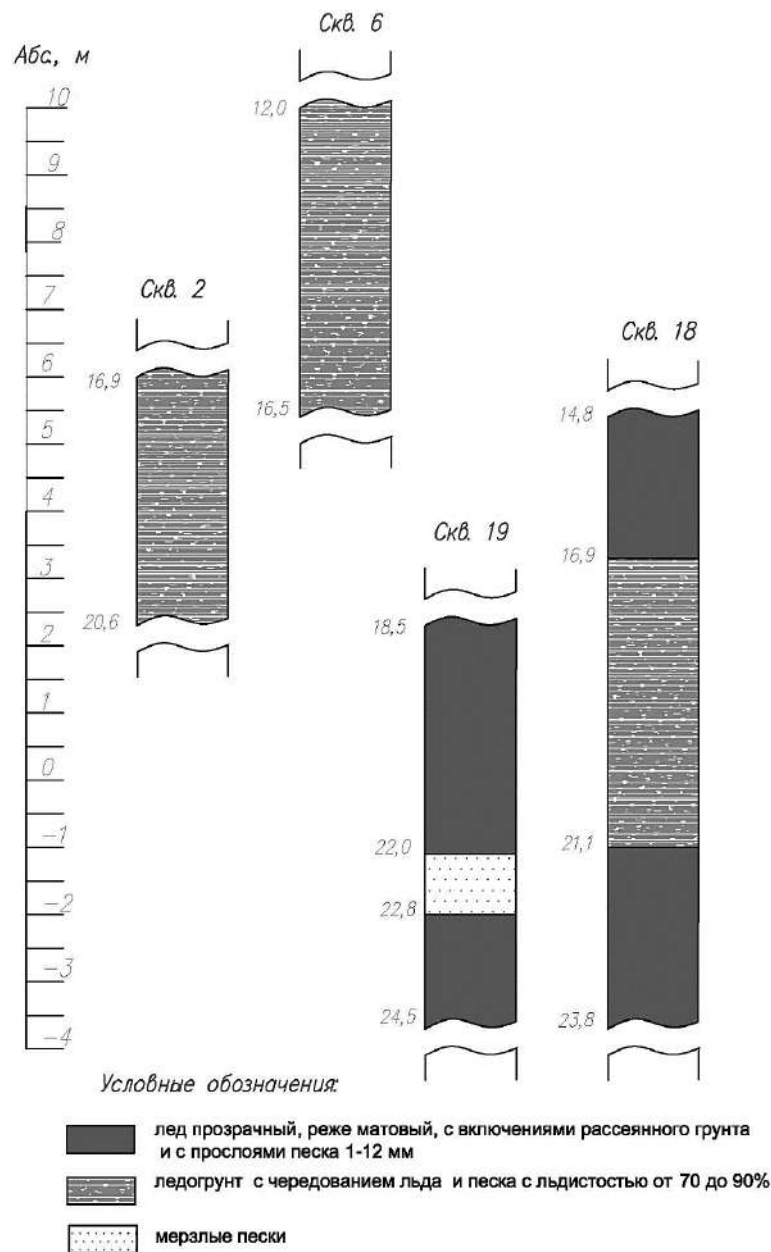


Рис. 19. Строение пластовых залежей льда, вскрытых в пределах площадки строительства подземных резервуаров Центр

Пластовые льды, вскрытые в скважинах 18 и 19 площадки Центр, относятся к *первому слоистому виду залежей*. Тут наблюдается переслаивание льда с мерзлыми грунтами и ледогрунтами. Лед слоев залежей преимущественно прозрачный, местами мутный или матовый, его слои содержат незначительное количество примесей рассеянного песка 3-5%. В слоях льда часто встречаются тонкие прослойки песка толщиной 1-12 мм, которые местами могут достигать 2-10 см. Общая льдистость слоев льда составляет 85-90% и более. Ледогрунтовые слои представляют собой чередование прозрачного льда с частыми прослоями пылеватого песка толщиной 2-40 мм. Слои мерзлого грунта представлены песками мелкими с прослоями торфа, они слагают менее 15% общей мощности пластовой залежи.

Вторая площадка строительства Север размерами около 680 x 350 м (площадь более 235 тыс. м²) расположена в северо-западной части месторождения. К 2021 г. в ее пределах пробурено более 30 скважин, в семнадцати из которых были вскрыты пластовые льды. Их строение в целом схоже с вышеописанными – тут встречаются все три рассмотренных вида пластовых залежей значительной мощности, приуроченные к кровле песчаного пласта или находящиеся в ее средней части. Так, *пластовые залежи третьего вида*, на всю мощность сложенные чистым льдом, вскрыты в скважинах 73, 77, 78 и 79. Лед тут от прозрачного до матового с редкими прослоями песка 1-10 мм, местами до 20-60 мм, и примесью рассеянного грунта 3-8%.

Ледогрунтовые залежи второго вида в пределах рассматриваемой площадки встречены в отложениях одной скважины 84. Они представлены чередованием льда, прослоев суглинка 3-15 мм и песка 2-10 мм с общей льдистостью 65-75%.

Первый слоистый вид пластовых залежей льда вскрыт в скважинах 62, 76, 81 и 83. Ледогрунт тут представлен чередованием льда прозрачного и матового с примесями песка 5-8% и прослоями песка, местами косослоистого, толщиной от 2-15 мм до 2-10 см. Слои ледогрунта слагают от 30% до 80% залежи льда. Остальная часть пластовых залежей льда сложена льдом прозрачным и матовым, местами без примесей, с прослоями песка толщиной от 2-8 мм, реже до 15-30 мм (рис. 20).

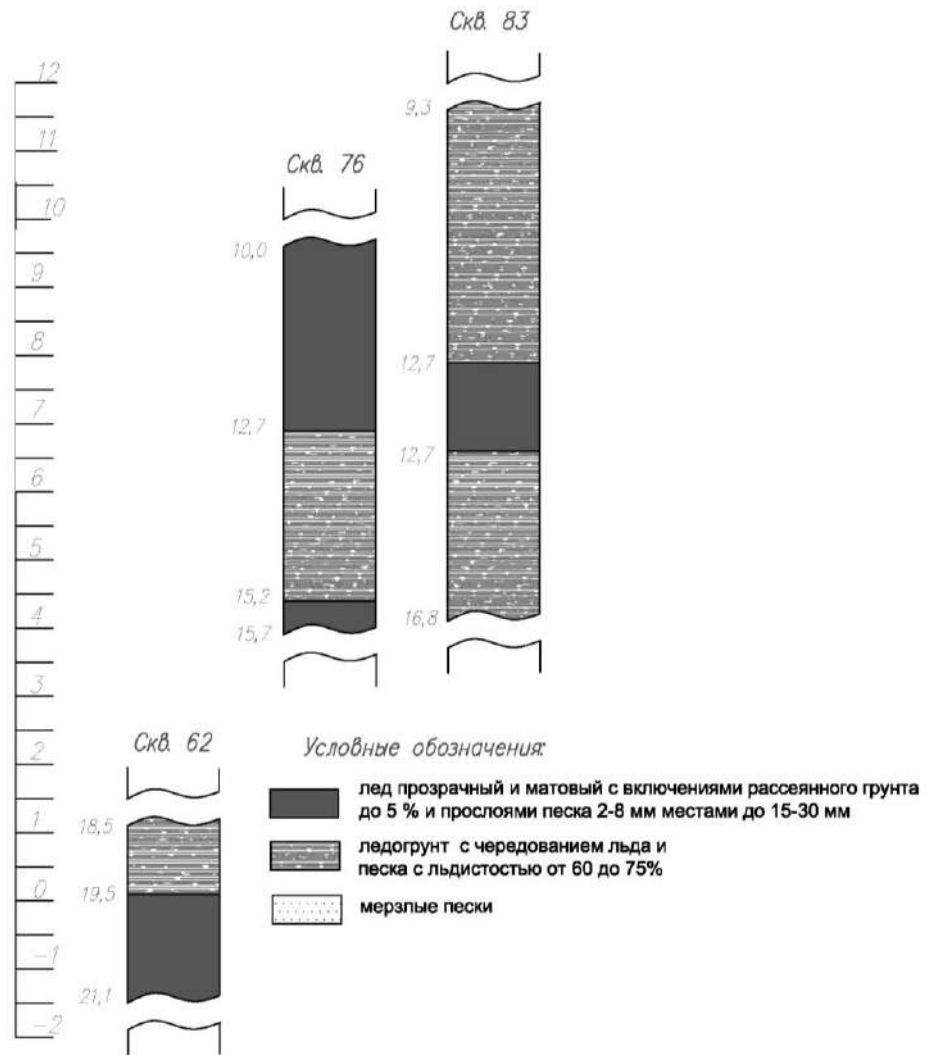


Рис. 20. Строение пластовых залежей льда, вскрытых в пределах площадки строительства подземных резервуаров Север

По результатам анализа геологического строения площадки Север установлена еще одна особенность пластовых льдов. В отложениях, вскрытых восемью скважинами, они залегают в несколько «этажей» и разделены между собой мощными песчаными слоями казанцевской свиты от 2-3 м до 7-8 м и более. Так, в скважине 63 в песчаных отложениях мощностью 19,4 м вскрыто два слоя льда толщиной 0,7 и 2,4 м соответственно (рис. 21). Пластовый лед тут представлен прозрачным и матовым льдом с прослоями песка 5-15 мм. Аналогичные слои льда встречены в песчаных отложениях скважин 65, 67, 68, 72, 75, их мощность изменяется от 0,4-0,5 до 0,9-1,35 м. В скважине 74 первый слой льда вскрыт в супесчаных отложениях на глубине 11,9-13,5 м, второй - в средней части песчаного слоя на глубине 20,7-21,3 м. Лед тут преимущественно матовый с прослоями песка 5-15 мм и содержанием рассеянного песка 5-8%. Местами можно встретить большее количество прослоев льда, как, например, в песчаном слое скважины 82. В его средней части вскрыты три слоя льда мощностью 0,9, 0,6 и 0,5 м, представленные преимущественно прозрачным и

матовым льдом с включением незначительного количества рассеянного песка 5-7 % и местами с прослоями торфа. Наличие нескольких слоев льда на различных глубинах в мощных песчаных отложениях лишней раз подчеркивает сложность и многообразие строения многолетнемерзлых грунтов территории Харасавэйского месторождения (рис. 21).

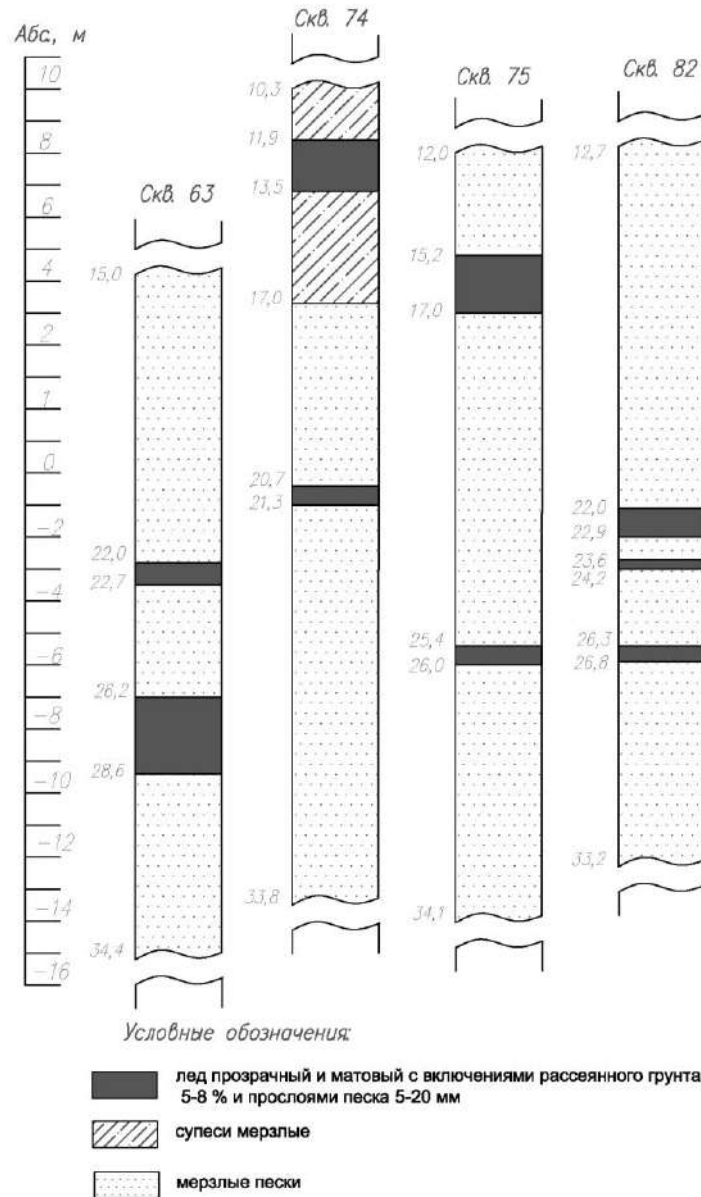


Рис. 21. Строение пластовых залежей льда, вскрытых в пределах площадки строительства подземных резервуаров Север

Химический состав пластовых льдов рассматриваемой территории имеет некоторые различия. Ниже приведены его вариации по данным разных исследователей.

Химический анализ пластовых льдов, вскрытых в отложениях второй морской террасы на пляже пос. Харасавэй в ходе экспедиции Игаркинской мерзлотной станции показывает, что во льдах преобладающим катионом является натрий, по аниону льды могут

быть отнесены к гидрокарбонатному, сульфатному или хлоридному классам. Соотношение анионов изменчиво. Льды с максимальным количеством гидрокарбонатов имеют кислую реакцию, хлоридов и сульфатов – нейтральную. В целом химический состав указывает на хлоридно-натриевый тип засоления. Льды преимущественно ультрапресные и пресные, реже встречаются слабосоленые. Минерализация пластовых льдов изменяется от 40 до 700 мг/л. Засоленность вмещающих лед отложений изменяется с глубиной, при приближении к залежи льда она резко падает [44].

Химический анализ льдов в обнажении у поселка Харасавэй, проведенный А.Н. Хименковым, показывает, что их общая минерализация колеблется от 44 до 838 мг/л. Текстурирующие льды в линзе глин увеличивают свою засоленность с глубиной от 217 мг/л в 3 м от кровли глин до 838 мг/л в 12 м от нее. Состав солей тут преимущественно хлоридно-натриевый. Минерализация ледогрунтов изменяется от 274-294 мг/л у слоев с минеральными примесями и до 48 мг/л у слоев чистого льда. Среди анионов преимущественно преобладает хлор-ион, среди катионов – натрий-ион. Пластовые монолитные льды имеют минерализацию от 70 до 140 мг/л. В целом по химическому составу пластовые и текстурирующие льды характеризуются преобладанием $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ и Cl^- [44].

По данным химического анализа пластовых льдов, приводимого М.А. Великоцким и Ю.В. Мудровым, минерализация пластовых льдов варьирует от 73 до 213 мг/л. Причем отмечено изменение распределения солей во льдах разных типов. Так, в молочно-белом льду максимальное количество солей встречено в середине пласта, а в прозрачном – в его верхней и нижней частях [13] (табл. 24).

Таблица 24. Химический состав пластовых льдов в обнажениях Харасавэйского месторождения [13]

Часть слоя льда	Сухой остаток, мг/л	Na_2SO_4	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	NaCl
Молочно-белый лед				
Верх	113	26,7	7	30
Середина	143	19	7	35
Подшва	97	40	9	20
Чистый лед				
Верх	160	22	2,7	16
Середина	92	26	8,29	31
Подшва	113	32	13,7	26

По результатам химического анализа подземных льдов III-I морских террас близ мыса Харасавэй, выполненного В.В. Орлянским по профилю абразионного уступа побережья протяженностью 80 км, выявлен гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридно-натриевый состав. Содержание сухого остатка здесь колеблется от 10 до 80 мг/л (табл.25) [44, 67].

Таблица. 25. Химический состав подземных инъекционных льдов III-I морских террас в районе мыса Харасавэй [44, 67]

Тип воды	pH	Единицы	Состав и содержание ионов во льду							Сухой остаток, мг/л
			НСО ₃ ⁻	Сl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
Гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-кальциевый	6,5	мг/л	18,3	9,58	6,99	5,64	1,66	2,0	-	44
		мг-экв	0,3	0,27	0,15	0,24	0,02	0,1	-	
		% · экв	41,67	37,5	20,83	66,67	5,56	27,77	-	
Сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатно-натриево-кальциевый	6,5	мг/л	12,2	6,38	9,05	3,4	0,66	1,6	0,24	24
		мг-экв	0,2	0,18	0,19	0,15	0,02	0,08	0,02	
		% · экв	30,09	31,58	33,33	55,55	7,41	29,63	7,41	
Сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-кальциевый	6,4	мг/л	15,3	5,32	14,81	4,01	5,64	1,2	0,49	81
		мг-экв	0,25	0,15	0,3	0,17	0,14	0,06	0,04	
		% · экв	35,71	21,43	42,86	41,46	34,14	14,64	9,76	
Гидрокарбонатно-кальциево-натриевый	7,3	мг/л	9,2	1,06	0,82	1,04	0,33	2,4	0,12	13
		мг-экв	0,15	0,03	0,01	0,05	0,01	0,12	0,01	
		% · экв	78,95	15,79	5,26	26,32	5,26	63,16	5,26	
Гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-кальциевый	7,1	мг/л	9,2	3,72	3,70	2,67	0,66	2,4	1,2	21
		мг-экв	0,15	0,1	0,08	0,12	0,01	0,12	0,10	
		% · экв	45,45	30,30	24,25	34,29	2,86	34,29	28,56	
Гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый	6,6	мг/л	6,0	2,66	1,65	2,23	0,5	0,8	0,24	12
		мг-экв	0,1	0,07	0,03	0,1	0,01	0,04	0,02	
		% · экв	50,0	35,0	15,0	58,82	5,88	23,53	11,77	
Хлоридно-гидрокарбонатно-натриевый	6,7	мг/л	1,5	3,19	1,23	1,78	0,66	0,6	0,12	10
		мг-экв	0,05	0,09	0,02	0,08	0,01	0,03	0,01	
		% · экв	31,25	56,25	12,5	61,54	7,69	23,08	7,69	

Химический анализ пластовых льдов у поселка Харасавэй, приводимый Г.И. Дубиковым, указывает на их преимущественно ультрапресный состав. Общая минерализация залежей льда варьирует от 10 до 90 мг/л (табл. 26).

Таблица 26. Химический состав пластовых льдов у поселка Харасавэй [35]

Место отбора	Формула Курлова
I терраса р. Харасавэй	
Пластовый лед II типа (глубина 5 м)	$M_{0,09} \frac{Cl76SO_4 14HCO_3 10}{(Na + K)81Mg19}$
Пластовая залежь, лед III типа	$M_{0,03} \frac{Cl86HCO_3 10SO_4}{(Na + K)89Mg9Ca2}$
лед II типа	$M_{0,01} \frac{Cl73HCO_3 16SO_4 11}{(Na + K)79Mg18Ca 3}$
лед III типа	$M_{0,02} \frac{Cl84HCO_3 12SO_4 4}{(Na + K)59Mg25Ca 16}$
лед I типа	$M_{0,06} \frac{Cl84HCO_3 16}{(Na + K)69Mg31}$

В целом химический состав пластовых льдов Харасавэйского месторождения показывает, что льды относятся преимущественно к ультрапресным с минерализацией в среднем от 10 до 100 мг/л. Реже можно встретить слабосоленые льды с минерализацией 400-700 мг/л.

Генезис пластовых льдов уже на протяжении многих десятилетий является спорным вопросом. Первая группа ученых выступает за ледниковое происхождение льда, вторая – за преимущественно внутригрунтовое образование. Ниже приведены некоторые признаки внутригрунтового происхождения пластовых льдов, полученные на базе множественных исследований таких ученых как: Ю.Б. Бадю, В.В. Баулин, Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, М.А. Велицкоцкий и Ю.В. Мудрый, Г.И. Дубиков, А.Н. Хименков и др. Во-первых, отмечено сочетание в грунтовых толщах подземных льдов с высокоминерализованными водами-криопэгами, имеющими хлоридно-натриевый состав. Во-вторых, встречены недеформированные повторно-жильные льды в отложениях, формирование которых шло синхронно с отложениями третьей и второй морских террас. Образование повторно-жильных льдов невозможно в условиях покровного обледенения поверхности, к тому же их неизменная конфигурация говорит об отсутствии надвигания ледника на эту территорию. В-третьих, пластовые льды обнаружены в отложениях плейстоценового и голоценового возрастов. Отсутствие ледникового оледенения в течение голоцена и схожесть морфологии первой террасы со второй и третьей террасами является еще одним основанием для внутригрунтового происхождения пластовых льдов [44]. В целом в многолетнемерзлых грунтах встречаются пластовые льды различного генезиса от погребенных ледниковых, наледных льдов озер и рек и др. до внутригрунтовых миграционных и инъекционных и др.

Резюмируя проведенный анализ пластовых залежей льда территории Харасавэйского месторождения, можно выделить основные особенности их состава, строения и залегания.

1. Химический состав пластовых льдов указывает преимущественно на хлоридно-натриевый тип засоления. Минерализация льдов изменяется от 10 до 200 мг/л, реже более. Чаще пластовые льды являются ультрапресными, меньше пресными и слабосолеными.

2. Строение пластовых залежей льда очень сложное. Тут встречаются как пластовые льды, на всю мощность сложенные чистым льдом с малым количеством грунтовых примесей или ледогрунтом, так и слоистые залежи с чередованием льда, ледогрунта и мерзлого грунта. Лед залежей от темного, мутного до молочно-белого и прозрачного, зачастую с незначительной примесью рассеянного грунта, тонкими прослоями пылеватого песка 1-15 мм, реже 2-6 см и воздушными пузырьками различной формы. Ледогрунты представлены чередованием прозрачного и мутного льда преимущественно с пылеватым

песком толщиной от первых сантиметров до 5-20 см. В качестве минеральных примесей и прослоев во льдах ограниченно встречаются суглинки и торф. Местами во льдах отмечаются следы течения.

3. Пластовые залежи льда имеют различное залегание – от субгоризонтальных слоев, согласных слоистости мерзлых грунтов до линз с крутопадающими крыльями, приуроченных к куполовидным поднятием подошвы перекрывающих глинистых отложений. Местами льды залегают над кровлей толщи песчаных отложений, местами встречаются в ее средней и нижней частях. Мощность залежей льда изменяется от 0,5 м до 9 м и более. В среднем она составляет 1-3 м. В песчаных отложениях могут залежать несколько слоев пластовых льдов, расположенных на разных глубинах.

В многолетнемерзлых грунтах с поверхности и до исследуемой глубины (70 м) встречаются надмерзлотные воды сезонноталого слоя, несквозные и реже сквозные талики, а ниже по разрезу – высокоминерализованные межмерзлотные воды.

Надмерзлотные воды сезонноталого слоя имеют повсеместное распространение на всех геоморфологических уровнях. Они залегают на глубине 0,2-1,4 м от дневной поверхности, их мощность не превышает, как правило, 0,1-0,2 м. Основной источник питания надмерзлотных вод – летние атмосферные осадки, а также иммобилизованная при вытаивании подземных льдов влага. При зимнем промерзании вод они приобретают напор. Воды сезонноталого слоя слабоминерализованы, величина сухого остатка колеблется в пределах 0,02-0,3 г/л. По составу воды в основном гидрокарбонатно-кальциевые и гидрокарбонатно-натриево-кальциевые [86].

Сквозные талики на территории месторождения встречаются в низовьях крупных рек (например, р. Харасавэй, р. Сядорьяха и др.) и под акваторией Карского моря. *Несквозные талики* развиты шире и представлены радиационно-тепловыми и гидрогенными таликами. Первые из них встречаются реже и приурочены к локальным участкам речных пойм, днищам логов и ложбин стока, их мощность не превышает нескольких метров; воды безнапорные, как правило, пресные [86].

Гидрогенные талики формируются под озерами и под руслами рек с постоянным стоком. Несквозные талики под руслами рек зачастую имеют ярусное строение, глубина их изменяется от 10 м до 30 м. Верхний ярус имеет положительную температуру и содержит пресную и солоноватую воду с минерализацией 0,3-5 г/л, нижний – насыщен солеными водами с минерализацией 3-10 г/л и температурой ниже 0 °С. Водовмещающими грунтами вод подрусовых таликов являются голоценовые, реже верхнеплейстоцен-голоценовые аллювиальные и аллювиально-морские отложения. Мощность водоносного горизонта определяется размерами таликов, глубина которых

колеблется от 2-3 м (в верховьях рек) до 10-30 м (в приустьевых частях). Воды обладают слабым, но постоянным гидродинамическим напором. Химический состав воды подрусловых таликов преимущественно гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый с разнообразной концентрацией ионов кальция и магния [86].

Подозерные несквозные талики могут иметь аналогичное ярусное строение и встречаются под водоемами глубиной в среднем более 2 м. Их граница совпадает с береговой линией озер в плане, мощность при этом варьирует от 2 м до десятков метров. Водовмещающими грунтами являются верхнеплейстоценовые и голоценовые морские, аллювиально-морские, аллювиальные и озерные отложения. Состав вод гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый, степень минерализации вод подозерных таликов на морских и аллювиальных террасах колеблется от 0,03 до 0,4 г/л; воды подозерных таликов на лайде и пойме характеризуются более высокой минерализацией [86].

Особое внимание следует уделить встреченным в мерзлых толщах линзам высокоминерализованных межмерзлотных вод – криопэгам. Их наличие является серьезным препятствием для сооружения подземных резервуаров. Прорыв рассолов вод в формирующуюся емкость при ее сооружении, а также в процессе эксплуатации, может привести к аварийной ситуации.

Наиболее часто *криопэги* встречаются в пределах молодых элементов рельефа прибрежной и береговой частях Харасавэйского месторождения, таких как лайда, острова, пляжи и дельты рек [44]. Эти же территории месторождения характеризуются наличием в разрезе сильнозасоленных грунтов, зачастую охлажденных. Так, близ мыса Бурунного в разрезе вскрыты водонасыщенные слои сильнозасоленного грунта при низких отрицательных температурах до $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толща пляжного яруса мощностью 20-25 м с четырьмя насыщенными высокоминерализованными водами песчаными линзами 0,5-1,5 м [26]. По побережью Западного Ямала в голоценовых отложениях и на островах вскрыто множество криопэгов под 1,5-2,5 м слоем мерзлых грунтов с минерализацией до 111,8 г/л и температурой до $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, химический состав которых был определен как хлоридно-натриево-магниевый [44, 67].

Высокоминерализованные межмерзлотные воды также были вскрыты при бурении двух параметрических скважин в пределах современной морской лайды северо-западной части Харасавэйского месторождения (рис. 22). Скважиной № 1 в интервале глубин 5,0-7,7 м вскрыты водонасыщенные пылеватые пески с температурой от -3 до $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При бурении скважины № 16 вскрыто два яруса охлажденных грунтов: в интервале 3,3-7,5 м встречены пылеватые пески от маловлажных до водонасыщенных с температурой $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$; в интервале 41,1-45,8 м талая супесь с температурой $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [89, 104].

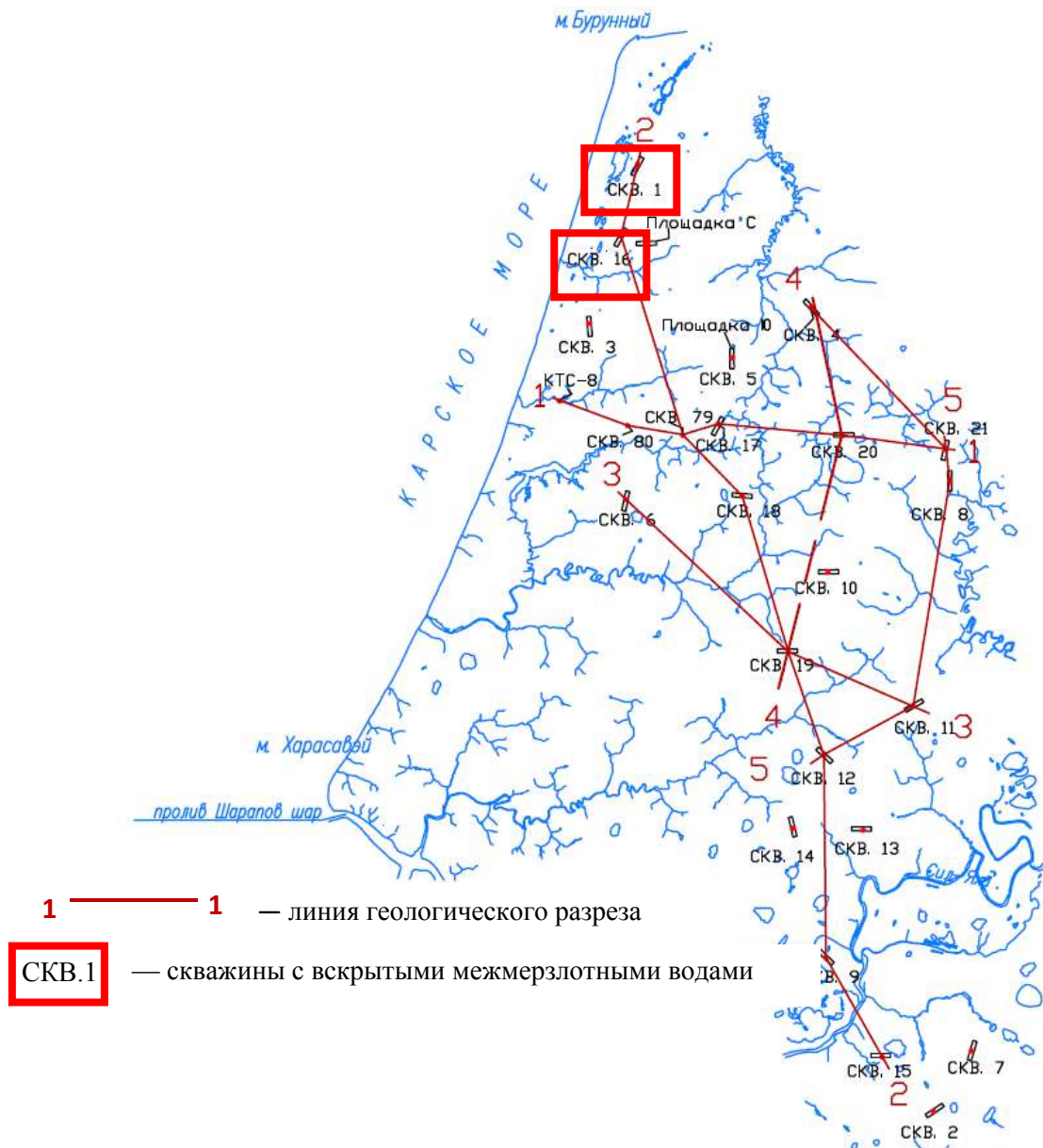


Рис. 22. Схема Харасавэйского месторождения с местами расположения вскрытых межмерзлотных вод [87]

В целом глубина залегания высокоминерализованных вод в пределах современных форм рельефа колеблется от 1,8 до 6,0 м, водовмещающими грунтами при этом являются пылеватые и мелкие пески. Воды солоноватые, характеризуются хлоридным, натриевым составом, высокой (до 55 г/дм^3) минерализацией и зачастую обладают напором (от 1 до 3 м) [83].

Формирование криопэггов происходило под влиянием моря и геокриологических процессов. Водонасыщенные морские песчано-глинистые отложения промерзали с отжатием солей в подстилающие водонасыщенные горизонты. Повышенная концентрация легкорастворимых солей в оставшихся слоях позволяет им находиться в талом состоянии даже при температуре ниже $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ [44]. Необходимо отметить, что иногда водонасыщенные

пески подстилают толщи пластового льда. Такой разрез встречен на III морской террасе правобережья реки Надуйяхи и др. территориях Ямала. Это объясняется вышеописанным процессом отжатия солей, за счет которого формируется пресный и ультрапресный лед, а также процессом опреснения подземного льда в результате изменения температурного режима мерзлых грунтов, например, под влиянием вод русловых таликов [5].

По данным исследований ПНИИИСа, криопэги в долинах рек встречаются в засоленных грунтах, залегающих под толщей аллювия. Их генезис может быть связан с голоценовой ингрессией и трансгрессией моря по долинам рек и дальнейшим концентрированием солей при промерзании грунтов [10].

Высокоминерализованные воды также распространены в пределах пойм рек и хасыреев. Они залегают в пределах абсолютных отметок от плюс 20 м до минус 15 м в разрезах III-I морских террас, при этом их минерализация обычно не превосходит 60 г/л, а температура составляет ниже -5 °С, -6 °С.

В целом в разрезах морских террас Харасавэйского месторождения (III-I) криопэги встречаются реже, чем в более молодых голоценовых отложениях (табл. 27). Это, вероятно, связано с более низкой соленостью морской воды в позднем плейстоцене, что сказалось на общей засоленности отложений. Также, возможно, это объясняется более суровыми мерзлотными условиями, в результате которых немерзлыми остались значительно меньшее количество линз [44]. Их химический состав преимущественно хлоридно-натриевый, реже встречается хлоридно-сульфатный и сульфатный.

Таблица 27. Обобщенные параметры криопэгов в пределах Харасавэйского и Бованенковского месторождений (44 точки опробования) [38]

Геоморфологический уровень	Глубина залегания, м	Величина напора, м	Температура, °С	Минерализация, г/л
Лайда	1-15	0-10	-4÷ -8	70-150
Пойма низовий рек	5-50	0-30	-3÷ -6	40-110
I-III морские террасы	3-15	0-4	-1÷ -3,5	20-70
На всех уровнях	130-300	130-230	-0,2÷ -2	5-35

На территории Харасавэйского месторождения повсеместно развито *сезонное протаивание* многолетнемерзлых грунтов. Оно начинается в конце мая – начале июня и заканчивается в сентябре – октябре. Максимальная глубина протаивания формируется к началу сентября. При оттаивании глинистые отложения приобретают мягкопластичную и текучую консистенцию, пески – водонасыщенное или влажное состояние. В целом глубина сезонного протаивания изменяется от 0,3 до 1,5 м. Суглинистые разности оттаивают в зависимости от мощности торфянистого слоя и влажности в среднем на глубину 0,3-0,8 м,

песчаные на 0,4-1,0 м, торфяные на 0,3-0,5 м. При отсутствии растительного покрова и торфянистого слоя глубина протаивания песков может составлять от 0,5 до 1,2 м. Высокодисперсные грунты сезонноталого слоя промерзают сверху и со стороны многолетнемерзлых грунтов, в связи с чем зачастую имеют ярусное строение. В верхней и нижней частях формируются горизонты высокой льдистости со слоистой и сетчатой криотекстурами. Толщина шлиров льда тут варьирует от долей миллиметров до 0,5 см, расстояние между ними составляет от 0,1-0,5 см. Средняя часть имеет низкую льдистость, для нее характерна массивная криотекстура, реже слоистая со шлирами льда до 0,2 см и расстоянием между ними 3,0-15,0 см. При малой мощности сезонноталого слоя средняя низкольдистая часть может отсутствовать. Для песков сезонноталого слоя характерна массивная криогенная текстура. Оторфованным пескам сезонноталого слоя присуща слоистая криогенная текстура с толщиной шлиров льда до 0,1 см. Торф сезонноталого слоя характеризуется очень высокой льдонасыщенностью с гнездами и корками льда. Включения льда в нем представлены разно ориентированными шлирами с нечеткими границами, толщина шлиров 0,05-0,1 см, интервал между ними 0,1- 0,6 см. В нижней части торфа сезонноталого слоя, на контакте с многолетнемерзлыми грунтами, зачастую отмечаются линзы льда толщиной до 5-10 см [83].

Сезонномерзлый слой имеет на территории локальное распространение на участках таликов. Он сложен преимущественно песками и супесями. Глубина сезонного промерзания составляет 0,8-1,3 м. Наиболее характерная криогенная текстура сезоннопромерзающих песков и супесей – массивная с единичными по-разному ориентированными шлирами и гнездами льда, приуроченными к прослоям супесей и оторфованных песков. Наиболее льдонасыщенными являются, как правило, верхние горизонты слоя сезонного промерзания (до глубины 0,1-0,3 м). Полное протаивание сезонномерзлого слоя завершается в конце июля – начале августа [86].

1.5. Современные экзогенные геологические процессы и явления на территории Харасавэйского месторождения

Экзогенные процессы и явления играют одну из главных ролей в преобразовании рельефа Харасавэйского месторождения. В связи с повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов на территории месторождения и суровыми климатическими условиями наиболее широко распространены криогенные процессы. Их можно подразделить два типа – криогенные и посткриогенные. Криогенные процессы развиваются в верхних частях земной коры и на поверхности Земли в результате понижения температуры ниже 0°C при промерзании немерзлых и сезонноталых грунтов. На

территории Харасавэйского месторождения они в основном представлены морозобойным растрескиванием и пучением грунтов. Посткриогенные процессы развиваются в верхних частях земной коры и на поверхности Земли в результате повышения температуры выше 0 °С при протаивании мерзлых грунтов. На рассматриваемой территории они в основном представлены: солифлюкцией, термокарстом, термоэрозией, термоабразией.

Морозобойное растрескивание грунтов происходит в результате суточных и годовых колебаний температуры, которые вызывают на поверхности объемно-градиентные напряжения и приводят к образованию систем трещин с поперечником грунтовых полигонов от 0,5 до 50 м, при этом ширина трещин варьирует от 0,5 до 2–5 м (реже 10 м) [63]. Оно приводит к значительным изменениям микрорельефа территории, а также значительно повышает льдистость отложений. Проявление морозобойного растрескивания наблюдается практически на всех геоморфологических поверхностях месторождения. Исключение составляют лишь крутые и средней крутизны склоны. На поверхности морских террас, где активно протекают процессы морозобойного растрескивания грунтов, происходит формирование эпикриогенных повторно-жильных льдов. Они нередко развиваются в верхней части тела древних синкриогенных жил, вследствие чего ледяная жила приобретает воронкообразную форму [88]. Морозобойное растрескивание формирует характерный полигональный рельеф территории (рис. 23).



Рис. 23. Морозобойное растрескивание грунтов территории Харасавэйского месторождения (фото автора)

Морозное пучение грунтов – это результат объемного расширения воды (примерно на 9%), находящейся в них до промерзания и дополнительно мигрирующей к границе раздела фаз. Оно широко распространено на территории Харасавэйского месторождения и делится на сезонное и многолетнее. Проявлению сезонного пучения способствует близкое залегание кровли многолетнемерзлых грунтов и высокая предзимняя влажность грунтов слоя сезонного оттаивания, которая часто достигает полной влагоемкости. Процесс пучения начинается уже при промерзании самых верхних (3-5 см) горизонтов и продолжается в течение всего периода промерзания. Чаще всего оно характеризуется образованием площадей пучения высотой 10-30 см (в зависимости от мощности слоя сезонного оттаивания). Реже, при неравномерном промерзании или промерзании замкнутых структур, образуются сезонные бугры пучения высотой до 0,5-1,0 м. Многолетние бугры пучения сложены сильнольдистыми грунтами с прослоями чистого льда и обычно имеют высоту 2-3 м, в основании от 3-5 м до нескольких десятков и даже сотен метров. Образование таких бугров пучения приурочено, в основном, к промерзающим или промерзшим днищам спущенных или заросших озер. Изредка невысокие бугры пучения (3-4 м) встречаются в днищах котловин мигрирующих озер [86].

Солифлюкция – медленное передвижение протаивающих переувлажненных грунтов на пологих склонах рельефа, возникающее под влиянием попеременного промерзания и протаивания грунтов, действия силы тяжести, криогенных процессов (миграция влаги, смена фаз воды, пучение при промерзании и избыточное увлажнение при протаивании) и др. [41, 63]. Наиболее часто оно развивается в слое сезонноталых грунтов. Основными факторами, определяющими развитие процесса солифлюкции, являются: 1) широкое распространение супесчано-суглинистых пылеватых отложений; 2) высокая влажность отложений, приближающаяся к пределу текучести или превышающая его; 3) наличие сильнольдистых отложений непосредственно под слоем сезонного оттаивания; 4) наличие уклонов, обеспечивающих течение увлажненных грунтов. На участках с отложениями супесчано-суглинистого состава плоских морских террас и равнин, имеющих слабые уклоны поверхности (2-3°), наблюдается медленное течение грунта. Зачастую оно отражается в рельефе в виде натечных форм, складок грунтов, расположенных параллельно подножью склона.

Более интенсивное развитие процесса солифлюкции наблюдается локально на участках крутых склонов (не менее 15-20°), сложенных пылеватыми супесями и суглинками. Быстрые солифлюкционные сплывы обычно носят катастрофический характер, а скорость движения грунтов по склону может достигать нескольких десятков метров в сутки. Действие этого процесса наблюдается на крутых берегах крупных рек и

озерных котловин. Эти участки зачастую характеризуются близким залеганием к поверхности залежей подземного льда или развитием в верхних горизонтах сильнольдистых дисперсных грунтов. Тут часто образуются термоденудационные цирки или уступы [83].

Термокарст – процесс вытаявания подземных льдов или оттаивания мерзлого грунта и образования отрицательных форм рельефа за счет их уплотнения под действием давления оттаявшего слоя, когда внутригрунтовая влага отжимается на поверхность или дренируется водоносным горизонтом [63]. Термокарст начинается с изменения температурного режима многолетнемерзлых грунтов и увеличения глубины сезонноталого слоя, что в дальнейшем приводит к оседанию поверхности. Одной из причин современной активизации термокарста считается техногенное воздействие на многолетнемерзлые грунты, проявляющееся в разрушении почвенно-растительного покрова (рис. 24).



Рис. 24. Развитие процесса термокарста в результате техногенного нарушения почвенно-растительного покрова на территории Харасавэйского месторождения (фото автора)

Наиболее характерными формами проявления процесса термокарста в рельефе являются: озера, хасыреи, плоскозападинные и провально-котловинные формы (рис. 25). Их многообразие обеспечивается в основном различной морфологией и генезисом льда [83].



Рис. 25. Проявление процесса термокарста на территории Харасавэйского месторождения и близ него (фото автора)

Таяние полигонально-жильных льдов приводит к активизации овражной эрозии на поверхностях морских террас. Особо интенсивно протекает термокарст по сингенетическому повторно-жильному льду, обнажающемуся над руслом рек в эродируемых голоценовых и верхнеплейстоценовых сильнольдистых отложениях. Тут

быстрая овражная эрозия способствует обвалу крупных блоков толщиной 3-5 м в местах подмыва рекой отложений террас. Оттаивание жильных льдов в торфяниках приводит к формированию плоскобугристой поверхности с глубокими канавами на месте бывших жил шириной до 2 м. Развитие процесса термокарста в толщах с пластовыми льдами влечет за собой образование в рельефе крупных котловин, цирков и воронок. На территории Харасавэйского месторождения почти повсеместно развит термокарст по сегрегационному льду [67, 86].

Термоэрозия – процесс разрушения мерзлых грунтов при тепловом и механическом размывающем воздействии постоянных и временных водотоков. Необходимой составляющей термоэрозии является сезонное протаивание льдистых грунтов, приводящее к их разупрочнению, что способствует повышению интенсивности их разрушения текучей водой [63]. Термоэрозия оказывает большое влияние на преобразование рельефа Харасавэйского месторождения. Большая часть рек территории имеет широкие речные долины, в пределах которых активно протекает боковая эрозия. Она увеличивается в летний и осенний периоды паводков, когда резко возрастает скорость потока. В целом интенсивность данного процесса во многом зависит от литологического состава грунтов, от их льдистости и в меньшей степени от температуры. Эрозия наиболее активно протекает в песчаных разностях береговых склонов южной экспозиции. Повышение уровня воды в реках за счет их подпора и затруднения стока нагонными и приливными течениями также увеличивают боковую эрозию [67]. На подмываемых участках берега постоянно существуют условия для зарождения и активного развития оврагов. За счет подмыва берега и смещения базиса эрозии в сторону водораздела происходит постоянный рост оврага в глубину и в длину. На таких участках наблюдаются висячие устья оврагов (рис. 26) [86].

Очень часто овражная сеть формируется по берегам рек и озер по полигонально-жильным льдам, при концентрации поверхностного стока по морозобойным трещинам. Вытаивание жильных льдов, ориентированных параллельно береговой линии, в верховьях растущих оврагов приводит к образованию специфической формы рельефа – байджерахам. Подобные формы рельефа наблюдаются на подмываемых участках правого берега р. Сеяха. Короткие эрозионные промоины и небольшие овраги наблюдаются в местах прорыва вод из так называемых «висячих» озер. Такие озера существуют на рассматриваемой территории в пределах плоских водораздельных поверхностей вблизи верхней бровки склона. Реже они встречаются на склонах долин ручьев и малых рек. Эрозионные процессы также протекают в результате деятельности временных водотоков. Многолетнемерзлые грунты сдерживают фильтрацию атмосферных осадков, в результате чего водотоки

расчленяют рельеф, формируют балки, овраги и промоины. Особо активно этот процесс протекает по берегам рек, озер и на прибрежных участках Карского моря [67, 83, 86].



Рис. 26. Развитие овражной эрозии на береговом склоне одной из рек близ Харасавэйского месторождения (фото автора)

Термоабразия – процесс разрушения берегов морей, озер или водохранилищ, сложенных многолетнемерзлыми грунтами или льдом, в результате совместного воздействия механической энергии волн, тепла воды и воздуха [63]. На территории Харасавэйского месторождения термоабразия активно развивается в прибрежной части Карского моря и по берегам достаточно больших озер. Интенсификация данного процесса наблюдается в период сильных штормов – увеличение энергии волновой деятельности, а также поднятие со дна гравелистого и песчаного материала способствуют быстрому разрушению береговой зоны моря [83, 86].

Процесс абразии протекает особо быстро на берегах с повторно-жильными или пластовыми льдами. В основании берегов обычно образуется волноприбойная ниша с нависающими над ней блоками мерзлых грунтов. Последние отрываются от коренного берега главным образом по ледяным жилам и морозобойным трещинам. Обрушившиеся блоки размываются волнами. В результате сохраняется большая крутизна береговых уступов, что способствует их быстрому разрушению. Со временем продукты разрушения коренных берегов накапливаются вдоль береговой линии, образуя отмель [83, 86].

Абразия способствует перемещению (миграции) озер по поверхности водораздела или речной поймы. В большей степени это характерно для сточных озер, где существует хоть и слабое, но постоянное течение. В этом случае миграционное движение озер направлено в противоположную от стока сторону. Продукты разрушения берегов

подхватываются течением и переносятся в сторону истока ручья, где часть из них откладывается вдоль берега озера. Со временем образуется отмель, которая еще больше препятствует выносу разрушенных грунтов за пределы озерной котловины. Таким образом происходит медленное движение озера по поверхности водораздела или поймы [86].

Процессы абразии и эрозии многолетнемерзлых грунтов территории Харасавэйского месторождения имеют следующие особенности. С одной стороны, сцементированные льдом грунты имеют высокую водопрочность, и требуется значительное количество энергии для их оттаивания. С другой стороны, мерзлые отложения способствуют концентрации вод на поверхности, кроме того, они зачастую являются засоленными, что увеличивает содержание незамерзшей воды и снижает их прочность.

Равнинный характер территории, низкая испаряемость при большом количестве осадков, широкое распространение супесчано-суглинистых грунтов и близкое залегание к поверхности многолетнемерзлых грунтов – все это делает *заболачивание* одним из активнейших процессов на рассматриваемой территории. Широкому распространению процесса заболачивания способствует также формирование отрицательных форм рельефа за счет действия процесса термокарста. Наиболее интенсивно заболачивание территории происходит в пределах широких пойм крупных рек, а также на слабовогнутых участках водораздельных пространств, имеющих слабый дренаж. Все болота в пределах рассматриваемой территории мелкие, что объясняется небольшой мощностью слоя сезонного оттаивания на заболоченных участках. Процесс торфонакопления на заболоченных участках протекает медленно, что объясняется суровостью климатических условий [86, 88]. Следует отметить, что развитие процесса заболачивания может начинаться в результате нарушения почвенно-растительного покрова территории и теплового воздействия на мерзлые грунты. Его провоцируют проход техники, строительные работы, сооружение производственных помещений и др. В связи с этим перед созданием подземных резервуаров для захоронения отходов бурения производят отсыпку строительных площадок 2-м слоем песка. Это позволяет снизить вероятность заболачивания территории.

Эоловая дефляция – процесс выдувания и развеивания ветром частиц грунта. Она наиболее масштабно развита на побережье Карского моря, сложенного песчаными грунтами (см. рис. 4). Также эоловая дефляция проявляется по направлению от побережья вглубь полуострова, где в верхней части разреза комплекса морских террас залегает пачка регрессивных песчаных отложений. Эти территории занимают до нескольких десятков, а в некоторых случаях, сотен квадратных метров. Помимо этого, эоловой дефляции подвержены участки поймы рек территории месторождения [67, 86].

Выветривание многолетнемерзлых грунтов территории месторождения происходит под воздействием суровых климатических условий – колебаний суточной температуры, низкой среднегодовой отрицательной температуры, смены положительной и отрицательной температуры и морозобойного растрескивания. Наиболее интенсивно идет процесс физического выветривания, под действием которого в сезонноталом слое повышается содержание пылеватых частиц. Это обстоятельство и высокая влажность сезонноталого слоя приводят к формированию солифлюкционных потоков и проявлению тиксотропных свойств грунтов. Химическое и биологическое выветривание развиты в меньшей степени [67].

Таким образом, по результатам проведенного анализа инженерно-геологических условий территории Харасавэйского месторождения можно сделать следующие основные **ВЫВОДЫ**.

1. В геоморфологическом отношении исследуемая территория характеризуется плоским рельефом из поверхностей нескольких морских террас с абсолютными отметками от 5 м до 35 м. Первое характерно для лайды, протягивающейся вдоль побережья Карского моря. В пределах морских террас перепад высот небольшой (около 5-10 м) и плавный. Террасированная поверхность месторождения местами прорезана речными долинами, оврагами и котловинами озер. В целом равнинный рельеф Харасавэйского месторождения способствует сооружению подземных резервуаров для захоронения отходов бурения на большей его части.

2. В пределах Харасавэйского месторождения развита мощная толща четвертичных отложений, в разрезе которой до исследуемой глубины 70 м выделено 9 геолого-генетических комплексов. Отложения по большей части представлены переслаиванием песчаных, суглинистых, глинистых и супесчаных грунтов с субгоризонтальным залеганием. Большую часть толщи слагают среднеплейстоценовые отложения салехардской свиты, верхнеплейстоценовые отложения казанцевской свиты, верхнеплейстоценовые отложения III-I морских террас. Показатели их состава, строения, свойств и состояния изменяются в широких пределах и имеют высокую зависимость от льдистости грунтов и степени их засоленности, а также криогенного строения. Ниже приведены некоторые из их особенностей. Так, отложения салехардской свиты чаще всего представлены суглинисто-глинистыми грунтами, суммарное содержание солей в них достаточно высоко и составляет в среднем более 0,9%, у них чаще всего встречается массивная криогенная текстура и суммарная льдистость, равная 25-29%. Отложения казанцевской свиты имеют более низкую дисперсность и чаще представлены песчаными

разностями со средней суммарной льдистостью около 40% и массивной криогенной текстурой. Суммарное содержание солей в них различно, однако среднее значение невелико – от 0,1 до 0,2%. Отложения казанцевской свиты зачастую содержат песчаные слои мощностью от 10 до 40 м, которые могут быть использованы для строительства подземных резервуаров. Отложения III-I морских террас схожи и представлены преимущественно суглинисто-глинистыми грунтами и достаточно высокой льдистостью. Суммарное содержание солей здесь составляет 0,5%. Криогенная текстура отложений морских террас чаще линзовидно-слоистая, слоистая, слоисто-сетчатая, атакситовая и шпировая и т.д.

3. Территория месторождения находится в пределах распространения многолетнемерзлых грунтов, мощность которых преимущественно составляет более 100 м и только в прибрежной части уменьшается до 50 м и ниже. Верхняя часть мерзлой толщи сложена сингенетическими отложениями, к которым относятся регрессивная пачка казанцевской свиты и грунты морских террас. Ниже залегают отложения эпигенетически промерзших грунтов, представленные нижней пачкой казанцевской свиты и отложениям салехардской свиты. В обоих типах грунтов встречаются залежи полигонально-жильного льда и пластового льда. Наличие последнего в грунтовых толщах территории является одной из важнейших особенностей их криогенного строения, которое может оказать значительное влияние на сооружение подземных резервуаров. Это особо актуально в связи с тем, что пластовые льды залегают на глубине строительства емкостей – в среднем 15-25 м.

Преимущественно пластовые льды встречаются на контакте отложений морских террас и казанцевской свиты, однако местами их можно обнаружить и глубже, в толще песчаных грунтов казанцевской свиты. Их мощность в среднем варьирует от 2 до 4 м, но иногда доходит до 5-9 м. По результатам анализа фактического материала обнаружено, что строение пластовых льдов достаточно сложное – тут встречаются чередования чистого льда, молочно-белого, с минеральными примесями, порослями песка и т.д. Среди всего многообразия выделено три варианта строения пластового льда. Первый – слоистый лед, представленный чередованиями ледогрунта, чистого льда, мерзлого песка в различных процентных соотношениях. По мощности слои песчаных разностей и ледогрунтов составляют до 40% всей пластовой залежи. Второй вид льда по большей части представлен ледогрунтом с чередованием прозрачного льда и льда с рассеянными примесями грунта и прослоями песка. Его льдистость варьирует от 60-90% и в среднем составляет около 75%. Третий вид льда – пластовый лед – преимущественно сложен чистым льдом (более 80% залежи) с малым количеством минеральных примесей, по большей части прозрачным, но

местами переходящим в мутный и молочно-белый. Залегание пластовых льдов различно – от субгоризонтальных, согласных вмещающим грунтам, до линз и куполов, нарушающих вышезалегающие отложения. По химическому составу льды преимущественно ультрапресные.

4. В пределах исследуемой толщи до глубины 70 м мощность многолетнемерзлых грунтов нарушается несквозными, сквозными таликами и межмерзлотными водами. Последние местами представлены высокоминерализованными водами – криопэгами. Их наличие является серьезным препятствием для сооружения подземных резервуаров. Чаще всего они встречаются в прибрежных частях и молодых элементах рельефа территории в песчаных отложениях до глубины 10 м, но иногда залегают и на глубинах 50 м и ниже. Их температура может достигать $-6 \div -8$ °С, а минерализация 150 г/л и выше. Воды характеризуются хлоридно-натриевым составом и зачастую обладают напором от 1 до 3 м.

5. На территории Харасавэйского месторождения широко развиты криогенные процессы, среди которых выделяются собственно криогенные и посткриогенные. Первые представлены морозобойным растрескиванием и пучением грунтов, последние – солифлюкцией, термокарстом, термоэрозией и термоабразией, заболачиванием. Кроме этого, наблюдаются процессы эоловой дефляции и выветривая грунтов.

Резюмируя вышеприведенные особенности, можно заключить, что инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения характеризуются высокой сложностью. Строительство подземных резервуаров для захоронения отходов бурения здесь возможно, однако выбор места их сооружения следует проводить путем предварительной систематизации грунтовых толщ месторождения и выделения среди них благоприятных. Таким образом, анализ инженерно-геологических условий позволяет сформулировать научное положение №1.

По результатам изысканий и опубликованным данным охарактеризованы инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения для целей строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения. Сложность инженерно-геологических условий территории обосновывается изменчивостью состава и строения вмещающих подземные резервуары грунтовых толщ, которая проявляется в различной льдистости и степени засоленности мерзлых грунтов, наличии высокоминерализованных вод и мощных пластовых льдов разного состава, а также необходимостью выбора строительных площадок с плоским рельефом без развития опасных геологических процессов.

Глава 2

Грунтовые толщи территории Харасавэйского месторождения

2.1. Границы многолетнемерзлой грунтовой толщи территории

Харасавэйского месторождения

Грунтовая толща – это толща горных пород и почв, слагающая верхнюю часть разреза разных геоморфологических элементов и находящаяся сейчас или в будущем в сфере влияния различных инженерных сооружений. Границы грунтовой толщи относительны, их устанавливают в зависимости от цели и признаков типизации. Они зависят от типа сооружения, его характеристик и методов его эксплуатации [65]. Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения необходима для оценки возможности сооружения подземных резервуаров для захоронения отходов бурения. В связи с этим для определения границ грунтовой толщи следует оценить влияние от строительства подземных резервуаров [48].

Строительство подземных резервуаров производят с поверхности, которую предварительно отсыпают мощным слоем песка (около 2 м, см. раздел 1.5). Соответственно, за верхнюю границу грунтовой толщи принята дневная поверхность литосферы. Латеральные границы грунтовой толщи в настоящей работе не определялись ввиду отсутствия необходимости их учета в дальнейшей типизации грунтовых толщ.

Чтобы определить нижнюю границу грунтовой толщи (мощность грунтовой толщи), необходимо было проанализировать влияние от строительства подземных резервуаров. Оно обусловлено: (а) изменением НДС толщи в результате формирования в ней незакрепленной выработки и (б) тепловым воздействием захораниваемых в подземный резервуар отходов бурения. Прогноз первого из них выполнен в программном комплексе Simulia Abaqus методом конечных элементов, второго – в программном комплексе Heat методом конечных разностей.

Исследование влияния строительства подземных резервуаров проводили в наихудших условиях с точки зрения его распространения вглубь массива от дна емкости. Во-первых, в качестве модельного был выбран подземный резервуар конусовидной формы с максимальным за все время строительства таких подземных резервуаров запроектированным объемом 5000 м^3 , что обеспечило бы внесение в массив мерзлых грунтов наибольшего количества тепла с отходами бурения. Во-вторых, подземный резервуар был размещен в массиве мерзлых грунтов таким образом, чтобы его дно находилось как можно глубже относительно земной поверхности. С этой целью была

выбрана скважина ю-2 (площадка подземных резервуаров Центр) с наибольшей глубиной залегания подошвы мощного песчаного пласта. Подземный резервуар был расположен в нижней части вскрытых в ней мерзлых песчаных грунтов с глубины 19 м до глубины 46 м. Максимальный радиус модельного подземного резервуара составил 11 м, высота 27 м. Подобное размещение емкости позволило оценить максимальное распространение воздействия вглубь массива мерзлых грунтов.

Расположение площадки Центр на территории Харасавэйского месторождения, в пределах которой находится скважина ю-2, представлено на рис. 27.

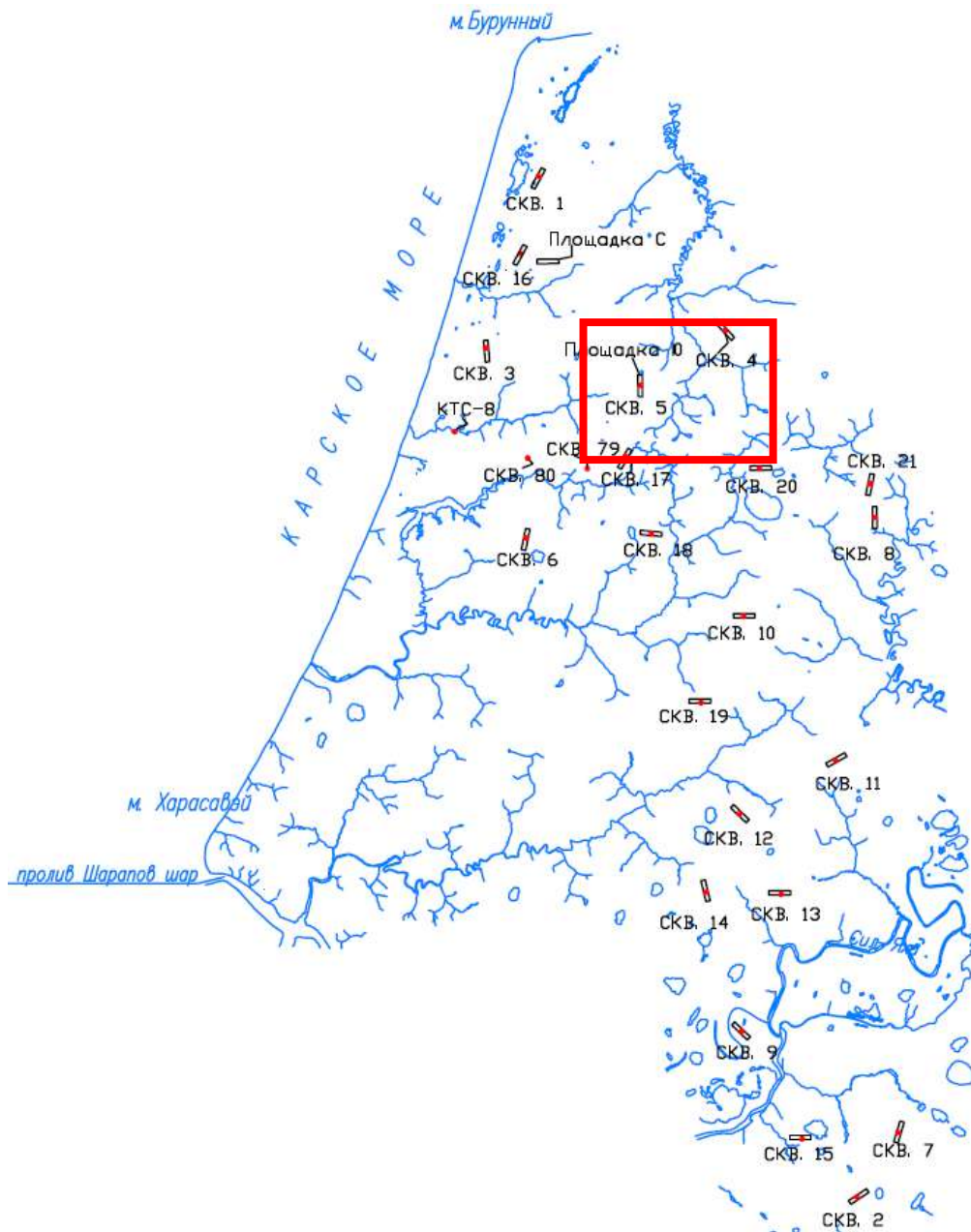


Рис. 27. Схема расположения площадки Центр на территории Харасавэйского месторождения [87]

Определение глубины активной зоны при строительстве подземного резервуара по изменению напряженно-деформированного состояния вмещающей грунтовой толщи

Исследование влияния строительства модельного подземного резервуара в результате изменения НДС вмещающей грунтовой толщи проведено численными методами в программном комплексе Simulia Abaqus/Standart. Для описания механического поведения грунтовых толщ использована упруго-вязкопластическая расширенная модель Друкера-Прагера. Модель включала следующие показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов: модуль общей деформации; коэффициент относительного поперечного расширения; угол дилатансии; параметры закона пластического течения расширенной модели Друкера-Прагера; угол внутреннего трения для расширенной модели Друкера-Прагера и константы A , m , n , характеризующие ползучесть. Подробное описание модели материала приведено в главах 3 и 4.

Расчетная модель представляла собой слоистый массив мерзлых грунтов с модельным подземным резервуаром. Размер расчетной области составлял 100x150 м. Применена цилиндрическая система координат, при этом ось Y совпадала с осью подземного резервуара и была перпендикулярна земной поверхности. Задачу решали в осесимметричной постановке. В расчетах использованы показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов, полученные на допроектной стадии методом трехосного сжатия, их точные значения представлены в табл. 28 [87]. На рис. 28 показана расчетная схема, отражающая глубину расположения модельного подземного резервуара и геологическое строение вмещающего массива мерзлых грунтов. Подробные данные о составе, строении и свойствах вмещающих мерзлых грунтов приведены в приложениях 2 и 4 (скважина ю-2).

В качестве начального напряженного состояния в массиве задано геостатическое поле напряжений, вызванное гравитационными силами. По краям расчетной области установлены следующие граничные условия: отсутствовало перемещение грани массива параллельно оси Y (в направлении оси X); отсутствовало перемещение нижней границы массива параллельно оси X (в направлении Y). Массив разбит на элементы треугольной формы с учащением шага в окрестности подземного резервуара. Противодействие при расчете не учитывалось – принято, что резервуар находится в пустом состоянии в течение 3 лет. Глубина влияния строительства подземного резервуара ограничена зоной, в которой расчетное значение перемещения мерзлых грунтов составляло 0,05 м. Данный критерий взят согласно СТО Газпром 2-3.1-071-2006 [60], СТО Газпром 2-1.19-1142-2018 [59], как 1% от допустимого перемещения дна подземного резервуара принятой высоты в случае его пригодности к эксплуатации [48].

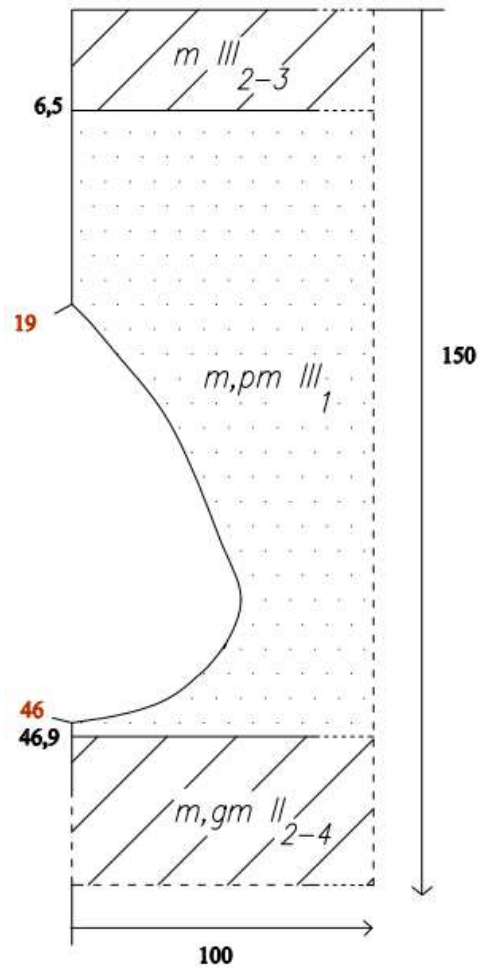


Рис. 28. Расчетная схема математического моделирования изменения НДС грунтовой толщи в результате сооружения в ней модельного подземного резервуара (показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов приведены в табл. 28)

На рис. 29 представлены результаты численного расчета, цветом выделена зона, в которой перемещение мерзлого грунта составило более 0,05 м. Для наглядности построен график изменения перемещения мерзлого грунта по оси от дна подземного резервуара (рис. 30). По нему видно, что наибольшие перемещения находятся в пределах первых метров под дном емкости, здесь их значения достигают десятков сантиметров. С глубиной происходит их снижение, так что на расстоянии 10 м под дном емкости перемещение грунта не превышает 0,1 м. На расстоянии от 10 м до 15 м его значение снижается до 0,06-0,09 м. На расстоянии более 18 м от дна емкости перемещение уже составляет менее 0,05 м. Таким образом, влияние от сооружения модельного подземного резервуара распространится на 18 м вглубь от его дна, а нижняя граница грунтовой толщи составит 64 м.

Таблица 28. Показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов, используемые в качестве входных параметров для расширенной модели Друкера-Прагера при численном моделировании изменения НДС грунтовой толщи в результате сооружения в ней модельного подземного резервуара [87]

Наименование мерзлого грунта	Геологический индекс	E_0 , МПа	ν	ψ , °	Предел текучести		Предел прочности		ρ , г/см ³	Угол Друкера-Прагера β , °	A	m	n
					q, МПа	γ , д.ед.	q, МПа	γ , д.ед.					
Верхнеплейстоценовые мерзлые суглинки третьей террасы	mIII ₂₋₃	10,3	0,27	0	0,142	0	1,01	0,049	1,6	18	5,64x10 ⁻¹¹	-0,40	1,15
Верхнеплейстоценовые мерзлые пески казанцевской свиты	m,pmIII ₁	41,9	0,25	0	0,327	0	4,39	0,041	1,87	47	1,23x10 ⁻⁰⁹	-0,90	1,07
Среднеплейстоценовые мерзлые суглинки салехардской свиты	m,gmII ₂₋₄	13,2	0,26	0	0,142	0	1,01	0,049	1,9	18	6,00x10 ⁻¹⁰	-0,88	1,03

Примечание 1. E_0 – модуль общей деформации; ν – коэффициент относительного поперечного расширения; ψ – угол дилатансии, q – девиатор напряжений; γ – относительная деформация сдвига; ρ – плотность мерзлого грунта; β – угол наклона поверхности текучести в расширенной модели Друкера-Прагера; A, m, n – параметры ползучести в расширенной модели Друкера-Прагера.

Примечание 2. Показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов указаны согласно рис. 28.

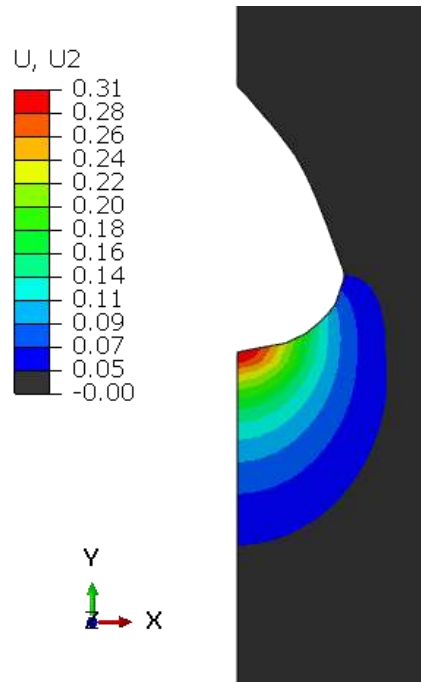


Рис. 29. Перемещение мерзлого грунта под дном модельного подземного резервуара по результатам численного моделирования, м

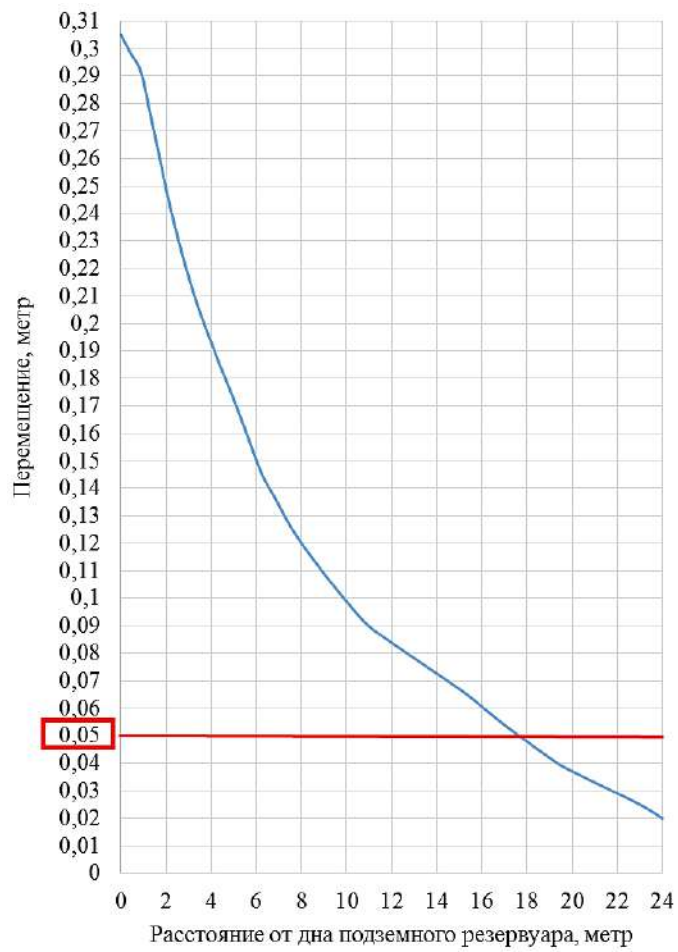


Рис. 30. Перемещение мерзлого грунта по оси от дна модельного подземного резервуара по результатам численного моделирования

Определение глубины активной зоны при эксплуатации подземного резервуара в результате теплового воздействия захораниваемых отходов бурения

С целью определения глубины влияния теплового воздействия от захоронения отходов бурения в мерзлый массив проведено математическое моделирование, основанное на решении задачи Стефана. Расчет проведен в программном комплексе Heat, разработанном на кафедре геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством профессора Л.Н. Хрусталева. Использован метод конечных разностей с двухслойной явной схемой с регуляризацией. Алгоритм сочетал в себе применение метода балансов и энтальпийную формулировку задачи [52].

Калибровка математической модели выполнена путем решения обратной задачи Стефана (в одномерной постановке). А именно, имея данные термометрических наблюдений, методом подбора найдены параметры верхних граничных условий так, чтобы результаты расчета температуры грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов и глубины его сезонного слоя соответствовали натурным значениям (рис. 31).

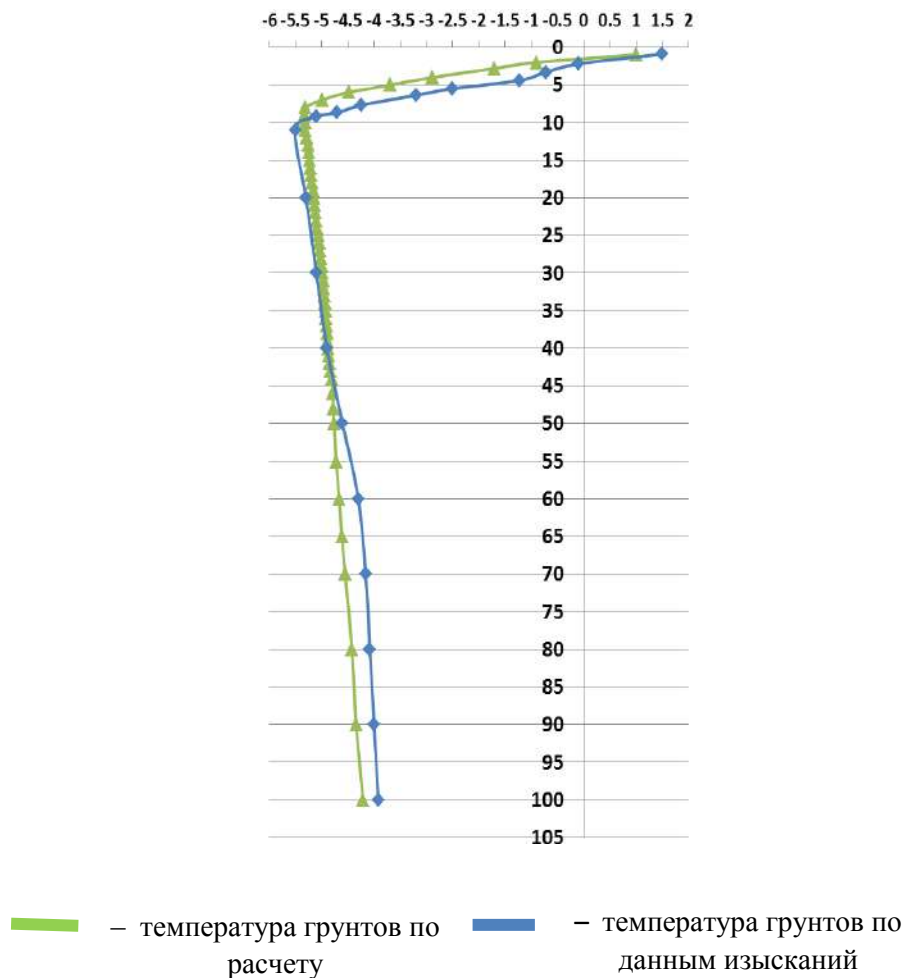


Рис. 31. Распределение температуры по глубине в грунте, полученное по данным математической модели и термометрической съемки

Для задачи использована осесимметричная модель расчетной области радиусом 100 м и глубиной 400 м. Расчетная область разбита на единичные блоки с учащением шага в области сезонноталого слоя, подземного резервуара и подошвы многолетнемерзлых грунтов. Общее количество внутренних блоков составило 4978. В каждый единичный блок были занесены показатели теплофизических свойств: теплопроводность талой фазы, теплопроводность мерзлой фазы, объемная теплоемкость талой фазы, объемная теплоемкость мерзлой фазы, объемная теплота фазовых переходов и температура фазовых переходов (табл. 29).

На нижней границе выбрано условие второго рода с тепловым потоком за счет геотермического градиента (плотность теплового потока $0,04 \text{ Вт/м}^2$). Граничные условия на боковых поверхностях соответствовали второму роду с нулевым теплотокном. На верхней границе области задано условие третьего рода, которое устанавливает пропорциональность между температурами по обе стороны границы и плотностью теплового потока через нее. Коэффициент пропорциональности – коэффициент теплообмена α – установлен для снега в зимний период времени и для растительности в летний период времени. Также учтены среднемесячные температуры воздуха. Для области отсыпки в летний период выбраны граничные условия первого рода, так как поверхность является оголенной. Среднемесячная температура воздуха летом с отсыпкой пересчитана согласно СП 121.13330.2012 [57] (с учетом радиационной поправки). В зимний период времени в области отсыпки установлены граничные условия третьего рода. Начальные условия задачи описывали температурное поле в момент времени до загрузки отходов бурения и были подобраны путем решения обратной задачи Стефана на ЭВМ (рис. 31).

На рис. 32 показана расчетная схема с указанием глубины расположения модельного подземного резервуара и геологического строения массива мерзлых грунтов, показатели теплофизических свойств которых приведены в табл. 29. Данные о составе, строении и свойствах мерзлых грунтов представлены в приложении 2 (скважина ю-2).

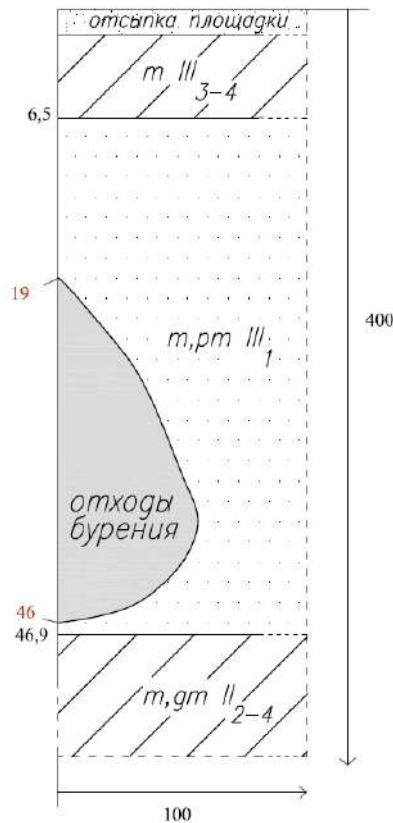


Рис. 32. Расчетная схема математического моделирования теплового воздействия захораниваемых отходов бурения в модельный подземный резервуар (показатели теплофизических свойств мерзлых грунтов приведены в табл. 29)

Таблица 29. Теплофизические свойства грунтов, отходов бурения и грунтов отсыпки для программы Heat

Наименование мерзлого грунта/вещества	Геологический индекс	Показатели теплофизических свойств					
		λ_t , Вт/м °С	λ_m , Вт/м °С	C_m , Вт ч/м ³ °С	C_m , Вт ч/м ³ °С	$Q_{фаз}$, Вт ч/м ³	$T_{н.з.}$, °С
Верхнеплейстоценовые мерзлые легкие суглинки третьей террасы	mIII ₂₋₃	1,50	1,84	777	695	37200	-1,10
Верхнеплейстоценовые мерзлые пылеватые пески казанцевской свиты	m,pmIII ₁	1,75	2,75	750	527	23000	-0,23
Среднеплейстоценовые мерзлые тяжелые суглинки салехардской свиты	m,gmII ₂₋₄	1,55	1,80	720	622	27900	-1,50
Пески отсыпки	-	1,45	1,62	597	499	14886	-0,10
Отходы бурения	-	1,40	1,60	833	695	60000	-1,50

Примечания 1. λ_t , λ_m – теплопроводность талой и мерзлой фаз; C_m , C_m – объемная теплоемкость талой и мерзлой фаз; $Q_{фаз}$ – объемная теплота фазовых переходов; $T_{н.з.}$ - температура начала замерзания

Примечание 2. Показатели теплофизических свойств мерзлых грунтов указаны согласно рис. 32.

Для изучения глубины теплового влияния захораниваемых отходов бурения на грунтовую толщу использовано несколько точек наблюдения. В них оценено изменение значения температуры мерзлого грунта с течением времени. Расположение точек в массиве приведено на рис. 33. При расчете нижней границы грунтовой толщи за зону влияния принята область с изменением естественной температуры грунта не менее чем на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [113].

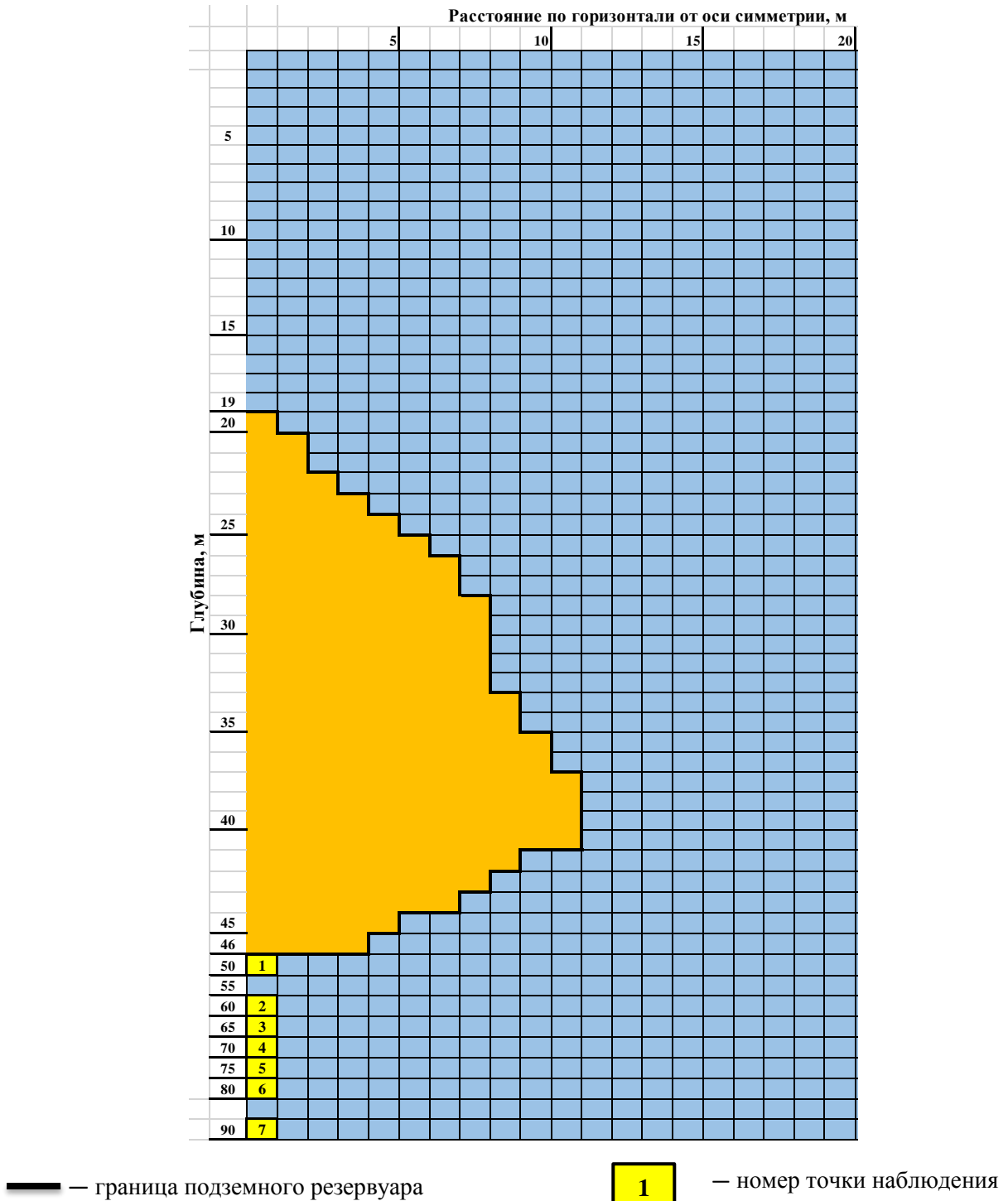


Рис. 33. Схема расположения точек наблюдения (1-7) под дном модельного подземного резервуара

По результатам численного моделирования построен график, отражающий характер изменения температуры мерзлого грунта в точках наблюдения после загрузки отходов бурения с течением времени (рис. 34). Так, до глубины 70 м от земной поверхности (или 24 м от дна подземного резервуара) температура мерзлого грунта после загрузки отходов бурения увеличивается более чем на 0,5 °С. Ниже этой глубины температура мерзлого грунта изменяется незначительно. Таким образом, максимальное тепловое воздействие в вертикальном направлении после загрузки отходов достигает глубины 70 м от земной поверхности (или 24 м от дна подземного резервуара) (рис. 34).

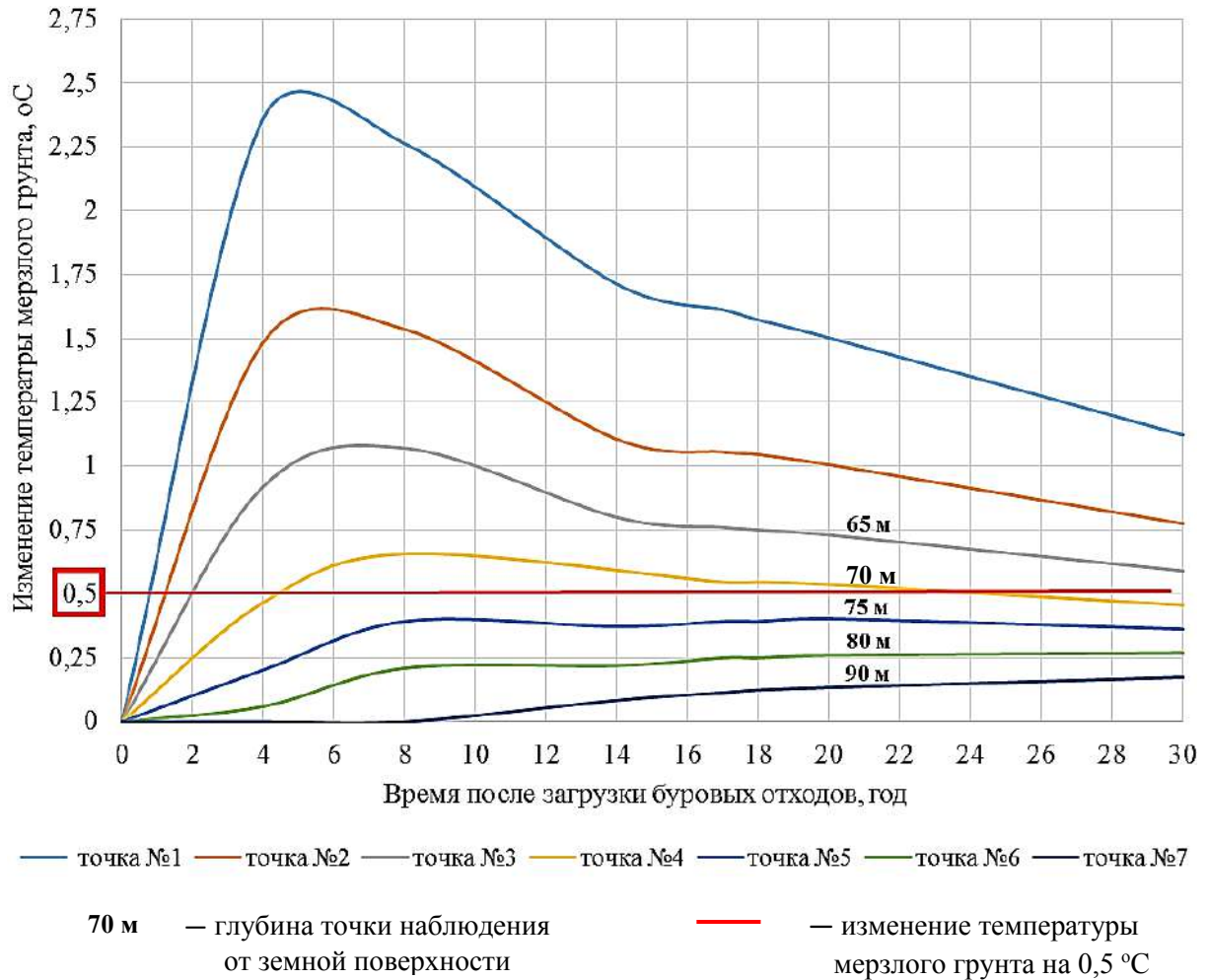


Рис. 34. Изменение температуры мерзлого грунта под дном модельного подземного резервуара (в точках наблюдения) после загрузки отходов бурения

Таким образом, по результатам двухэтапного численного моделирования в наиболее худших условиях с точки зрения распространения воздействия от сооружения подземного резервуара вглубь массива установлено, что глубина влияния составит 64 м и 70 м. Первое значение получено в результате изменения НДС грунтовой толщи, второе – вследствие захоронения в подземный резервуар отходов бурения. Нижняя граница грунтовой толщи принята по максимальному оцененному влиянию и назначена на глубине 70 м.

2.2. Типизация многолетнемерзлых грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения

Систематизация грунтовых толщ проведена по данным 30 скважин (рис. 35), пробуренных на территории всего Харасавэйского месторождения в разные годы (1981-2015 гг.) разными организациями (ВНИИгаза Мингазпрома СССР, ООО Научно-технической фирмой «Криос» и др.) (см. раздел 1.4) [44, 88-109]. Их бурение было проведено в пределах площадей с плоским рельефом и отсутствием проявления опасных геологических процессов. В связи с этим, все выделенные грунтовые толщ с точки зрения поверхностных условий подходили для целей строительства подземных резервуаров. Геологические разрезы по данным бурения указанных скважин (линии разрезов на рис. 35) приведены в приложении 5.

При разработке настоящей типизации грунтовых толщ за основу взят подход, предложенный В.Т. Трофимовым и соавторами при систематизации грунтовых толщ Западно-Сибирской плиты [64]. Использовано построение двухрядного, перекрестного типа (таблицы-матрицы).

Для систематизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения приняты две группы признаков, отражающие состав, строение и современное состояние грунтовых толщ. Используются такие показатели состава, строения и состояния, которые оказывают наибольшее влияние на НДС многолетнемерзлой грунтовой толщ. Таким образом, в первую группу признаков вошли показатели состава и строения грунтовых толщ, к которым принадлежат: количество и сочетание классов и типов грунтов, содержание водорастворимых солей в разрезе толщ. Во вторую группу признаков вошли особенности состояния грунтовой толщ, характеризующиеся фазовым состоянием воды в грунтах, среднегодовой температурой и степенью льдистости (увлажненности) грунтов толщ [48].

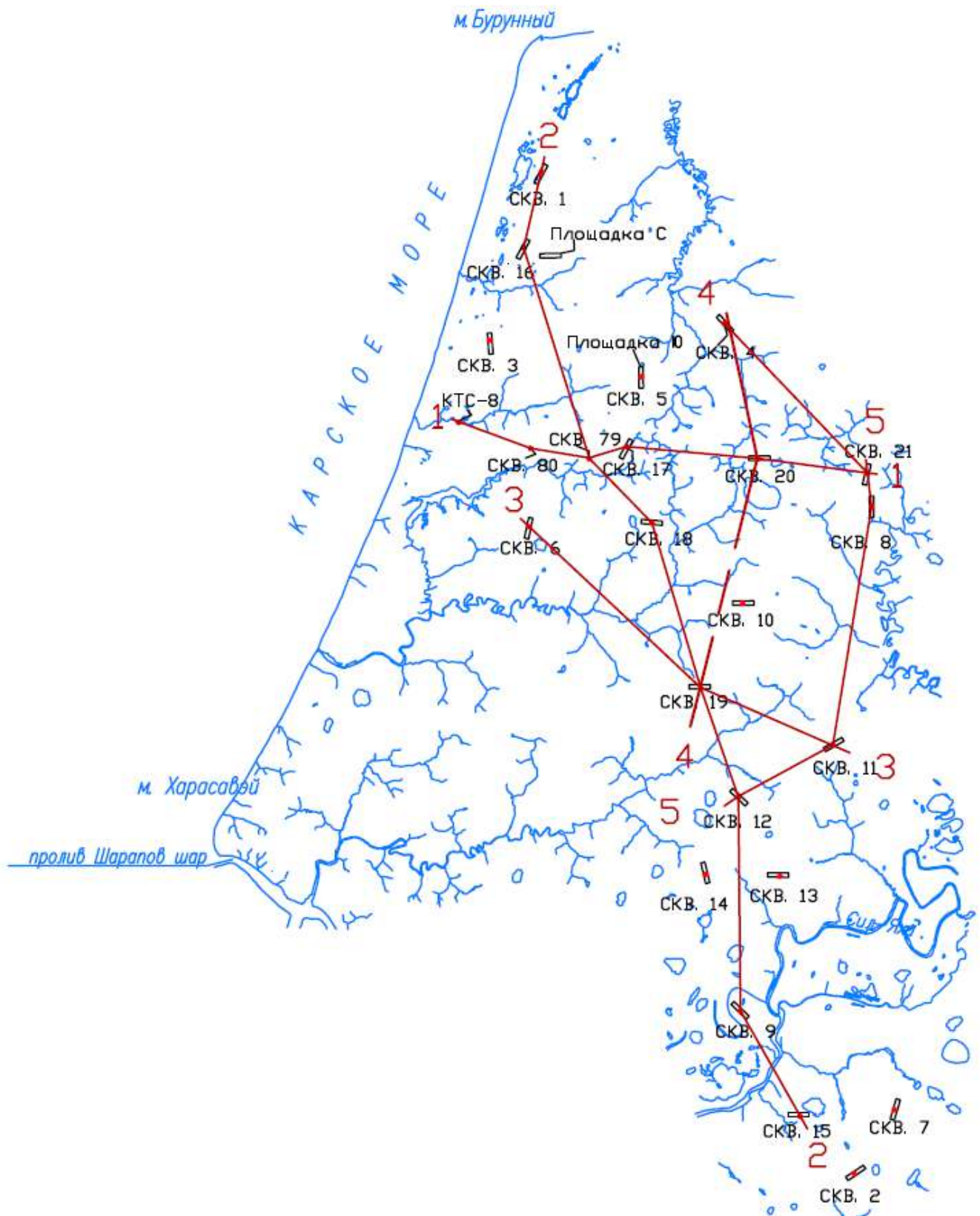


Рис. 35. Схема Харасавэйского месторождения с номерами скважин
(геологические разрезы по линиям приведены в приложении 5)

2.2.1. Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения по первой группе признаков

Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы выполнена в пять структурных уровней.

На первом структурном уровне в качестве признака типизации выступает число классов грунтов, слагающих толщу. В пределах исследуемых глубин территории Харасавэйского месторождения выделены грунтовые толщи, сложенные одним классом грунтов.

На втором структурном уровне за классификационный признак принят характер классов грунтов толщи. Грунтовые толщи изучаемой территории являются мерзлыми дисперсными грунтами.

На третьем и четвертом структурных уровнях в качестве признаков типизации выступали число слоев и литологический тип пород, слагающих грунтовые толщи. До исследуемой глубины выделено две разновидности пород: песчаные (пески различной крупности) и глинистые (глины, суглинки и супеси). Подобное укрупненное выделение пород грунтовых толщ осуществлено целенаправленно: объединение нескольких типов пород в группы проведено ввиду отсутствия необходимости в высокой детальности дифференциации толщ. Это объясняется тем, что для строительства подземных резервуаров важен факт наличия или отсутствия песчаных пород любой крупности в разрезе и характеристики их залегания. При этом всякий глинистый грунт, будь то супесь или глина, является не пригодным для вышеупомянутых целей.

Типизация грунтовых толщ на третьем и четвертом структурных уровнях проводилась путем оценки процентного соотношения пород в толще. Так, толща называлась однопородной если более 96% ее мощности сложено глинистой породой. Двухпородная толща – толща, не менее 96% мощности которой сложено песчаными и глинистыми породами. Дальнейшее подразделение двухпородных грунтовых толщ по процентному содержанию литологических типов пород основано на (1) детальном анализе литологического строения грунтовых толщ Харасавэйского месторождения, (2) конструктивных особенностях подземных резервуаров, (3) требованиях к геологическому строению используемого под строительство песчаного пласта. Их учет необходим для дальнейшей оценки благоприятности различных типов грунтовых толщ под строительство подземных резервуаров. Ниже приведены выделенные типы двухпородных грунтовых толщ с обоснованиями их подразделения.

Исходя из требований к геологическому строению, мощность планируемого под строительство резервуара песчаного пласта должна быть более 10 м. Грунтовая толща, не содержащая такой песчаный слой представлена более чем на 85% глинистым грунтом. Таким образом, выделен тип преимущественно глинистой грунтовой толщи с содержанием глинистой породы от 96% до 85%.

При наличии в грунтовой толще песчаного пласта более 10 м процентное содержание глинистой составляющей разреза будет менее 85%; при снижении ее до 70% мощность песчаного пласта будет уже значительна и благоприятна для строительства подземных резервуаров. Грунтовая толща, представленная от 85% до 70% глинистой породой, названа как преимущественно глинистая с песчаным слоем. Здесь и далее использование в названии словосочетания «с песчаным слоем»: 1) отражает характерное для Харасавэйского месторождения геологическое строение толщ с мощным и достаточно однородным слоем песчаных пород; 2) позволяет на следующем шаге типизации подразделить грунтовые толщи по глубине залегания данного пласта.

Грунтовая толща, которая на 70 - 50% сложена глинистой породой, названа песчано-глинистой с песчаным слоем. Особенностью данного типа грунтовой толщи является снижение преобладания глинистой породы с одновременным увеличением доли песчаной породы в толще.

При снижении содержания глинистой породы ниже 50% песчаная составляющая начинает преобладать. Такой высокий процент песчаных пород в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения достигается либо в результате наличия одного очень мощного песчаного пласта, либо, что чаще, за счет нескольких песчаных слоев, разделенных глинистым(и). Таким образом, грунтовая толща, не менее 50% мощности которой сложено песчаными грунтами, названа глинисто-песчаной с песчаным слоем [48].

Анализ геологического строения грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения показал наличие достаточно однородных песчаных пластов разной мощности. В зависимости от мощности и глубины их расположения оценивается возможность строительства подземных резервуаров. Сооружение подземных резервуаров должно проводиться на глубинах ниже 10 м. При таком расположении на захороненные отходы бурения не будут оказывать влияние колебания температуры воздуха на земной поверхности. Однако важнейшее значение приобретает не только глубина песчаного пласта, но и его мощность. Ведь если кровля песчаного пласта расположена близко к поверхности, но его мощность значительна, то строительство резервуара произведут на глубинах более 10 м. Для учета требований и к мощности, и глубине строительства

дальнейшая типизация грунтовых толщ проведена *по глубине расположения подошвы песчаного слоя*.

Выделены двухпородные грунтовые толщи с песчаным слоем в верхней и нижней частях: в верхней части, когда подошва песчаного пласта находится на глубине менее 20 м; в нижней части, когда подошва песчаного пласта находится на глубине более 20 м. Выбор этого граничного значения объясняется следующим. Минимальная глубина, на которой может производиться строительство резервуара равна 10 м, а минимальная мощность песчаного пласта должна быть 10 м. Соответственно, подошва песчаного пласта, который отвечает минимально допустимым требованиям к строительству, находится на глубине 20 м.

Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по количеству и сочетанию классов и литологических типов пород (по 1-4 структурным уровням) представлена на схеме рис. 36.

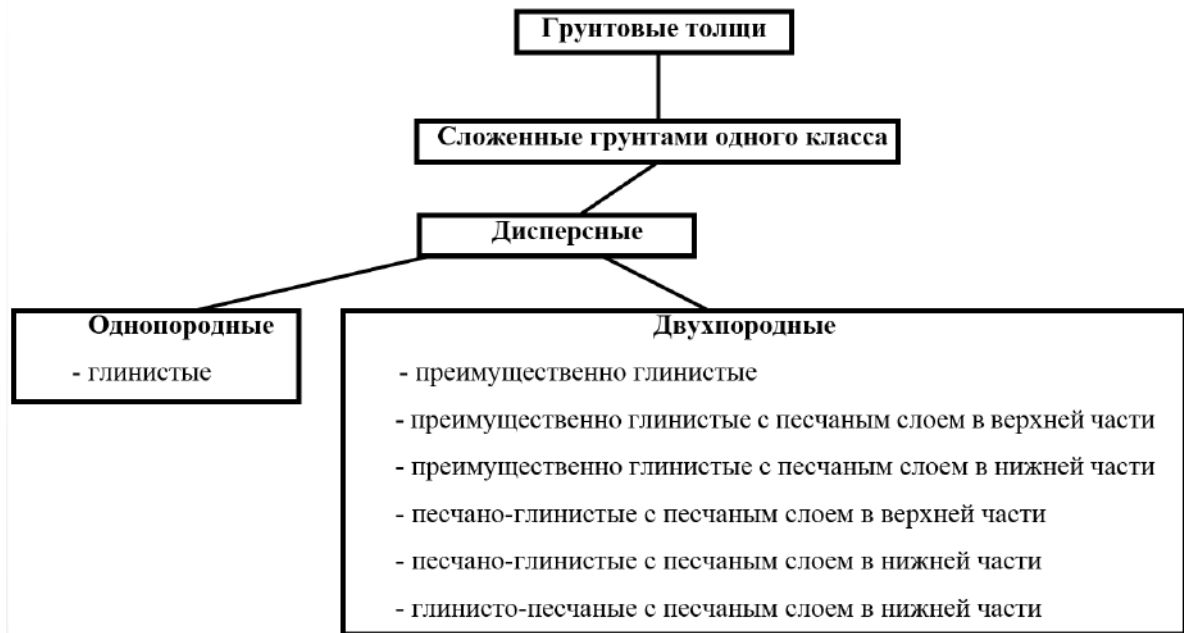


Рис. 36. Схема типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы

На пятом структурном уровне в качестве признака типизации выступает содержание водорастворимых солей (засоленность) в составе пород грунтовой толщи. При систематизации использовалась классификация грунтов по степени засоленности, представленная в ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация, таблицы Б.28 (табл. 30) [25]. Структуризация толщ проведена путем расчета процентного содержания грунтов с разной засоленностью в грунтовой толще.

Таким образом, по степени засоленности было выделено три типа грунтовых толщ Харасавэйского месторождения:

- преимущественно сильнозасоленные;
- слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных;
- переслаивание средне- и сильнозасоленных.

Таблица 30. Подразделение многолетнемерзлых грунтов с морским (хлоридным) типом засоления по степени засоленности [25]

Разновидность грунтов	Засоленность водорастворимыми солями D_{sal} , %		
	Пески	Супеси	Суглинки и глины
Незасоленные	$D_{sal} < 0,05$	$D_{sal} < 0,15$	$D_{sal} < 0,20$
Слабозасоленные	$0,05 \leq D_{sal} < 0,15$	$0,15 \leq D_{sal} < 0,35$	$0,20 \leq D_{sal} < 0,40$
Средnezасоленные	$0,15 \leq D_{sal} < 0,30$	$0,35 \leq D_{sal} < 0,60$	$0,40 \leq D_{sal} < 0,80$
Сильнозасоленные	$D_{sal} \geq 0,30$	$D_{sal} \geq 0,60$	$D_{sal} \geq 0,80$

2.2.2. Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения по второй группе признаков

Подразделение грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы отражает особенности их состояния, температуры грунтов и степени льдистости (увлажненности). Систематизация грунтовых толщ по признакам второй группы проведена на четырех структурных уровнях.

На первом структурном уровне за классификационный признак принята степень однородности состояния грунтов толщ. Грунтовые толщ изучаемой территории подразделены на толщ с однородным состоянием по разрезу и с неоднородным состоянием по разрезу. Последний тип характеризуется присутствием в разрезе толщ сильнозасоленных подземных вод (криопэггов) (см. раздел 1.4).

На втором структурном уровне в качестве классификационного признака выступает характер состояния грунтов толщ. Так, исследуемые грунтовые толщ с однородным состоянием по разрезу представлены на всю мощность многолетнемерзлыми породами, а с неоднородным состоянием по разрезу – многолетнемерзлыми и тальными грунтами. Примечательно, что и первый, и второй типы грунтовых толщ имеют отрицательную температуру. Наличие высокоминерализованных вод с отрицательной температурой в грунтовых толщах второго типа препятствует успешному строительству подземных резервуаров, поэтому является неблагоприятным фактором для их реализации.

На третьем структурном уровне признаком типизации выступает температура грунтов на глубине грунтовой толщи. Среди грунтовых толщ с многолетнемерзлыми грунтами обособлены: 1) грунтовые толщи с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 2) грунтовые толщи с температурой $-4\div-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Грунтовые толщи с многолетнемерзлыми и талыми грунтами включают одну категорию – с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На четвертом структурном уровне в качестве признака типизации выступает степень льдистости (увлажненности) грунтовой толщи. При систематизации подразделение мерзлых суглинистых грунтов проведено по льдистости за счет видимых ледяных включений, мерзлых песчаных – по суммарной льдистости согласно ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация, таблицы Б.26, Б.27 (табл. 31) [25]. Структуризация толщ проведена путем расчета процентного содержания грунтов с разной льдистостью в грунтовой толще.

Таблица 31. Подразделение многолетнемерзлых грунтов по степени льдистости [25]

Разновидности глинистых мерзлых грунтов	Льдистость за счет видимых ледяных включений i_i , д.ед.
Нельдистый	$i_i \leq 0,03$
Слабольшдистый	$0,03 < i_i \leq 0,20$
Льдистый	$0,20 < i_i \leq 0,40$
Сильнольдистый	$0,40 < i_i \leq 0,80$
Ледогрунт	$i_i > 0,80$
Разновидности песчаных грунтов	Суммарная льдистость i_{tot} , д.ед.
Нельдистый	$i_{tot} \leq 0,20$
Слабольшдистый	$0,20 < i_{tot} \leq 0,40$
Льдистый	$0,40 < i_{tot} \leq 0,60$
Сильнольдистый	$0,60 < i_{tot} \leq 0,80$
Ледогрунт	$i_{tot} > 0,80$

При наличии пластового льда грунтовая толща относилась к отдельному типу путем прибавления характеристики «с включением сильнольдистых». Грунтовые толщи с неоднородным состоянием по разрезу – многолетнемерзлые и талые – относятся к одному типу с добавлением слов «с включением сильноувлажненных». Таким образом, по степени льдистости было выделено четыре типа грунтовых толщ Харасавэйского месторождения.

I. С однородным состоянием по разрезу

A - многолетнемерзлые

- преимущественно нельдистые;
- слабо- и льдистые на нельдистых;
- слабо- и льдистые с включением сильнольдистых на нельдистых.

II. С неоднородным состоянием по разрезу

B - многолетнемерзлые и талые

- переслаивание слабо и нельдистых с включением сильноувлаженных.

Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы показана на рис. 37.

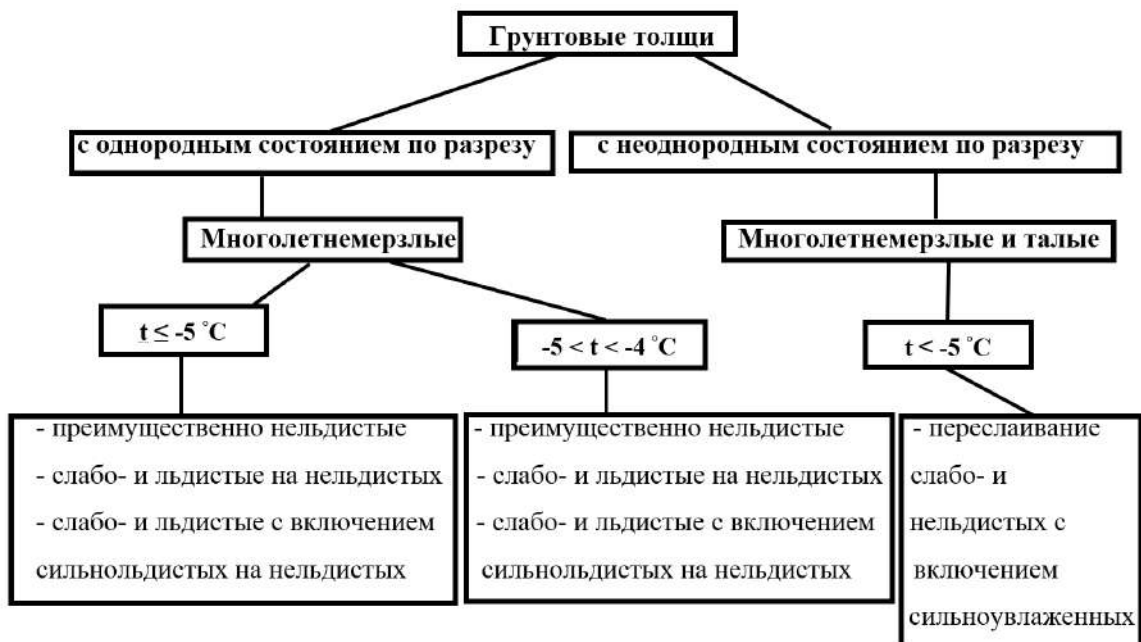


Рис. 37. Схема типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы

2.2.3. Общая систематизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения

Представленные выше две типизационные схемы наглядно отражают состав и строение грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы и их современное состояние по признакам второй группы (рис. 36, 37). Для наиболее полного описания исследуемых грунтовых толщ по признакам первой и второй групп обе схемы соединены в одну таблицу-матрицу (табл. 32). По вертикали представлена классификация грунтовых толщ по их составу и строению (признаки первой группы), по горизонтали – по современному состоянию (признаки второй группы). В таблице-матрице для удобства

восприятия приняты следующие буквенные обозначения для степени льдистости (увлажненности):

- преимущественно нельдистые – **а**;
- слабо- и льдистые на нельдистых – **б**;
- слабо- и льдистые с включением сильнольдистых на нельдистых – **в**;
- переслаивание слабо- и нельдистых с включением сильноувлажненных – **г**.

При пересечении вертикали и горизонтали таблицы-матрицы образуются таксономические единицы грунтовой толщи разного иерархического уровня, которые обладают признаками первой и второй группы одновременно. Наименьшая из них – тип грунтовой толщи, которая характеризуется определенными: литологическим составом, температурой грунтов, степенью засоленности и льдистости (увлажненности). В таблице-матрице эта единица представлена самой малой клеткой. Всего выделено 147 типов грунтовых толщ, из которых на Харасавэйском месторождении действительно встречено 20 типов. Встреченные типы грунтовых толщ отмечены в таблице 37 нумерацией.

Выполненная типизация отражает все многообразие грунтовых толщ Харасавэйского месторождения с их инженерно-геологическими особенностями. Она может быть использована для оценки благоприятности того или иного типа грунтовой толщи для строительства подземных резервуаров. Исходя из требований к составу, строению и состоянию грунтов для создания хранилищ, грунтовые толщи были подразделены по уровню благоприятности (табл. 33). Грунтовые толщи с неблагоприятными условиями обладают следующими характеристиками:

- (1) отсутствует песчаный пласт мощностью более 10 метров;
- (2) песчаный пласт расположен на глубине менее 10 метров, что способствует влиянию сезонных колебаний температуры на строительство и эксплуатацию подземных резервуаров;
- (3) грунты толщи являются нельдистыми, что способствует фильтрации захораниваемого продукта в грунтовый массив;
- (4) толща имеет неоднородное состояние по разрезу, присутствуют сильноувлажненные грунты.

Упомянутые требования перечислены в диссертации С.Д. Сурина «Оценка теплового воздействия при строительстве скважинных резервуаров для захоронения буровых отходов» [113], в книге О.Е. Аксютин и др. «Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах» [3], а также в проектной документации для строительства подземных резервуаров на территории Харасавэйского месторождения [87].

Таблица 32. Типологическая систематизация грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения

Грунтовые толщи			с однородным состоянием по разрезу						с неоднородным состоянием по разрезу	
			ММП						ММП и талые	
			t ≤ -5 °С			-5 < t < -4 °С			t ≤ -5 °С	
			а	б	в	а	б	в	г	
Сложенные грунтами одного класса	дисперсные	однородные	глинистые	сильнозасоленные	1					
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных			2			
				переслаивание средне- и сильнозасоленных	3	4				
		двухпородные	преимущественно глинистые	сильнозасоленные						
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных			5	6		
				переслаивание средне- и сильнозасоленных	7	8	9			
			преимущественно глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные						10
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		12				
				переслаивание средне- и сильнозасоленных						
			преимущественно глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные						
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных	11	13	14			
				переслаивание средне- и сильнозасоленных						
		песчано-глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные							
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных							
			переслаивание средне- и сильнозасоленных							
		песчано-глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные						15	
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		16	17				
			переслаивание средне- и сильнозасоленных					18		
		глинисто-песчаные с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные							
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных			19				
			переслаивание средне- и сильнозасоленных				20			

Примечание: в таблице нумерацией отмечены типы грунтовых толщ, встреченные на территории Харасавэйского месторождения.

Всего выделено 111 типов грунтовых толщ с *неблагоприятными условиями* для строительства подземных резервуаров под захоронения отходов бурения. Из них 13 типов действительно встречены на исследуемой территории Харасавэйского месторождения. В табл. 33 типы грунтовых толщ с неблагоприятными условиями выделены красным цветом и отмечены нумерацией. Ниже приведены названия и нумерация всех встреченных на территории Харасавэйского месторождения неблагоприятных грунтовых толщ:

Грунтовая толща № 1 сложена грунтами одного класса, однородная, глинистая, сильнозасоленная, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5°C , слабо- и льдистая на нельдистых.

Грунтовая толща № 2 сложена грунтами одного класса, однородная, глинистая, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой от -4°C до -5°C , нельдистая.

Грунтовая толща № 3 сложена грунтами одного класса, однородная, глинистая, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5°C , нельдистая.

Грунтовая толща № 4 сложена грунтами одного класса, однородная, глинистая, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5°C , слабо- и льдистая на нельдистых.

Грунтовая толща № 5 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5°C , слабо- и льдистая с включением сильнольдистых на нельдистых.

Грунтовая толща № 6 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой от -4°C до -5°C , слабо- и льдистая на нельдистых.

Грунтовая толща № 7 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5°C , нельдистая.

Грунтовая толща № 8 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5°C , слабо- и льдистая на нельдистых.

Грунтовая толща № 9 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным

состоянием по разрезу, с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, слабо- и льдистая с включением сильнольдистых на нельдистых.

Грунтовая толща № 10 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая с песчаным слоем в верхней части, сильнозасоленная, с неоднородным состоянием по разрезу, с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, с переслаиванием слабо- и нельдистых с включением сильноувлажненных грунтов.

Грунтовая толща № 11 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая с песчаным слоем в нижней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, нельдистая.

Грунтовая толща № 12 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая с песчаным слоем в верхней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, слабо- и льдистая на нельдистых.

Грунтовая толща № 15 сложена грунтами одного класса, двухпородная, песчано-глинистая с песчаным слоем в нижней части, сильнозасоленная, с неоднородным состоянием по разрезу, с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, с переслаиванием слабо- и нельдистых с включением сильноувлажненных грунтов.

Некоторые из перечисленных неблагоприятных грунтовых толщ с соответствующей нумерацией представлены в приложении 2.

Грунтовые толщи имеют *благоприятные условия* для строительства подземных резервуаров, если не обладают вышеперечисленными характеристиками: (1), (2), (3) и (4).

Всего выделено 36 типов грунтовых толщ с благоприятными условиями для строительства подземных резервуаров, из которых в пределах территории Харасавэйского месторождения в реальности встречено 7 типов. В табл. 33 типы грунтовых толщ с благоприятными условиями выделены зеленым цветом и отмечены нумерацией.

Ниже приведены названия и нумерация всех встреченных на территории Харасавэйского месторождения благоприятных толщ.

Грунтовая толща № 13 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая с песчаным слоем в нижней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, слабо- и льдистая на нельдистых.

Таблица 33. Типизация грунтовых толщ по благоприятности для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения

Грунтовые толщи			с однородным состоянием по разрезу						с неоднородным состоянием по разрезу
			ММП						ММП и талые
			$t \leq -5^\circ\text{C}$			$-5 < t < -4^\circ\text{C}$			$t \leq -5^\circ\text{C}$
			а	б	в	а	б	в	г
Однородные	глинистые	сильнозасоленные		1					
		слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных				2			
		переслаивание средне- и сильнозасоленных	3	4					
Двухпородные	преимущественно глинистые	сильнозасоленные							
		слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных			5	6			
		переслаивание средне- и сильнозасоленных	7	8	9				
	преимущественно глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные						10	
		слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		12					
		переслаивание средне- и сильнозасоленных							
	преимущественно глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные							
		слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных	11	13	14				
		переслаивание средне- и сильнозасоленных							
песчано-глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные								
	слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных								
	переслаивание средне- и сильнозасоленных								
песчано-глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные						15		
	слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		16	17					
	переслаивание средне- и сильнозасоленных					18			
глинисто-песчаные с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные								
	слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных			19					
	переслаивание средне- и сильнозасоленных				20				

Грунтовая толща № 14 сложена грунтами одного класса, двухпородная, преимущественно глинистая с песчаным слоем в нижней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5 °С, слабо- и льдистая с включением сильнольдистых на нельдистых.

Грунтовая толща № 16 сложена грунтами одного класса, двухпородная, песчано-глинистая с песчаным слоем в нижней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5 °С, слабо- и льдистая на нельдистых.

Грунтовая толща № 17 сложена грунтами одного класса, двухпородная, песчано-глинистая с песчаным слоем в нижней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5 °С, слабо- и льдистая с включением сильнольдистых на нельдистых.

Грунтовая толща № 18 сложена грунтами одного класса, двухпородная, песчано-глинистая с песчаным слоем в нижней части, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой от -5 °С до -4 °С, слабо- и льдистая с включением сильнольдистых на нельдистых.

Грунтовая толща № 19 сложена грунтами одного класса, двухпородная, глинисто-песчаная с песчаным слоем в нижней части, слабо- и средnezасоленная на сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой ниже -5 °С, слабо- и льдистая с включением сильнольдистых на нельдистых.

Грунтовая толща №20 сложена грунтами одного класса, двухпородная, глинисто-песчаная с песчаным слоем в нижней части, с переслаиванием средне- и сильнозасоленных, с однородным состоянием по разрезу, с температурой от -5 °С до -4 °С, слабо- и льдистая на нельдистых.

Некоторые из перечисленных благоприятных грунтовых толщ с соответствующей нумерацией представлены в приложении 2.

Результаты проведенной типизации грунтовых толщ исследуемой территории позволяют сформулировать следующее научное положение № 2. **На основе анализа геологического строения Харасавэйского месторождения проведена общая характеристика и систематизация многолетнемерзлых грунтовых толщ территории, нижняя граница которых по результатам численного моделирования установлена на глубине 70 м; среди них выделены толщи, благоприятные для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения по признакам, отражающим состав, строение и современное состояние вмещающих их грунтов.**

Подразделение грунтовых толщ по благоприятности позволило оценить возможность их использования в качестве вместилищ для подземных резервуаров. Однако изменение НДС разных типов благоприятных грунтовых толщ в результате сооружения в них емкостей будет отличаться. Это логично объясняется различием показателей физико-механических свойств слагающих их грунтов. Поэтому для детального прогноза надежного функционирования подземных резервуаров необходимо проведение численного моделирования НДС грунтовых толщ.

Таким образом, по результатам исследований, приведенных в главе 2, можно сделать следующие **выводы**.

1. Для определения глубины типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения проведена оценка влияния строительства и эксплуатации подземных резервуаров на массив мерзлых грунтов. С этой целью выполнены две серии численного моделирования – расчет изменения НДС грунтовой толщи в результате формирования незакрепленной выработки и расчет теплового воздействия захораниваемых в подземный резервуар отходов бурения. По результатам первого из них, глубина воздействия оказалась равна 64 м, второго – 70 м. Нижняя граница грунтовой толщи принята по максимальному полученному значению и назначена на глубине 70 м.

2. Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения проведена по признакам двух групп, отражающих состав, строение и современное состояние грунтовых толщ. Использовались признаки, оказывающие наибольшее влияние на НДС грунтовой толщи. Всего выделено 20 типов грунтовых толщ, действительно встреченных на территории Харасавэйского месторождения. Все грунтовые толщ подразделены по благоприятности для целей строительства подземных резервуаров, исходя из требований к составу, строению и состоянию слагающих их грунтов. По результатам подразделения выделены 7 типов грунтовых толщ с благоприятными и 13 типов с неблагоприятными условиями для сооружения в них подземных резервуаров.

Глава 3

Физико-механические свойства грунтов, слагающих многолетнемерзлые грунтовые толщи Харасавэйского месторождения

Среди грунтовых толщ территории Харасавэйского месторождения выделено 7 благоприятных типов для сооружения подземных резервуаров (см. главу 2). Рассматриваемые толщи сложены грунтами, отличающимися между собой по литологическому строению, засоленности и льдистости, а, следовательно, и по показателям физико-механических свойств. Для дальнейшего анализа изменения НДС благоприятных грунтовых толщ необходимо выделить в них наиболее часто встречающиеся типы грунтов и определить показатели их физико-механических свойств.

Многолетнемерзлые благоприятные грунтовые толщи имеют схожее литологическое строение. Их верхняя часть представлена преимущественно верхнеплейстоценовыми суглинистыми отложениями третьей и второй морских террас. В средней части толщи повсеместно вскрыты мощные песчаные отложения казанцевской свиты, местами с прослоями пластового льда. Ниже их подстилают отложения салехардской свиты, сложенные преимущественно суглинистыми отложениями (см. главу 1, 2 и приложение 2, 5). Все выделенные благоприятные грунтовые толщи имеют подобное строение и отличаются лишь мощностью слоев.

На сегодняшний день сооружение подземных резервуаров проводят только в мерзлых песчаных отложениях, которые хорошо поддаются водно-тепловому разрушению (см. главу 4). Для этих целей среди указанных отложений наилучшим образом подходят песчаные грунты казанцевской свиты. Логично, что показатели их физико-механических свойств окажут определяющее влияние на изменение НДС грунтовой толщи в результате строительства в ней подземного резервуара. В связи с этим необходимо проанализировать изменчивость песчаных грунтов казанцевской свиты по разрезу, выделить среди них наиболее часто встречающиеся и определить показатели их физико-механических свойств.

На рис. 38 показана встречаемость различных типов песчаных грунтов казанцевской свиты в каждой из выделенной благоприятной грунтовой толщи. Так, песчаные отложения грунтовых толщ № 13, 19 более чем на 80% сложены слабозасоленными слабо- и льдистыми разностями. Для грунтовых толщ № 14 и № 17 характерно преобладание слабозасоленных слабо- и льдистых песчаных отложений более чем в 90% случаев. Менее 10% песчаных грунтов казанцевской свиты в этих толщах сложено средnezасоленными

слабо- и льдистыми разностями. В грунтовой толще № 16 содержание средnezасоленных слабо- и льдистых отложений несколько выше и достигает 27%, слабозасоленные разности здесь слагают остальные 70% слоя. Менее чем в 5-10% случаев грунтовые толщи №13, 16, 14, 17 включают иные типы песчаных отложений (рис. 38). В целом песчаные грунты казанцевской свиты в грунтовых толщах № 13, 14, 16, 17, 19 преимущественно сложены слабозасоленными слабо- и льдистыми мерзлыми песчаными грунтами, которые предлагается выбрать в качестве первого наиболее распространенного типа.

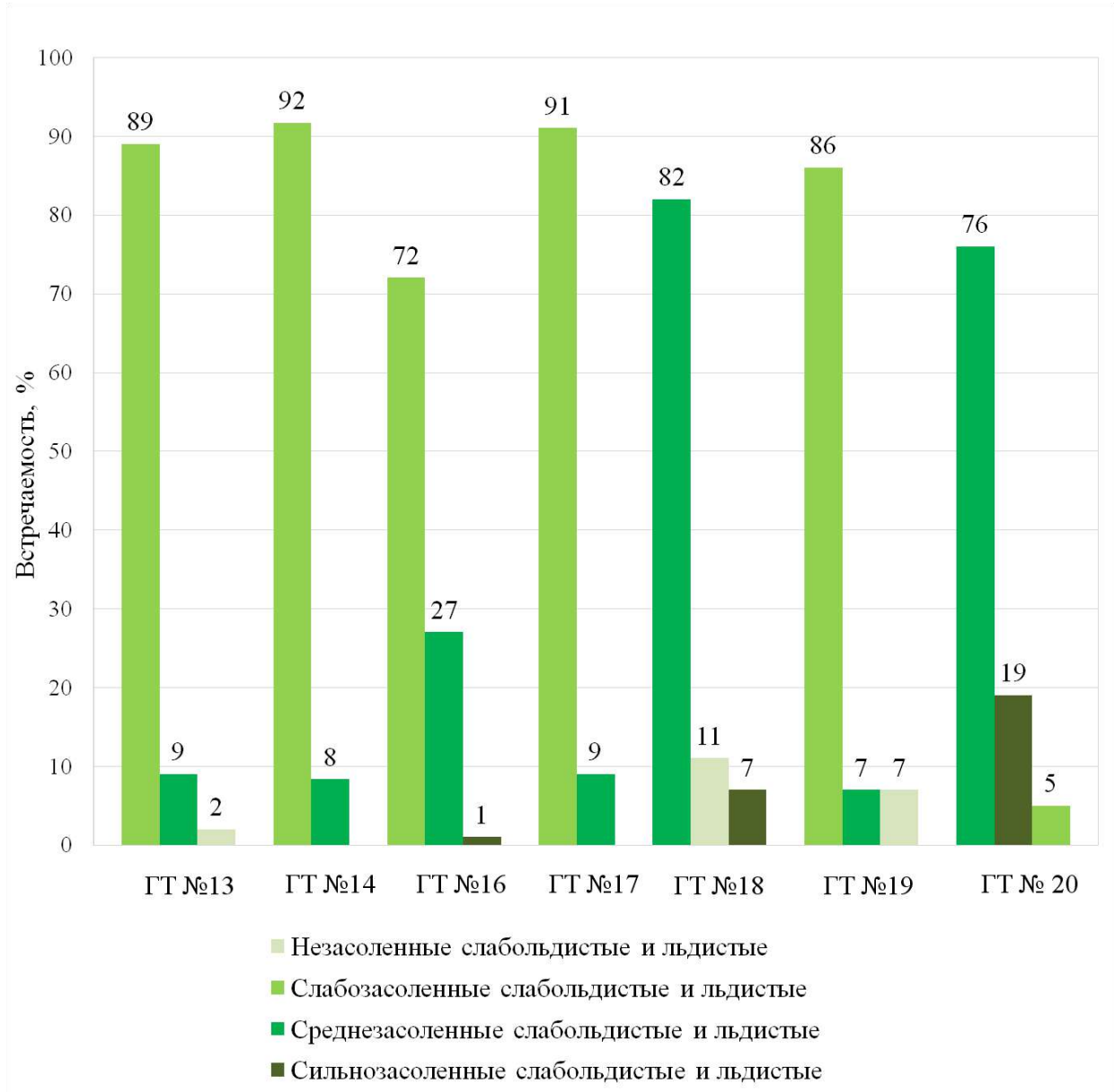


Рис. 38. Встречаемость различных типов песчаных грунтов казанцевской свиты в благоприятных толщах территории Харасавэйского месторождения

Примечание: ГТ № – номер грунтовой толщи согласно табл. 33 (см. раздел 2.3)

Иной состав мерзлых песков казанцевской свиты отмечен в грунтовых толщах № 18 и № 20. Здесь песчаные грунты более чем на 75% состоят из средnezасоленных слабо- и

льdistых разностей. Частота встречаемости сильнозасоленных слабо- и льdistых песков в грунтовой толще № 20 составляет менее 20%, в грунтовой толще № 18 – менее 10%. В менее чем 5% случаев грунтовые толщи № 18, 20 содержат слабозасоленные слабо- и льdistые пески казанцевской свиты, а незасоленные слабо- и льdistые песчаные разности встречаются только в грунтовой толще №18 (рис. 38). Это позволяет выделить второй наиболее встречаемый тип грунтов казанцевской свиты – *среднезасоленные слабо- и льdistые мерzлые песчаные грунты*.

Песчаные отложения казанцевской свиты не были разделены на типы по льdistости, в связи с тем, что значение ее показателей оказались близки и находились на границе слабо- и льdistых разновидностей по ГОСТ 25100-2020 [25]. Так, значение суммарной льdistости песчаных грунтов казанцевской свиты во всех благоприятных толщах варьирует от 0,37 до 0,43 д.ед. При этом наиболее часто она находится в диапазоне 0,37-0,41 д.ед. Среднее значение суммарной льdistости песчаных отложений казанцевской свиты во всех благоприятных грунтовых толщах составляет 0,40 д.ед.

Изменение степени засоленности и льdistости по разрезу благоприятных грунтовых толщ представлены в приложении 2.

По результатам анализа криогенного строения грунтовых толщ Харасавэйского месторождения определено, что в них местами встречаются мощные пластовые залежи льда (см. раздел 1.4). Их залегание в промежутке строительства подземных резервуаров необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации. В связи с тем, что скорость водно-теплового разрушения льда существенно ниже скорости разрушения песчаных отложений, то для его размыва в массив нужно внести большее количество тепла [61, 114]. Пренебрежение этим при расчете технологических параметров строительства является причиной уменьшения радиуса подземного резервуара в местах залегания слоев и линз льда, и как результат – формирования менее устойчивой формы емкости. Кроме того, в связи с известной способностью льда к течению, игнорирование показателей его физико-механических свойств приводит к недостоверным прогнозам изменения НДС грунтовых толщ и, как следствие, возможным ошибочным решениям по дальнейшей эксплуатации подземных резервуаров.

К сожалению, в сложившейся практике инженерно-геологических изысканий показатели физико-механических свойств льда недостаточно подробно определяются (или иногда вообще не определяются) из-за сложностей при их вскрытии и транспортировке. В связи с этим в распоряжении автора не оказывалось образцов льда, отобранных на территории Харасавэйского месторождения. Для проведения достоверного прогноза изменения НДС грунтовых толщ принято решение сформировать образцы льда с учетом

особенностей состава и строения льда естественного сложения. В качестве моделируемых были выбраны три вида льда, которые встречаются в промежутке строительства подземных резервуаров. Среди них два вида широко распространены в отложениях исследуемой территории и часто слагают пластовые залежи льда благоприятных грунтовых толщ – ультрапресный чистый лед и ледогрунт (см. раздел 1.4). Третий – слабосоленый чистый лед – встречается ограниченно, однако может обладать значительно более низкой прочностью, что скажется на устойчивости подземного резервуара. Для проверки последнего этот тип льда также был включен в программу испытаний. Таким образом, *ультрапресный чистый лед, ледогрунт и слабосоленый чистый лед* были приняты в качестве типов отложений, показатели физико-механических свойств которых необходимо было определить.

В меньшей степени на изменение НДС грунтовой толщи в результате сооружения подземного резервуара оказывают влияние показатели физико-механических свойств, перекрывающих и подстилающих суглинистых мерзлых грунтов, которые не являются непосредственным вместилищем для подземных резервуаров. В связи с этим принято решение выделить по одному наиболее часто встречающемуся типу суглинистых отложений среди грунтов: (1) второй, третьей морских террас и (2) салехардской свиты, залегающих в благоприятных грунтовых толщах. По результатам проведенного анализа определено, что морские отложения второй и третьей террас в большинстве случаев представлены *среднезасоленными льдистыми мерзлыми суглинками*. Отложения салехардской свиты преимущественно сложены *сильнозасоленными нельдистыми мерзлыми суглинистыми грунтами* (см. главы 1, 2 и приложение 2).

Таким образом, для прогноза изменения НДС благоприятных грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров принято решение определить показатели физико-механических свойств 7 типов грунтов (табл. 34).

Таблица 34. Типы грунтов, показатели физико-механических свойств которых необходимо определить для численного моделирования изменения НДС благоприятных грунтовых толщ Харасавэйского месторождения в результате сооружения в них подземных резервуаров

№	Название грунта
1	Среднезасоленный слабо- и льдистый мерзлый суглинок
2	Сильнозасоленный нельдистый мерзлый суглинок
3	Слабозасоленный слабо- и льдистый мерзлый песок
4	Среднезасоленный слабо- и льдистый мерзлый песок
5	Ультрапресный чистый лед
6	Ледогрунт
7	Слабосоленый чистый лед

3.1. Методика подготовки образцов

В настоящей работе были использованы исходные результаты лабораторных испытаний мерзлых грунтов, проведенных в 2016 г. при проектировании подземных резервуаров для захоронения отходов бурения на территории Харасавэйского месторождения [1, 87, 110-112]. Отбор образцов проводился из скважин в пределах трех площадок будущего строительства подземных резервуаров: Север, Центр и Юг [110-112] (рис. 22, 35). Керновый материал был доставлен в Испытательный лабораторный центр ООО «Газпром геотехнологии», где из него режущим кольцом изготовили образцы с соотношением диаметра к высоте порядка 1:2. Показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов определяли методом трехосного сжатия по методике, приведенной в разделе 3.2. Среди всех исходных данных были отобраны результаты испытаний 17 образцов мерзлого грунта с показателями свойств, относящими их к выделенным наиболее распространенным 4 типам грунта (табл. 34). Эти данные обработаны согласно методике, приведенной в разделе 3.2 и использованы в дальнейшем численном моделировании. Среди них было 8 образцов мерзлых суглинков второй и третьей морских террас и салехардской свиты и 9 образцов мерзлых песчаных грунтов казанцевской свиты. Нумерация, состав, строение и свойства используемых в исследовании образцов мерзлых грунтов, а также метод их испытания представлены в табл. 35 и в приложении 2.

Для проведения испытаний методом трехосного сжатия необходимо было изготовить образцы льда цилиндрической формы с высотой 100 мм и диаметром 50 мм. Их формование проводилось в полипропиленовых канализационных трубах диаметром 50 мм и толщиной 1,8 мм, которые были разрезаны на части с высотой 105-110 мм. Каждый получившийся полый цилиндр трубы был скреплен термоклеем с канализационной заглушкой с целью его герметизации. Внешний вид формы для изготовления льда представлен на рис. 39.



Рис. 39. Форма для изготовления образцов искусственного льда

Таблица 35. Ведомость образцов мерзлого грунта

№ образца	№ типа	Геол. индекс	Наименование грунта	Глубина, м	Льдистость за счет вид. лед. вкл, д.ед.	Суммарная льдистость i_{tot} , д.ед.	Плотность грунта ρ , г/см ³	Степень засол. D_{sal} , %.	Методика испытания
ю-6-2	1	mIII ₂₋₃	суглинок тяжелый пылеватый средnezасоленный льдистый	7,0-7,6	0,25	0,48	1,38	0,50	Кинематическое быстрое
с-4-2	1	mIII ₂₋₃	суглинок тяжелый пылеватый средnezасоленный слабольдистый	6,9-7,5	0,09	0,37	1,67	0,59	Кинематическое быстрое
с-7-4	2	m,gmII ₂₋₄	суглинок тяжелый пылеватый сильнозасоленный нельдистый	69,4-70,0	0	0,38	1,85	0,9	Кинематическое быстрое
с-2-6	2	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий пылеватый сильнозасоленный нельдистый	39,4-40,0	0,01	0,31	1,90	0,83	Кинематическое быстрое
с-2-4	3	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабольдистый	21,9-22,5	0	0,4	1,91	0,09	Кинематическое быстрое
с-3-8	3	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабольдистый	29,4-30,0	0	0,38	1,93	0,12	Кинематическое быстрое
с-4-5	3	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный льдистый	18,8-19,4	0	0,41	1,91	0,07	Кинематическое быстрое
с-3-4	4	m,pmIII ₁	песок пылеватый средnezасоленный слабольдистый	14,7-15,3	0	0,37	1,87	0,18	Кинематическое быстрое
ю-6-5	4	m,pmIII ₁	песок пылеватый средnezасоленный льдистый	18,3-18,9	0	0,41	1,90	0,17	Кинематическое быстрое
П-13-1/1,2	1	mIII ₃₋₄	суглинок легкий пылеватый средnezасоленный льдистый	3,4-4,0	0,25	0,64	1,64	0,63	Статические длительные
с-9-12	2	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий пылеватый сильнозасоленный нельдистый	60,0-60,6	0	0,33	1,92	1,04	Статические длительные
с-4-11	2	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий песчанистый сильнозасоленный нельдистый	50,0-50,6	0	0,39	1,95	1,11	Статические длительные
с-1-6	3	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный льдистый	21,8-22,5	0	0,41	1,82	0,09	Статические длительные
с-3-8	3	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабольдистый	29,4-30,0	0	0,38	1,93	0,12	Статические длительные
п-13-2-6/1	4	m,pmIII ₁	песок пылеватый средnezасоленный слабольдистый	21,9-22,5	0	0,39	1,92	0,24	Статические длительные
п-13-1-4	4	m,pmIII ₁	песок пылеватый средnezасоленный слабольдистый	14,7-15,0	0	0,37	1,9	0,22	Статические длительные

Примечание: Номер типа грунта указан в соответствии с табл. 34.

Работы по изготовлению образцов начались с формирования ультрапресного чистого льда. Пластиковые цилиндрические формы были полностью заполнены ультрапресной дегазированной водой и перемещены в морозильную камеру с температурой $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако такой метод изготовления не позволил получить образцы удовлетворительного качества. В результате единовременного замерзания воды образовался лед с большим количеством неровностей, углублений на боковой поверхности и с «торнадообразным» распределением воздушных пузырьков (рис. 40). Первое объясняется увеличением объема воды при ее промерзании, второе – отжатием воздушных включений от фронта промерзания (стенок трубы и свободной поверхности верхнего торца) к центру образца. Такие особенности строения льда не имели ничего общего с пластовым льдом естественного сложения. В связи с этим был проведен поиск оптимального метода изготовления искусственного льда.



Рис. 40. Результаты изготовления ультрапресного чистого льда ошибочным методом

В литературных источниках встречаются различные методы изготовления льда. Многие из них применяются при расчетах ледовой нагрузки на объекты инженерно-хозяйственной деятельности в морях с ледовым покровом. Особенно это актуально в судостроении, например, для оптимизации формы и используемых материалов ледоколов и судов ледового плавания, а также при проектировании шельфовых сооружений и др. Далеко не всегда исследователи могут получить образцы керна из покровного льда морей. Это связано с трудностями его отбора, сезонностью работы, проблемами транспортировки. В связи с этим зачастую исследования проводят на образцах льда, выбуренных/выпиленных из искусственно подготовленных массивов льда больших объемов. В работе [62] приведено подробное описание такого способа подготовки образцов. Намораживание массива льда проводилось в емкостях прямоугольной формы объемом по $0,9 \text{ м}^3$, теплоизолированных с боковых сторон и дна. Между теплоизоляционным материалом и стенками резервуара оставляли воздушный зазор с кабелем, который поддерживал необходимую температуру в емкости. Эта конструкция позволяла избежать роста кристаллов льда с дна и бортов резервуара. Каждый резервуар был разделен по принципу сообщающихся сосудов на два отсека перегородкой, не достигающей до его дна. При этом малый отсек был теплоизолирован со всех сторон, свободная поверхность воды в нем обеспечивала компенсацию напряжений, возникающих в результате кристаллизации воды в большом отсеке. В резервуары заливалась охлажденная до температуры кристаллизации вода необходимой солености, которую в дальнейшем замораживали при температуре $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. В ходе промерзания на поверхность воды специальным устройством распыляли капли воды, часть которых до оседания успевала замерзнуть и превратиться в ядра кристаллизации. Намораживание продолжалось в течение 72 ч. Из подготовленных таким образом массивов льда кольцевым буром выбуривали цилиндрические образцы высотой 100 мм и диаметром 80 мм (рис. 41) [62].



Рис. 41. Выбуривание образцов льда из искусственно сформированного массива льда [50]

Схожая с вышеописанной методикой приведена в работе зарубежных исследователей [80]. Формирование массивов льда проводили в резервуарах высотой 60 см и диаметром 1,2 м, боковые стенки которых были теплоизолированы минеральной ватой. Для предотвращения концентрации напряжений при промерзании воды и поддержания постоянного давления в резервуарах, они были соединены подогреваемыми трубами с водосливом за пределами холодной комнаты. Емкости заполняли горячей водой с температурой $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$, а образовавшиеся на их стенках воздушные пузырьки удаляли. В дальнейшем холодная комната с заполненными водой резервуарами была охлаждена до температуры $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одной из задач рассматриваемой работы было формирование образцов льда с оптической осью, расположенной параллельно поверхности воды. Для этого первый нарост льда удалили, а поверхность воды засеяли через сито снежными кристаллами. Авторы работы утверждают, что оптическая ось внесенных таким образом снежных кристаллов при промерзании медленно становилась горизонтальной. По вертикальному срезу льда проводили проверку расположения его оптической оси, все неподходящие образцы были исключены из исследования. Из 60 см массива льда для изготовления образцов использовались нижние 50 см. Они были разделены на маленькие блоки, из которых на токарном станке при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ вырезали цилиндрические образцы необходимого размера. Каждый готовый образец льда хранился в герметичном пакете для снижения его сублимации [80].

Вопросами подготовки искусственных образцов льда и изучением его механических свойств занимаются также в связи с необходимостью моделирования процессов, протекающих во внешней части Солнечной системы. Эти исследования имеют большое значение, так как лед является одним из важнейших компонентов внешних планет и их спутников, чья тектоническая активность, эволюционные процессы в значительной степени зависят от реологических свойств льда. В работе [78] приведен способ формирования искусственного льда для дальнейшего испытания в условиях трехосного сжатия при температуре от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ и боковом давлении от 0,1 МПа до 350 МПа. Исследования проведены под эгидой Министерства энергетики США и при поддержке NASA. Для изготовления образцов лед, созданный из дистиллированной воды, раздробили в измельчителе и просеяли через сита от 0,4 до 1 мм. Далее его поместили в стальные цилиндрические формы с торцевыми заглушками, вакуумировали и насытили дегазированной (кипячением), дистиллированной и охлажденной водой. Затем теплоизолировали боковые поверхности образцов таким образом, чтобы замораживание происходило снизу вверх, а напряжения в результате кристаллизации воды концентрировались в верхней части формы, где отсутствуют измельченные кристаллы

льда. Готовые образцы льда удаляли из форм с помощью легкого подогрева и выдавливания из труб.

Изучение физико-механических свойств искусственно подготовленного льда часто используется при моделировании динамики ледников. Для этих целей широко применяется методика формирования образцов льда, основанная на промораживании насыщенного водой дробленого льда с возможностью оттока излишек воды. Дренаж предотвращает возникновение неровностей в образце в результате увеличения его объема при замерзании. Этот способ подготовки образцов льда использовался в работах [76, 77, 81] с целью изучения механического поведения искусственного льда под нагрузкой в условиях трехосного сжатия. Подробное описание рассматриваемой методики приведено в диссертации L.U. Arenson [115]. Для формирования образцов использовали измельченный лед, изготовленный из дистиллированной воды и грунтовые частицы, отобранные со склона ледника Мурагл в Швейцарии. Грунтовые частицы предварительно охладили до температуры льда и смешали их в нужной пропорции с дробленным льдом. Полученную смесь поместили в форму (2) и утрамбовали до нужной плотности. Далее провели насыщение образца снизу-вверх дегазированной охлажденной (до 0 °С) водой из бака (8). Для этого в форме (2) создали вакуум и осторожно открыли кран (7). Насыщение ледогрунтовой смеси таким образом продолжалось примерно 30 минут. Вся установка подготовки образцов была предварительно теплоизолирована и помещена в холодильную комнату. На верхней части формы (2) отсутствовала теплоизоляция, это было необходимо для того, чтобы промерзание происходило горизонтально сверху-вниз. Уровень воды в баке (8) и форме (2) устанавливали одинаковым в начале процесса замораживания. Открытая сверху форма находилась в морозильной камере в течение 72 ч. Дренаж лишней воды в ходе замерзания образца проходил через отверстие в основании (3), трубу (5) в бак (8). Температура первых двух поддерживалась постоянной около +5 °С для предотвращения замерзания вытесняемого избытка воды. С этой же целью в баке (8) был установлен вращающийся винт. После окончания промораживания форму (2) демонтировали из установки, разделили на две части и достали образец сформированного льда (рис. 42) [115].

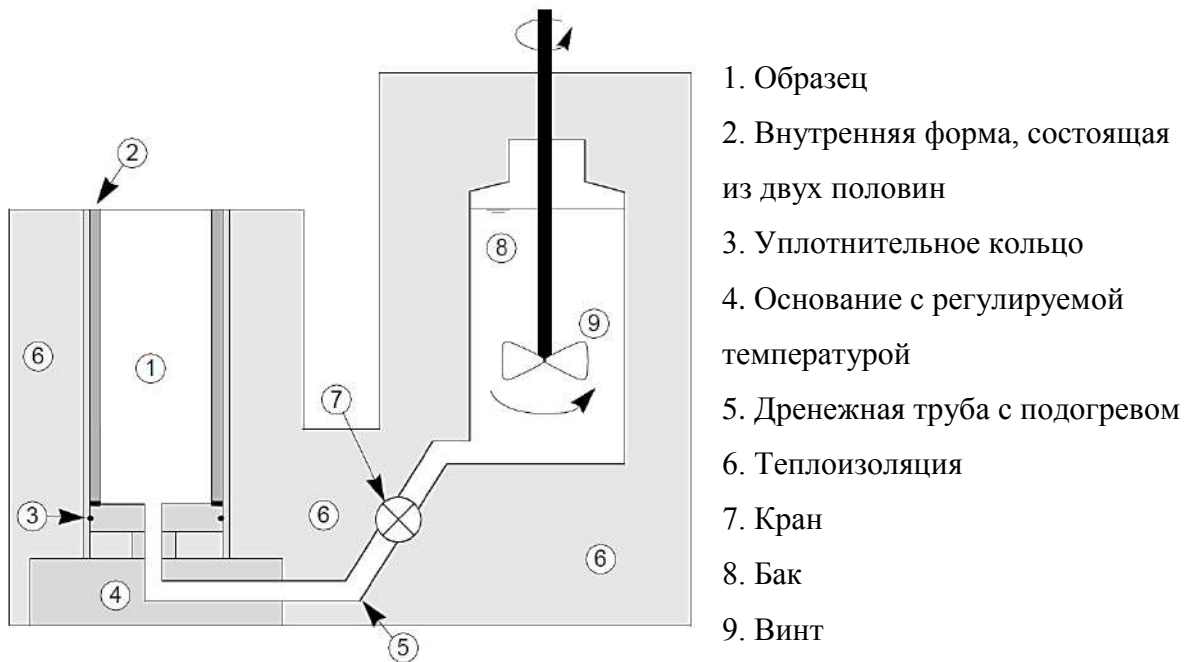


Рис. 42. Установка подготовки образцов искусственного льда [115]

Известны также примеры применения искусственного льда для изучения физико-механических свойств подземных льдов в связи с использованием их в качестве оснований зданий и сооружений. В работе [2] представлены результаты изучения зависимости физико-механических свойств искусственно изготовленного льда от его температуры методом одноосного сжатия. Образцы льда формировали методом послойного намораживания охлажденной пресной водой в металлических трубах. В них добавляли различный объем воды в зависимости от требуемой толщины слоя. Образцы льда изготавливали при постоянной температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдерживали в морозильной камере не менее суток. Для обоснования выбора толщины единичного слоя проведены кратковременные одноосные испытания образцов льда с разной толщиной намороженных слоев – 1, 2, 3, 4, 4, 5, 10, 15, 20, 60 мм. По результатам выявлено, что с увеличением толщины единичного слоя снижается прочность льда. Так, наибольшее значение прочности льда (выше 7 МПа) характерно для образцов с толщиной слоя менее 2 мм. При увеличении толщины слоя до 20-60 мм прочность льда падает более чем в 2 раза (рис. 43) [2]. По мнению автора настоящей работы, снижение прочности с увеличением толщины слоя льда произошло в результате увеличения количества образующихся неравномерностей и дефектов в образце льда за счет концентрации напряжений при промерзании большего количества воды.

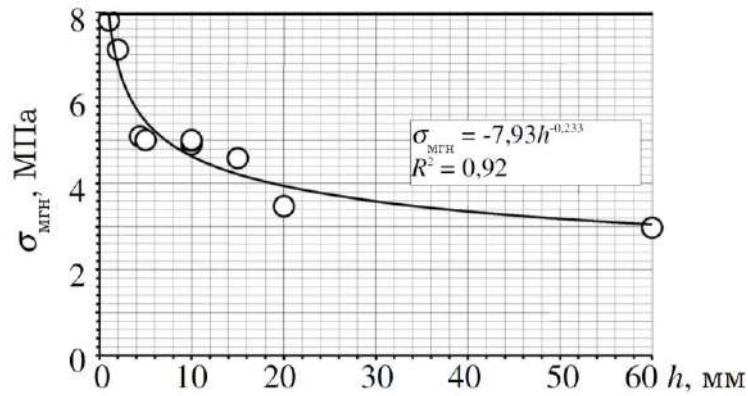


Рис. 43. Зависимость условно-мгновенной прочности льда на одноосное сжатие от толщины единичного намороженного слоя при температуре -3°C [2]

Многообразие методов формирования образцов искусственного льда позволяет изготавливать его с требуемыми структурными и текстурными особенностями строения. Это делает возможным изучение физико-механических свойств льда в различных отраслях науки. Однако для целей настоящего исследования большинство рассмотренных методов являются излишне трудоемкими, так как требуют специального оборудования для их реализации. Среди них отдельно можно выделить последний – метод послойного намораживания льда [2], который, по мнению автора, позволяет без дополнительных приборов сформировать однородные и равномерные образцы с заданными свойствами. Он и был выбран для изготовления трех видов льда в настоящей работе.

Формирование образцов льда методом послойного намораживания началось с выбора толщины единичного намораживаемого слоя. С этой целью в подготовленные пластиковые трубы (высотой 100 мм и внутренним диаметром 50 мм) последовательно добавляли различный объем воды с равными промежутками времени. Изготовление образцов проводилось при температуре -20°C . При добавлении в образец 8 мл воды и более на его поверхности образовывалась неровность, характерный горбик. То же было отмечено при объеме разового залива воды от 8 мл до 2 мл. Кроме того, при каждом новом добавлении и промерзании указанных порций воды неровности на поверхности образца распределялись случайным образом. Это значит, что не получилось бы сформировать одинаковые между собой образцы льда, а значит, сравнение результатов их испытаний имело бы высокую погрешность.

Иная картина наблюдалась при разовом добавлении в образец 2 мл воды, что соответствовало толщине единичного намораживаемого слоя в среднем от 1 мм до 3 мм. В этом случае при промерзании воды образовывался относительно ровный и гладкий лед, который полностью покрывал дно формы, а поверхность образца оставалась недеформированной. При дальнейшем уменьшении толщины единичного

намораживаемого слоя менее 1 мм (добавлении менее 2 мл воды) заливаемого объема воды не хватало, чтобы полностью заполнить дно формы и образца – вода не растекалась по поверхности, а скапливалась в отдельных ее частях (рис. 44). Таким образом, для формирования однородных образцов льда выбрана толщина единичного слоя 1-3 мм с добавлением воды по 2 мл.



а)



б)

Рис. 44. Подбор толщины намораживаемого слоя при формировании искусственных образцов льда: а) при единоразовом добавлении менее 2 мл воды б) при единоразовом добавлении 2 мл воды (толщина слоя 1-3 мм)

Кроме того, в ходе подбора толщины единичного слоя льда замерялось время, достаточное для полного промораживания соответствующего объема воды. Для промерзания единичного слоя толщиной 1-3 мм при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ хватало 15-20 мин.

Формирование ультрапресного чистого льда методом послойного намораживания проводили следующим образом. На подготовительном этапе трубы (рис. 39) были перемещены в морозильную камеру с температурой $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, где их охлаждали в течение непродолжительного времени. Ультрапресная вода для изготовления образцов льда была

дегазирована и охлаждена до температуры начала замерзания около 0 °С. Послойное намораживание образца льда начиналось с добавления в форму увеличенной первой порции воды 6 мл. Для полного промерзания первой порции воды образец выдерживали в морозильной камере около 1 ч. Затем в форму каждые 15-20 мин с помощью мерной пипетки добавляли по 2 мл воды, которая при промерзании образовывала слой льда толщиной 1-3 мм. При заливке каждой новой порции воды формы не вынимались из морозильной камеры для снижения теплового воздействия на них. В среднем, формирование образцов высотой около 100 мм занимало 5 дней. Полностью заполненные льдом формы оставляли в морозильной камере еще на сутки (рис. 45).



Рис. 45. Готовые образцы чистого льда в формировочных трубах

После завершения формирования образцов льда необходимо было извлечь их из пластиковых труб. В первую очередь от каждой формы отделили приклеенную ранее канализационную заглушку. Затем боковую поверхность пластиковых труб аккуратно нагревали, лед слегка подплавлялся и легко выталкивался из формы. Следует отметить, что при выполнении указанных действий было испорчено несколько образцов льда. Дело в том, что при резком увеличении температуры лед подвергается быстрому тепловому расширению, за счет чего в нем возникают значительные напряжения. Их разгрузка приводит к образованию трещин во льде. Ошибка заключалась в том, что нагревание готовых образцов льда выполняли при температуре -20 °С, это привело к развитию в них крупных трещин. В связи с очевидным снижением прочности такой лед был исключен из испытаний. Для предотвращения растрескивания образцов льда их отрицательная температура была плавно повышена до -4÷-5 °С. Дальнейший нагрев льда для его изъятия из форм проводили медленно, через перчатки, при температуре в помещении -5 °С.

Таким образом, методом послойного намораживания с толщиной слоев 1-3 мм удалось получить ровные, прозрачные образцы льда. Общее количество подготовленных образцов ультрачистого льда составило 18 штук (рис.46).



Рис. 46. Пример образцов ультрачистого льда, сформированных методом послойного намораживания с толщиной слоев 1-3 мм

Успешный опыт применения метода послойного намораживания ультрапресного чистого льда позволил распространить его на формирование образцов ледогрунта и слабосоленого чистого льда. За основу первого был принят распространенный на исследуемой территории ледогрунт с льдистостью около 80% и чередованием чистого льда и ледогрунта с пылеватым песчаным заполнителем (см. раздел 1.4).

Для формирования заданной льдистости и строения ледогрунта изготовлены образцы высотой 100 мм с чередованием чистого льда толщиной около 15-20 мм и льда с пылеватым песком толщиной 15-20 мм. Образцы созданы из ультрапресной дегазированной охлажденной до 0 °С воды и пылеватого песка, отобранного из отложений казанцевской свиты. Грунт был предварительно высушен в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния.

Формирование образцов ледогрунта проведено аналогичным образом – в пластиковые трубы, размещенные в морозильной камере с температурой -20 °С, заливали охлажденную воду объемом 6 мл, ждали ее полного промерзания (около 1 ч) и далее каждые 15-20 мин добавляли следующие порции воды по 2 мл. Таким образом намораживали первый интервал чистого льда высотой около 10 мм (12 мл воды). Затем для формирования интервала ледогрунта при каждом следующем заливе 2 мл воды в образец добавляли по 1 гр абсолютно сухого пылеватого песка. Смесь грунта и охлажденной воды промерзала и образовывался слой толщиной около 1-3 мм. После окончания намораживания интервала ледогрунта высотой 15-20 мм снова формировали интервал чистого льда без добавления грунта и т.д. Таким образом, в готовых образцах ледогрунта высотой 100 мм получилось три интервала ледогрунта с пылеватым песком (один интервал – 24 мл воды и 12 гр грунта), два интервала чистого льда в средней части образца (один интервал – 14 мл воды) и два интервала чистого льда на торцах образца (12 мл воды и 10 мл воды).

Для соблюдения единообразия все образцы ледогрунта формировали одновременно. При этом строго соблюдалось равенство массы грунта и объема воды, добавляемых в каждую из форм. Всего было изготовлено 6 образцов ледогрунта (рис. 47). Полученные образцы имели общую льдистость, равную 75-80%. Извлечение образцов ледогрунта из пластиковых форм выполнено таким же образом, как и образцов чистого льда.

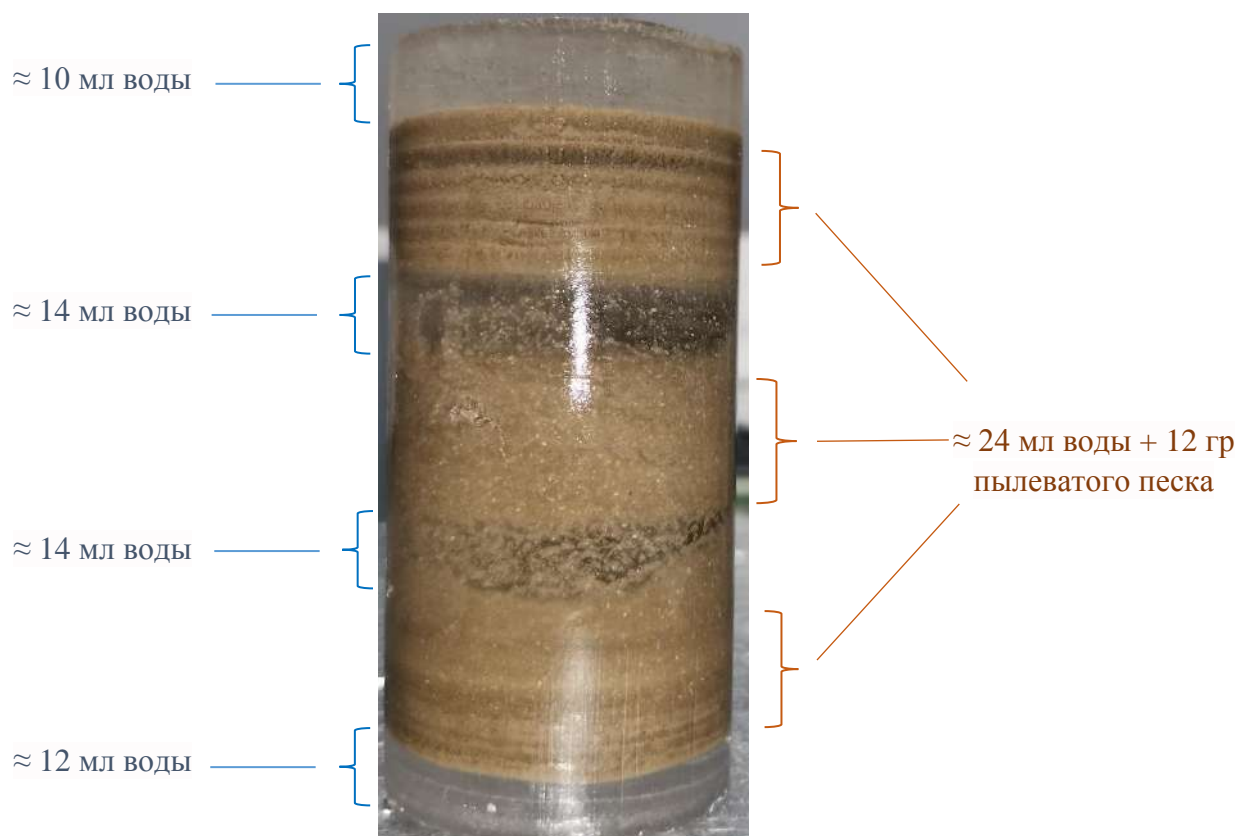


Рис. 47. Пример образцов ледогрунта, сформированных методом послойного намораживания

Для формирования слабосоленого чистого льда использовали дегазированную охлажденную воду хлоридно-натриевого состава с минерализацией 820 мг/л. Такой химический состав выбран исходя из максимального значения минерализации встреченных на территории Харасавэйского месторождения льдов (см. раздел 1.4). Всего было изготовлено 9 образцов слабосоленого чистого льда. Интересно, что они оказались полностью мутными, хотя при намораживании каждый единичный слой льда был настолько прозрачным, что тяжело было понять промерз он или нет (рис. 48).



Рис. 48. Пример образца слабосоленого чистого льда, сформированного методом послойного намораживания

Высота некоторых изготовленных образцов льда оказалась больше 105 мм, что препятствовало их установке в прибор трехосного сжатия. Кроме того, основания большинства образцов не были параллельны друг другу, в результате чего был возможен их перекос во время испытания. Для подготовки формы и высоты образцов использовали ровную металлическую пластину и треугольник. Пластины нагревали до положительной температуры (но невысокой) и прикладывали к торцам образцов льда, которые медленно подтаивали. Затем с помощью уголка и подогретой пластины изменяли форму цилиндра так, чтобы его торцы оказались параллельны друг другу и перпендикулярны образующим боковой поверхности. Таким способом удалось привести образцы льда в форму правильных цилиндров с соотношением диаметра к высоте около 2/1 (рис. 49).

Затем готовые образцы льда устанавливали на (примораживали к) плоские, пластиковые основания и перемещали в морозильную камеру с температурой $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сутки (рис. 49). Перед проведением испытания каждый образец льда выдерживали при температуре испытания в криолаборатории около 4-6 ч. В общей сложности методом послойного намораживания было изготовлено около 34 образцов льда.

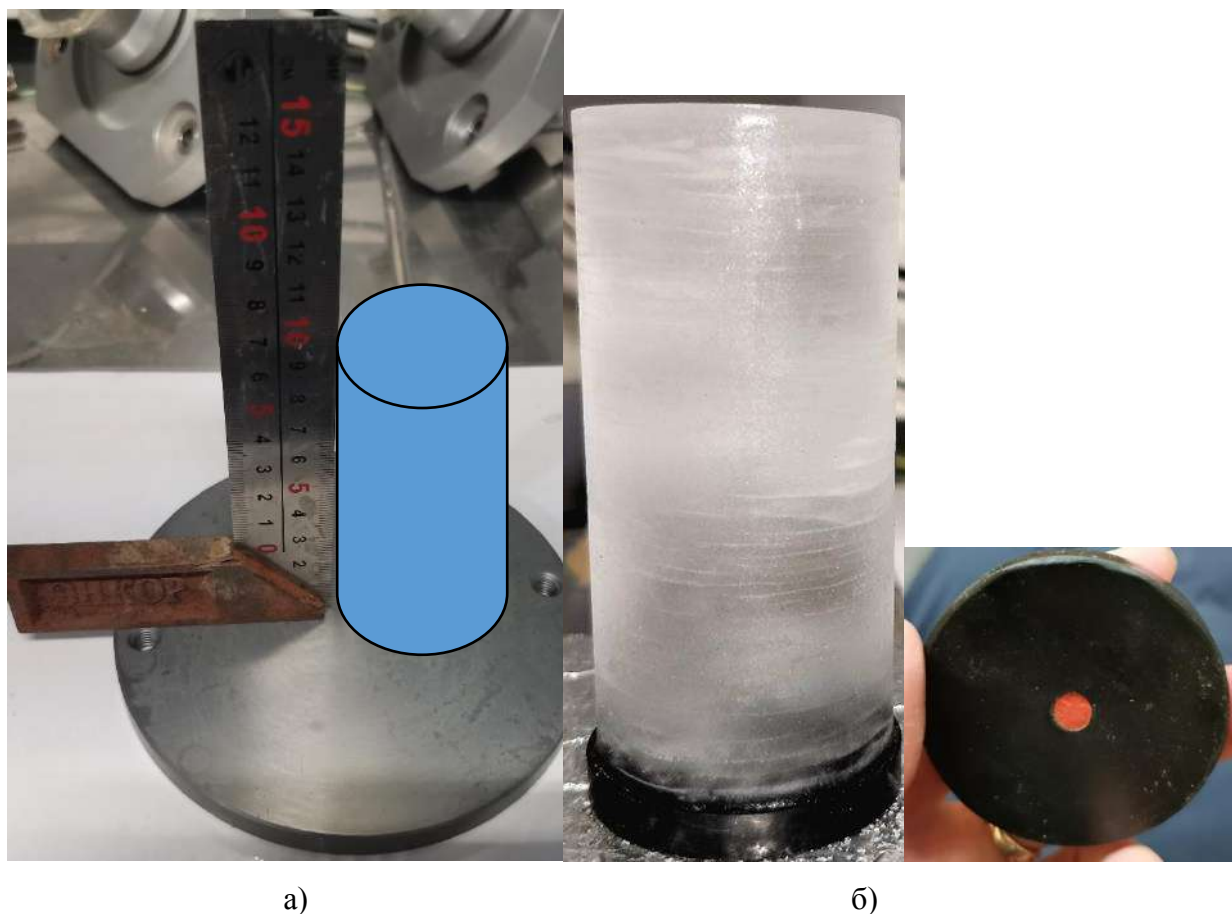


Рис. 49. Схема подготовки образцов льда: а) подготовка образца льда требуемого объема и формы, б) пример установки готового образца льда на основание

Проведение испытаний методом трехосного сжатия

Испытания мерзлых грунтов, в том числе льда, проводили в мобильной криолаборатории испытательного лабораторного центра ООО «Газпром геотехнологии». Для создания отрицательной температуры помещение оборудовано двумя морозильными установками, которые позволяют поддерживать температуру воздуха от 0 °С до -25 °С.

Криолабораторию предварительно охлаждали до рабочей температуры -5 °С и поддерживали ее еще в течение двух суток до начала испытаний трехосного сжатия. Это было необходимо для полного остывания всего помещения и оборудования. В связи с тем, что испытания проводились в осенне-зимний период времени, колебания температуры воздуха в криолаборатории были незначительны (рис. 50).

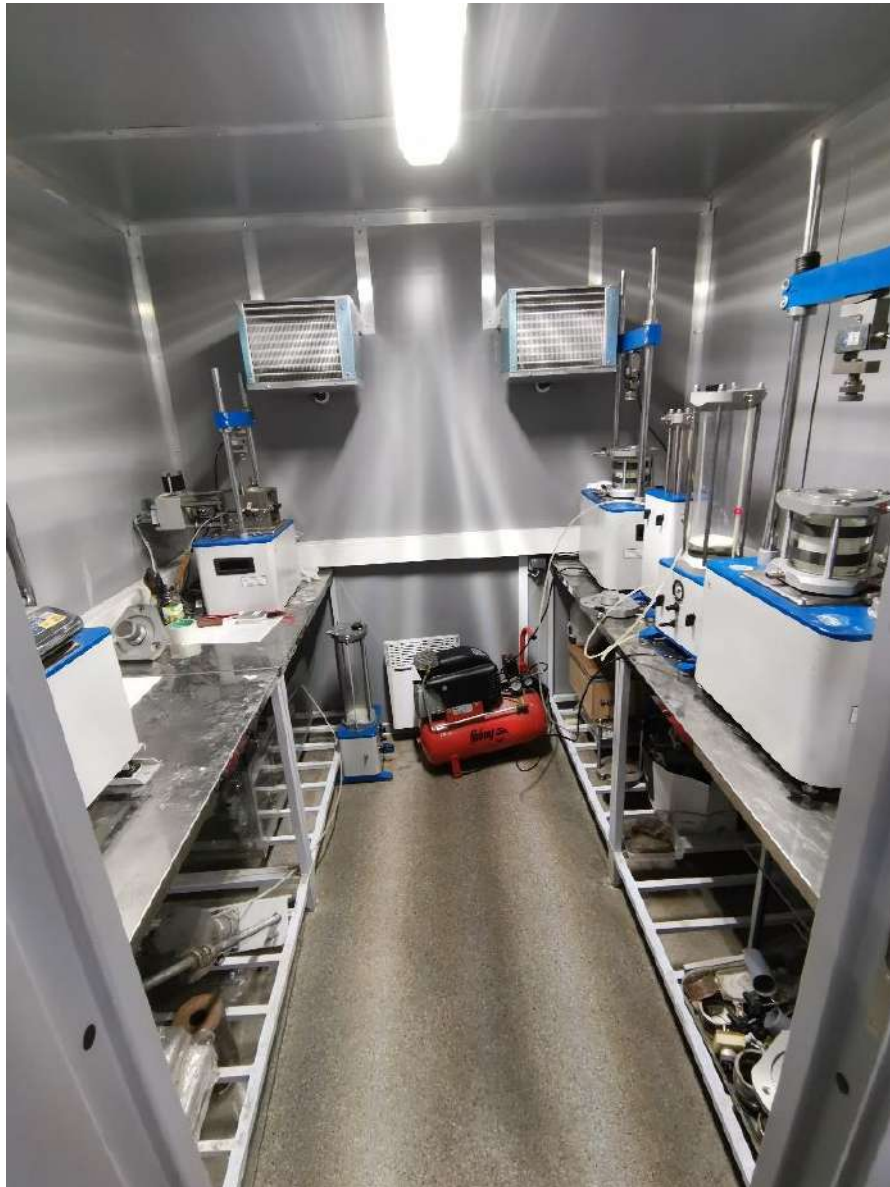


Рис. 50. Криолаборатория

В ходе подготовки образцов отмечено явление сублимации льда. Если открытые образцы льда находились в помещении в течение суток, то можно было наблюдать небольшое уменьшение их объема. При более длительном хранении они значительно изменяли свою форму и объем, что делало их непригодными для испытаний. Открытостоящий образец льда полностью испарялся в течение примерно 1,5 месяцев. Тот же процесс наблюдался и с мерзлыми грунтами, их лед-цемент сублимировал, а сами они рассыпались в руках при прикосновении (рис. 51). Для предотвращения сублимации льда все образцы индивидуально упаковывали в нетканый материал.



Рис.51. Сублимация льда и льда-цемента при длительном открытом хранении образцов

Испытания мерзлых грунтов и льда методом трехосного сжатия выполняли с помощью испытательного комплекса «АСИС» с использованием стабилометра типа Б производства ООО «НПП «Геотек». В качестве рабочей жидкости для передачи бокового давления на образец выбран спиртосодержащий раствор, не замерзающий при отрицательных температурах и не обладающий агрессивным действием по отношению к латексной оболочке для трехосных испытаний (рис. 52).



Рис. 52. Прибор трехосного сжатия производства ООО «НПП «Геотек»

Боковое давление на образец измерялось датчиком давления со стальным корпусом с возможностью определения избыточного давления до 2,5 МПа и дискретностью 0,0025 МПа. Осевые перемещения фиксировались с помощью датчика деформации с дискретностью измерения 0,01 мм. Измерение изменения объема выполнялось с помощью актуатора бокового давления с дискретностью 0,1 мл.

Криолаборатория должна быть оборудована отдельным бесперебойным источником тока, особенно это актуально при проведении длительных испытаний. К сожалению, при проведении настоящих исследований это невозможно было реализовать. В результате непредвиденных отключений электроэнергии несколько длительных экспериментов были завершены раньше времени, что увеличило общую продолжительность исследования.

В ходе проведения испытаний льда возникла проблема с изоляцией образца от спиртосодержащей жидкости. Латексная оболочка в ходе передачи бокового давления вдавливалась в зазоры между пьедесталом и образцом, верхним штампом и образцом. С увеличением давления оболочка повреждалась, происходила разгерметизация камеры и попадание спиртосодержащей жидкости на образец. Таким образом было испорчено несколько образцов чистого льда. Для решения этой проблемы зазоры между образцом и верхним штампом, образцом и пьедесталом были перекрыты клейкой лентой. Она наклеивалась таким образом, чтобы образец свободно устанавливался в камеру без дополнительной регулировки (рис. 53).



Рис. 53. Подготовленные пьедестал и верхний штамп для испытаний льда методом трехосного сжатия

3.2. Методика испытаний методом трехосного сжатия

За всю историю развития механики мерзлых грунтов накопился достаточно большой объем данных по экспериментальным исследованиям их физико-механических свойств. Среди методов их определения были: испытания на одноосное сжатие и растяжение, срез по поверхности смерзания [16, 69-71], акустические методы [36, 37], испытания шариковым штампом, испытания трехосным сжатием [19, 22, 69, 71] и др. Последний метод в отечественной практике в основном не применялся для изучения прочности и деформируемости льда. Хотя из всех указанных именно он наилучшим образом подходит для целей исследования механического поведения мерзлых грунтов и льда в массиве. Метод трехосного сжатия позволяет оценить влияние среднего напряжения на сопротивление сдвигу, интенсивность объемных и сдвиговых деформаций. Кроме того, с помощью испытаний методом трехосного сжатия возможно изучение зависимости длительной прочности мерзлого грунта от величины действующего среднего напряжения. В связи с этим, для получения показателей физико-механических свойств мерзлого грунта, в том числе льда, был выбран метод трехосного сжатия.

Программа испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия в настоящем исследовании была разработана на основании внутренних стандартов ООО «Газпром геотехнологии», ГОСТ 12248.9-2020 [24] и личных пробных испытаний образцов. Кроме того, схемы испытания были подобраны исходя из необходимости получения входных параметров для расширенной упруго-вязко-пластической модели Друкера-Прагера (модель материала Extended Drucker-Prager), которая была использована для численного моделирования НДС многолетнемерзлых грунтовых толщ в программном комплексе Simulia Abaqus/Standart (см. главу 4). Ниже приведены основные принципы используемой методики трехосных испытаний мерзлых грунтов.

В целом развивающуюся при трехосном сжатии мерзлых грунтов общую деформацию сдвига можно разделить на условно-мгновенную деформацию γ^0 и деформацию ползучести γ^{ct} . Последняя протекает во времени и включает в себя упруговязкую γ^{ev} и пластичновязкую γ^{pv} составляющие. Чем дольше идут испытания, тем более ярко проявляются в мерзлом грунте его реологические свойства и увеличивается доля деформаций γ^{ct} . Соответственно, для изучения механического поведения мерзлых грунтов во времени проводят длительные испытания, которые могут продолжаться от нескольких часов до нескольких дней, суток, а иногда и месяцев. При снижении времени проведения испытаний доля деформаций γ^{ct} снижается и увеличивается γ^0 [55]. Испытания можно подразделить на два вида – быстрые, цель которых изучение поведения мерзлых грунтов при условно-мгновенном нагружении и длительные, в течение которых развивается γ^{ct} и исследуется реологическое поведение грунтов. Для полного описания механического поведения мерзлого грунта, в том числе льда, под нагрузкой в настоящей работе проведены два вышеуказанных вида испытаний.

Быстрые испытания методом трехосного сжатия реализовывали кинематическим нагружением, которое подразумевает передачу давления на образец с постоянной во времени скоростью деформирования. Длительные испытания проводили статическим нагружением с поддержанием постоянного уровня напряжения на каждой из ступеней.

Быстрые кинематические испытания трехосного сжатия мерзлых грунтов, в том числе льда, проводили по неконсолидированно-недренированной схеме при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ (σ_1 – осевое напряжение; $\sigma_2 = \sigma_3$ – боковое напряжение). Нагружение выполнялось в кинематическом режиме при постоянной скорости деформирования и сопровождалось измерением вертикальной нагрузки. Боковое давление поддерживали постоянным в течение всего эксперимента и задавали исходя из глубины залегания исследуемого типа грунта по формуле:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \gamma * H, \quad (1)$$

где γ – удельный вес мерзлого грунта, кН/м^3 ; H – глубина залегания исследуемого типа грунта, м.

Всестороннее давление увеличивалось ступенями по 50 кПа, предварительное уплотнение происходило в течение 20 секунд.

Испытания вели до разрушения, которое фиксировали по достижению пиковой прочности образца. В ходе экспериментов каждые три секунды регистрировали осевые напряжения, абсолютные продольные и объемные деформации образца. Все испытания проводили при температуре $-5\text{ }^\circ\text{C}$.

Быстрые испытания 9 образцов выделенных типов мерзлых песчаных и суглинистых грунтов методом трехосного сжатия выполнены при постоянной скорости деформирования 1 мм/мин. Всестороннее давление при испытании мерзлых грунтов составляло 0,2 МПа.

Быстрые испытания 11 образцов искусственного льда методом трехосного сжатия проводили при разных скоростях деформирования. Так, ультрапресный чистый лед испытывали со следующими постоянными скоростями: 4 мм/мин ($6,7 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$), 0,5 мм/мин ($8 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$), 0,1 мм/мин ($2 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$) при всестороннем давлении 0,3 МПа. Ледогрунт испытывали со скоростями деформирования: 4 мм/мин ($6,7 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$), 0,1 мм/мин ($2 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$) при всестороннем давлении 0,3 МПа. Испытания слабосоленого чистого льда проводили со скоростью деформирования 4 мм/мин ($6,7 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$), 0,1 мм/мин ($2 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$) при всестороннем давлении 0,3 МПа. Испытания ультрапресного чистого льда, ледогрунта и слабосоленого чистого льда при скорости деформирования 1 мм/мин ($2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) проведены при значении всестороннего давления 0,4 МПа. Результаты последних использовали в качестве входных параметров для дальнейшего математического моделирования изменения НДС грунтовых толщ, остальные – для исследования влияния скорости деформирования на механическое поведение льда в условиях трехосного сжатия.

Сведения о схемах быстрых испытаний всех типов мерзлых грунтов, в том числе льда, методом трехосного сжатия приведены в табл. 36.

Таблица 36. Схемы быстрых кинематических испытаний мерзлых грунтов и льда методом трехосного сжатия

№ типа грунта	№ образца	Геол. индекс	Название	Всестороннее давление, МПа	Скорость деформирования, мм/мин	Скорость деформирования, с ⁻¹	Температура испытания, °С
1	ю-6-2, с-4-2	mIII ₂₋₃	среднезасоленный слабо- и льдистый суглинок	0,2	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
2	с-7-4, с-2-6	m,gmII ₂₋₄	сильнозасоленный нельдистый суглинок	0,2	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
3	с-2-4, с-3-8, с-4-5	m,pmIII ₁	слабозасоленный слабо- и льдистый мерзлый песок	0,2	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
4	с-3-4, ю-6-5	m,pmIII ₁	среднезасоленный слабо- и льдистый мерзлый песок	0,2	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
5	1	-	ультрапресный чистый лед	0,3	4 мм/мин	$6,7 \times 10^{-4}$ с ⁻¹	-5 °С
5	2	-	ультрапресный чистый лед	0,3	4 мм/мин	$6,7 \times 10^{-4}$ с ⁻¹	-5 °С
5	28	-	ультрапресный чистый лед	0,4	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
5	3	-	ультрапресный чистый лед	0,3	0,5 мм/мин	8×10^{-5} с ⁻¹	-5 °С
5	31	-	ультрапресный чистый лед	0,3	0,1 мм/мин	2×10^{-5} с ⁻¹	-5 °С
6	21	-	ледогрунт	0,3	4 мм/мин	$6,7 \times 10^{-4}$ с ⁻¹	-5 °С
7	26	-	ледогрунт	0,4	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
8	25	-	ледогрунт	0,3	0,1 мм/мин	2×10^{-5} с ⁻¹	-5 °С
7	32	-	слабосоленный чистый лед	0,3	4 мм/мин	$6,7 \times 10^{-4}$ с ⁻¹	-5 °С
7	29	-	слабосоленный чистый лед	0,4	1 мм/мин	2×10^{-4} с ⁻¹	-5 °С
7	34	-	слабосоленный чистый лед	0,3	0,1 мм/мин	2×10^{-5} с ⁻¹	-5 °С

Примечание 1. номер типа грунта указан в соответствии с табл. 34.

Примечание 2: данные по составу, строению и свойствам образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 раздела 3.1 и приложении 4.

Выбор определяемых по результатам испытаний показателей физико-механических свойств мерзлых грунтов был обусловлен требуемыми входными параметрами для расширенной модели Друкера-Прагера, применявшейся в дальнейшем при численном моделировании изменения НДС грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров. Так, по результатам быстрых кинематических испытаний вычислялись следующие показатели: сопротивление сдвигу, модуль общей деформации, коэффициент относительного поперечного расширения, угол дилатансии и параметры закона пластического течения расширенной модели Друкера-Прагера (см. ниже).

Соппротивление сдвигу мерзлых грунтов находили по пиковому значению девиатора нагрузки в случае хрупкого разрушения образца или по значению девиатора нагрузки, соответствующему 20% относительной продольной деформации образца.

Модуль общей деформации и коэффициент относительного поперечного расширения вычисляли в диапазоне от начала девиаторного нагружения до момента разрушения образца.

Угол дилатансии определяли по графику зависимости относительных объемных деформаций от относительных осевых деформаций в точке, которая соответствует пиковой прочности мерзлых грунтов или на участке наибольшего наклона графика (рис. 54).

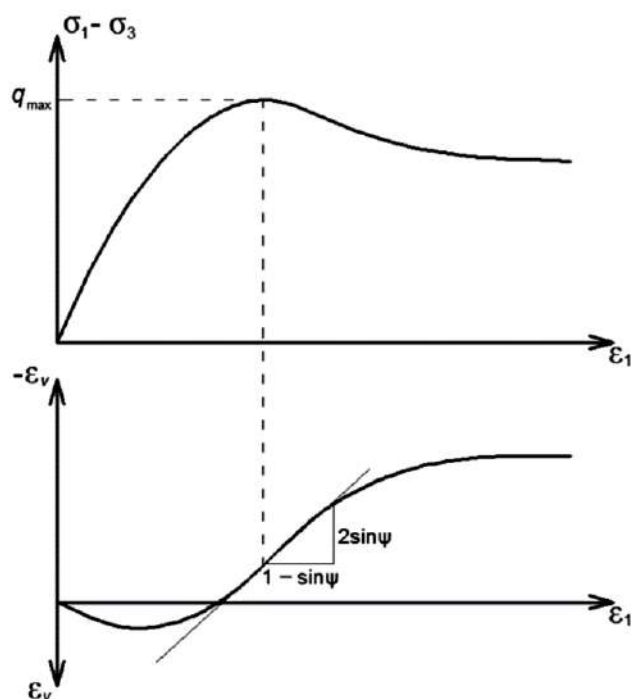


Рис. 54. Графическое определение угла дилатансии [23]

Параметры закона пластического течения расширенной модели Друкера-Прагера находили по графику зависимости интенсивности касательных напряжений $q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$ от относительной деформации сдвига. По нему фиксировались две точки: первая, которая соответствует началу пластического деформирования образца, и вторая, которая соответствует моменту разрушения образца. В этих точках определяли значение интенсивности касательных напряжений и величину пластических деформаций.

Длительные статические испытания трехосным сжатием мерзлых грунтов, в том числе льда, проводили по неконсолидированно-недренированной схеме при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ (σ_1 – изменяющееся осевое напряжение; $\sigma_2 = \sigma_3$ – боковое напряжение). Всестороннее давление увеличивалось ступенями по 30 кПа в течение около 15-30 мин, предварительное

уплотнение происходило в течение 20 с. Осевую нагрузку σ_1 прикладывали ступенями с интервалами от 18 до 24 ч. Всестороннее давление задавали исходя из напряженного состояния многолетнемерзлой грунтовой (см. выше). Испытания проводили с поддержанием постоянного осевого напряжения σ_1 на каждой из ступеней и постоянного всестороннего давления σ_3 в течение всего эксперимента. В ходе испытаний каждые три секунды регистрировали осевые напряжения, абсолютные продольные и объемные деформации образца. Испытания всех образцов проводили при температуре $-5\text{ }^\circ\text{C}$.

Длительные испытания 4-х выделенных типов мерзлых песчаных и суглинистых грунтов проводили при всесторонних давлениях 0,2 МПа и 0,4 МПа. Осевое напряжение увеличивали ступенями на величину примерно 10% от значения условно-мгновенной прочности, полученной по быстрым испытаниям данного типа грунта при том же значении всестороннего давления. Таким образом, значение осевого давления на ступенях рассчитывалось по формуле:

$$\sigma_{1n} = 10\% * \sigma_{сж1} * n, \quad (2)$$

где σ_{1n} – значение осевого напряжения на ступени n , МПа; $\sigma_{сж1}$ – предельное осевое напряжение по быстрым испытаниям при том же значении всестороннего давления, МПа; n – номер ступени нагружения.

Каждая ступень осевой нагрузки при испытаниях трехосным сжатием мерзлых грунтов выдерживалась в течение 24 ч. Испытания продолжались до перехода в стадию незатухающего течения или до достижения образцом уровня относительных продольных деформаций 20%. Всего для каждого типа грунта было проведено по два испытания при всесторонних давлениях 0,2 и 0,4 МПа. Результаты были использованы для построения критериальной поверхности текучести в расширенной модели Друкера-Прагера (см. ниже).

Длительные испытания трех типов льда проводили при всесторонних давлениях 0,1 МПа, 0,3 МПа и 0,5 МПа.

В первую очередь необходимо было установить шаг увеличения осевого напряжения. Это требовалось, так как предельная условно-мгновенная прочность льда по быстрым испытаниям оказалась очень высока (5-8 МПа и более), и при увеличении осевого давления с шагом 10% от этих значений, лед практически сразу бы подвергся пластично-вязкому течению с высокой скоростью. Увеличение осевой нагрузки с шагом 20% от всестороннего давления, как рекомендуется в ГОСТ Р 59597-2021 [28], напротив, сильно затянуло бы проведение испытаний. Так, например, для испытаний льда при всестороннем давлении 0,1 МПа величина шага нагрузки составила бы 0,02 МПа, и на испытание одного образца понадобилось бы около месяца.

Для выбора шага увеличения осевой нагрузки проведены пробные испытания ультрапресного чистого льда. При испытании первого образца № 1а при $\sigma_3 = 0,1$ МПа увеличение осевой нагрузки происходило с шагом 0,1 МПа, что соответствовало 100% всестороннего давления 0,1 МПа или 1-2% от значения условно-мгновенной прочности при всестороннем давлении 0,3 МПа. Каждая ступень нагрузки выдерживалась в течение 18 ч. Остальные параметры задавались идентичными условиям проведения испытаний мерзлых грунтов.

По результатам испытаний образца № 1а были построены кривые ползучести при разном уровне постоянных напряжений. Из полученных кривых следует, что деформация на всех ступенях протекает с пренебрежимо малой скоростью (красной линией отображен наклон кривой со скоростью 0,01 мм/ч) (рис. 55). Исходя из накопленного опыта и на основании внутренних рекомендаций ООО «Газпром геотехнологии», в длительных испытаниях рекомендуется устанавливать количество ступеней, равное 4-5 и более. В данном случае стадия установившегося течения с постоянной скоростью деформации, которую можно было бы зафиксировать, не была достигнута ни на одной из пяти ступеней нагрузки. Это означает, что при продолжении испытаний до достижения установившегося течения общее количество ступеней составит более 6, что будет соответствовать рекомендациям по их количеству. Отсюда следует, что увеличение осевой нагрузки с шагом 100% (или менее) всестороннего давления при $\sigma_3 = 0,1$ МПа обеспечит необходимые условия проведения испытания и может быть применено в дальнейшем.

Результаты испытания второго пробного образца льда № 1б при увеличении осевой нагрузки 30% от всестороннего давления $\sigma_3 = 0,3$ МПа показали схожую картину. В связи с этим эта величина шага (и менее) была принята в испытаниях при данном всестороннем давлении. Шаг увеличения осевой нагрузки при боковом давлении 0,5 МПа был выбран равным 50% (и менее) от всестороннего давления.

Время выдержки каждой ступени нагрузки было установлено, равное 18 ч.

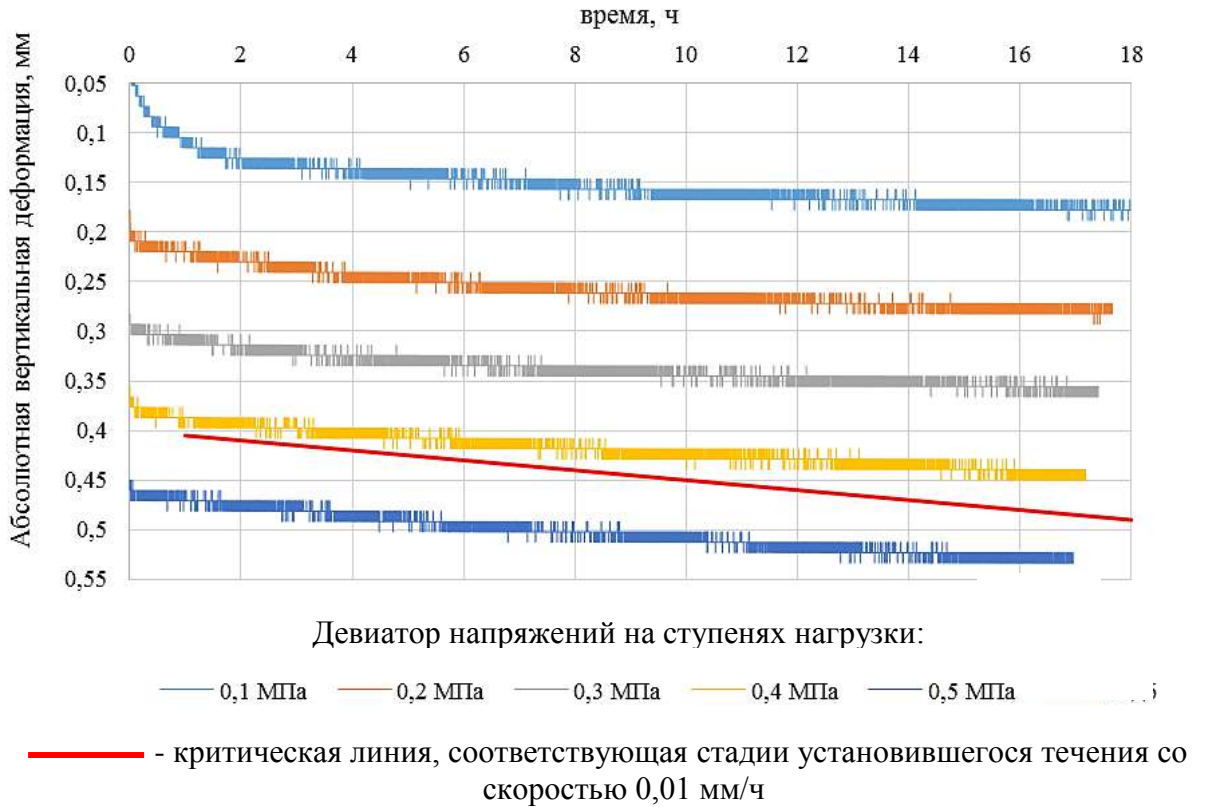


Рис. 55. Кривые ползучести пробного образца № 1а ультрапресного чистого льда при всестороннем давлении 0,1 МПа

Сведение о схемах длительных испытаний трехосным сжатием всех типов мерзлых грунтов, в том числе льда, приведены в табл. 37.

По результатам длительных статических испытаний определяли: предел длительной прочности при соответствующем уровне всестороннего напряжения, угол внутреннего трения для расширенной модели Друкера-Прагера, константы A , m , n , характеризующие ползучесть.

Для определения предела длительной прочности и угла внутреннего трения Друкера-Прагера проводили серию испытаний образцов-близнецов при различных всесторонних давлениях. По результатам испытаний строили графики зависимости осевой деформации от времени (семейство кривых ползучести) и зависимости эквивалентной скорости деформации ползучести от времени для каждой ступени нагрузки. Для каждого образца при соответствующем уровне всестороннего давления снимали значение предела длительной прочности. Предел длительной прочности для мерзлых грунтов определяли на ступени нагрузки, предшествующей переходу в стадию незатухающей ползучести.

Таблица 37. Схемы длительных статических испытаний мерзлого грунта методом
трехосного сжатия

№ типа грунта	№ образца	Геол. индекс	Название	Всестороннее давление, МПа	Шаг увеличения осевой нагрузки, МПа	Время выдержки ступени нагрузки, ч	Температура испытания, °С
1	п-13-1-1/1	mIII ₃₋₄	суглинок средnezасоленный слабо- и льдистый	0,2	0,1	24	-5 °С
1	п-13-1-1/2	mIII ₃₋₄	суглинок средnezасоленный слабо- и льдистый	0,4	0,12	24	-5 °С
2	с-9-12	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий пылеватый сильнозасоленный нельдистый	0,2	0,2	24	-5 °С
2	с-4-11	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий песчанистый сильнозасоленный нельдистый	0,4	0,3	24	-5 °С
3	с-1-6	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный льдистый	0,2	0,3	24	-5 °С
3	с-3-8	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабольдистый	0,4	0,35	24	-5 °С
4	П-13-2-6/1	m,pmIII ₁	песок пылеватый средnezасоленный слабольдистый	0,2	0,3	24	-5 °С
4	п-13-1-4	m,pmIII ₁	песок пылеватый средnezасоленный слабольдистый	0,4	0,3	24	-5 °С
5	4	-	ультрапресный чистый лед	0,5	0,25	18	-5 °С
5	13	-	ультрапресный чистый лед	0,3	0,15	18	-5 °С
5	15	-	ультрапресный чистый лед	0,1	0,1	18	-5 °С
6	12	-	ледогрунт	0,5	0,2	18	-5 °С
6	16	-	ледогрунт	0,3	0,15	18	-5 °С
6	19	-	ледогрунт	0,1	0,1	18	-5 °С
7	23	-	слабосоленный чистый лед	0,5	0,07	18	-5 °С
7	35	-	слабосоленный чистый лед	0,3	0,07	18	-5 °С
7	33	-	слабосоленный чистый лед	0,1	0,07	18	-5 °С

Примечание 1: номер типа грунта указан в соответствии с табл. 34.

Примечание 2: данные по составу, строению и свойствам образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 раздела 3.1 и приложении 4.

Предел длительной прочности льда в целом является достаточно условным понятием. Известно, что течение льда начинается в случае, если время воздействия нагрузки превышает время его релаксации, которое составляет 10^2 - 10^3 с или 2-17 мин. (зависит от температуры) [14, 30]. При этом уровень постоянного напряжения, до достижения которого лед не деформируется, вовсе отсутствует [14, 17, 18, 36, 37]. При любой отличной от нуля нагрузке, лед течет с некоторой скоростью. Однако ее величина зависит от уровня напряжений. При напряжении, не превышающем некоторого предела (в настоящей работе он назван условным пределом длительной прочности), во льду наблюдается течение с пренебрежимо малой скоростью. При большем уровне напряжения лед начинает течь с примерно постоянной скоростью – возникает стадия установившейся ползучести. Многие исследователи отмечают, что деформирование льда с постоянной скоростью при неизменности условий испытаний может протекать долгое время, при этом возможно накопление высокого уровня деформаций [14, 17]. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к внутренней перестройке структуры льда, что способствует течению с еще большей постоянной скоростью. Таким образом, к моменту достижения стадии прогрессирующей ползучести возможно накопление чрезвычайно значительного уровня деформаций. В связи с этим, для описания реологического поведения льда в настоящей работе использовалось понятие условного предела длительной прочности – некоторой критической величины, после достижения которой четко фиксировалось состояние пластично-вязкого течения. Условный предел длительной прочности льда определяли по переходу в стадию установившейся ползучести с постоянной скоростью деформации 0,01 мм/ч и более. При анализе данных в конце каждой ступени (около 4 ч) оценивали наклон кривых ползучести к оси времени, который, как известно, характеризует скорость деформации. Для этого на графики результатов испытаний наносили «критическую линию». Ее наклон соответствовал наклону кривой ползучести в стадии установившегося течения с постоянной скоростью деформации 0,01 мм/ч (рис. 55). Таким образом, если в течение последних часов на ступени нагрузки не наблюдался значительный прирост осевых деформаций, а наклон кривых ползучести был меньше критической линии, то испытание продолжали. В случае установления постоянной скорости деформации 0,01 мм/ч и более за условный предел прочности принимали значение напряжения на предыдущей ступени.

Предел (для льда условный) длительной прочности при разном уровне всестороннего давления использовали для описания внутреннего трения в расширенной модели Друкера - Прагера. По результатам испытаний методом трехосного сжатия для каждого типа льда и грунта строили след поверхности текучести (предельную поверхность) в

координатах q - p , где $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ – девиатор напряжений, а $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – среднее напряжение (рис. 56). Ее угол наклона β характеризовал внутреннее трение в расширенной модели Друкера-Прагера.

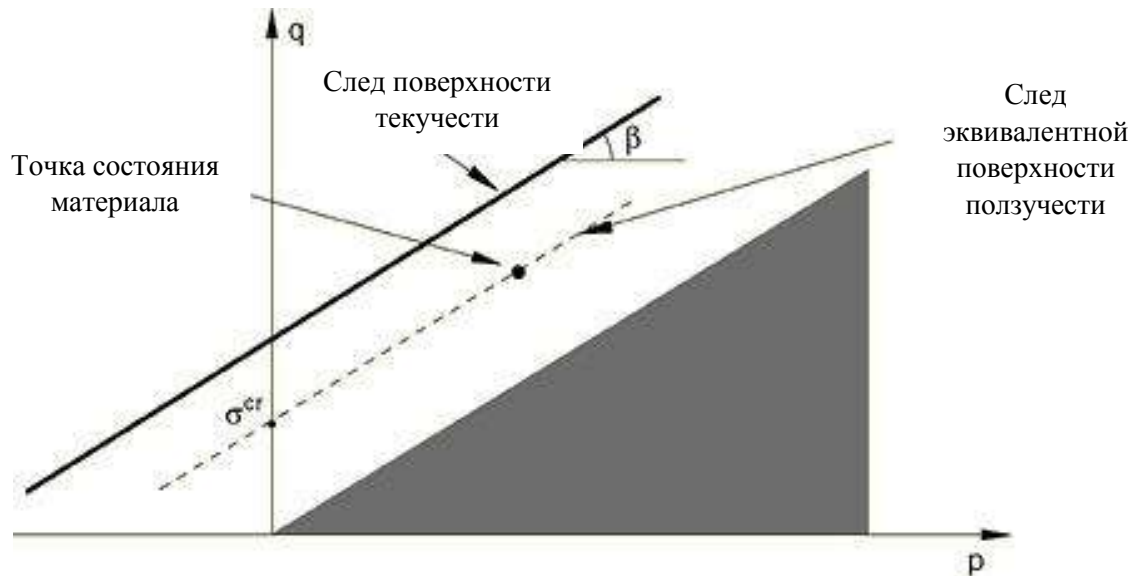


Рис. 56. Следы поверхностей текучести и эквивалентной ползучести в координатной плоскости q - p

Для описания развития процесса ползучести мерзлых грунтов, в том числе льда, введено понятие эквивалентной поверхности ползучести, которая дает меру «интенсивности» ползучести. Эта поверхность определяется как параллельная к поверхности текучести (рис. 56). Такое допущение введено в связи с тем, что эквивалентная поверхность ползучести совпадает с поверхностью текучести при достижении пластического течения материала. Форма эквивалентной поверхности ползучести задана по следующему уравнению:

$$\sigma^{cr} = q - p \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

где σ^{cr} – эквивалентное напряжение ползучести, МПа;

$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ – разность главных напряжений, МПа;

$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – среднее напряжение, МПа;

σ_1, σ_2 и σ_3 – главные действующие напряжения, МПа;

β – угол внутреннего трения в расширенной модели Друкера-Прагера, °.

Параметры уравнения (3) σ^{cr} , q , p определяли на основании обработки испытаний трехосного сжатия мерзлого грунта.

Зависимость скорости деформации ползучести мерзлого грунта от напряжения с течением времени описана степенным законом ползучести, используемым в расширенной модели Друкера-Прагера:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A (\sigma^{cr})^n t^m, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}^{cr}$ – эквивалентная скорость деформации ползучести, c^{-1} ;

σ^{cr} – эквивалентное напряжение ползучести, МПа;

t – время, с;

A, m, n – параметры ползучести.

Эквивалентная скорость деформации ползучести $\dot{\varepsilon}^{cr}$ рассчитана по формуле:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = \Delta \varepsilon^{cr} / \Delta t, \quad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}^{cr}$ – эквивалентная скорость деформации ползучести, c^{-1} ;

ε^{cr} – эквивалентная деформации ползучести, д.ед.;

t – время, с.

Эквивалентная деформация ползучести ε^{cr} по результатам испытаний трехосного сжатия мерзлого грунта рассчитана по формуле:

$$\varepsilon^{cr} = \gamma^{cr} / \sqrt{3}, \quad (6)$$

где ε^{cr} – эквивалентная деформации ползучести, д.ед.;

γ^{cr} – сдвиговая деформация ползучести, д.ед.

Сдвиговая деформация ползучести γ^{cr} определена по результатам испытаний трехосного сжатия по формуле:

$$\gamma^{cr} = \varepsilon_1 - \left(\frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2} \right), \quad (7)$$

где ε_1 – относительная продольная деформация, д.ед.;

ε_v – относительная объемная деформация, д.ед.

На основании уравнений (5), (6), (7) для каждой ступени нагрузки в статических испытаниях трехосного сжатия построены графики распределения точек эквивалентной скорости ползучести $\dot{\varepsilon}^{cr}$ от времени t (рис. 57).

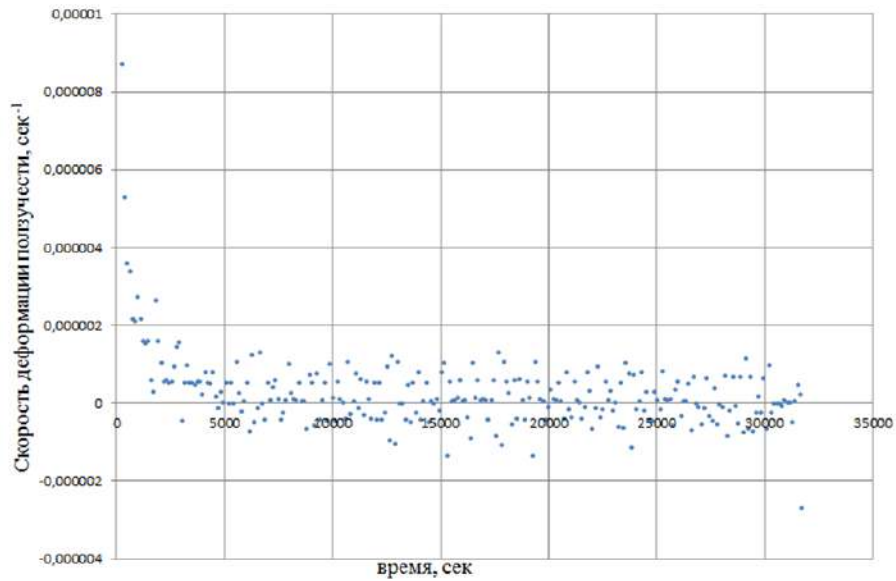


Рис. 57. Пример зависимости эквивалентной скорости деформации ползучести от времени на ступени постоянной нагрузки

Полученное распределение точек описано кривой по степенному закону ползучести (4). Коэффициенты аппроксимирующей кривой A , m , n подбирались так, чтобы коэффициент корреляции составлял около 0,96-1 (рис. 58). Для обработки результатов использовались программы CurveExpert Pro и Microsoft Excel.

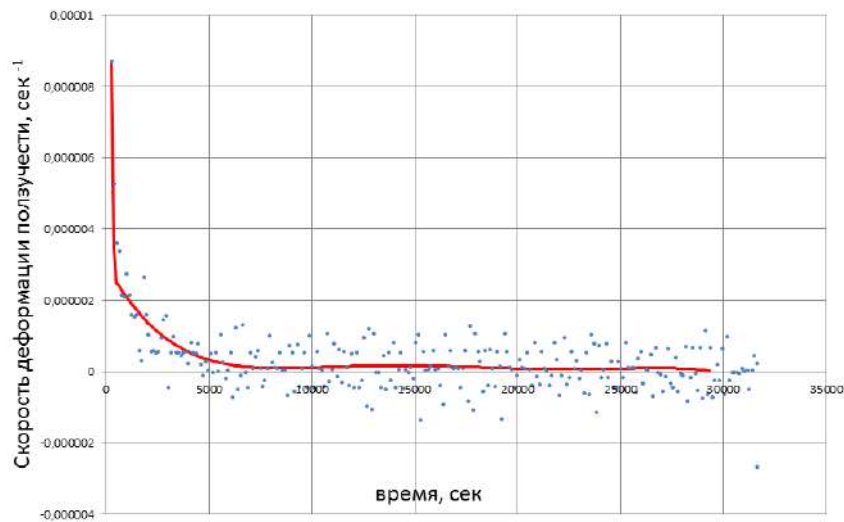


Рис. 58. Пример аппроксимирующей кривой по степенному закону Друкера-Прагера (4)

Подбираемые коэффициенты A , m , n в расширенной модели Друкера-Прагера характеризуют ползучесть материала: A определяет величину предельной скорости деформаций ползучести на интервале при постоянном напряжении; n определяет нелинейную зависимость между начальной скоростью и напряжением; величина m ($-1 < m \leq 0$) определяет скорость «упрочнения» материала.

Всего по рассмотренным методикам испытано более 50 образцов мерзлых песчаных, суглинистых грунтов и льда. Больше половины испытаний были реализованы по

длительной схеме нагружения. Продолжительность одного длительного испытания составляла около 140-210 ч. В общей сложности на проведение лабораторных работ потребовалось 6-7 месяцев.

3.3. Результаты испытаний методом трехосного сжатия

3.3.1 Результаты испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия

Быстрые кинематические испытания

По результатам быстрых испытаний значения сопротивления сдвигу среднесоленых слабо- и льдистых мерзлых суглинков третьей морской террасы и сильносоленых нельдистых суглинков салехардской свиты оказались сопоставимы – 1,47-2,0 МПа. При этом наибольшая сдвиговая прочность отмечена у первых из них – от 1,8 до 2,0 МПа. Для сильносоленых нельдистых суглинков салехардской свиты ее значение в среднем меньше на 20% и составляет 1,47-1,50 МПа (рис. 59).

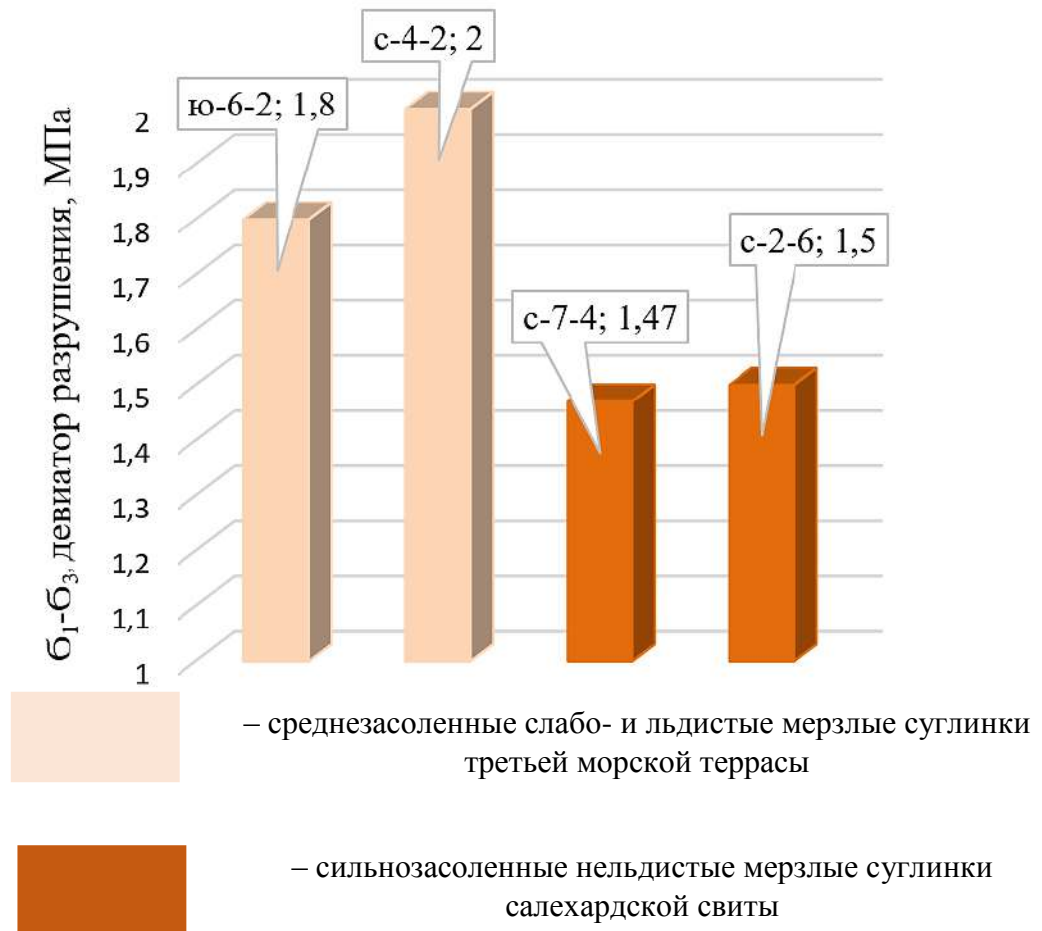


Рис. 59. Девиатор разрушения мерзлых суглинков, МПа

(данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

По результатам трехосного сжатия мерзлых суглинков определено, что они обладают достаточно низкой жесткостью. Так, модуль общей деформации колеблется от 17 МПа до 26 МПа. Наибольшая способность к деформированию отмечается у сильнозасоленных нельдистых суглинков салехардской свиты, модуль их общей деформации составил 17 МПа и 20 МПа (рис. 60).

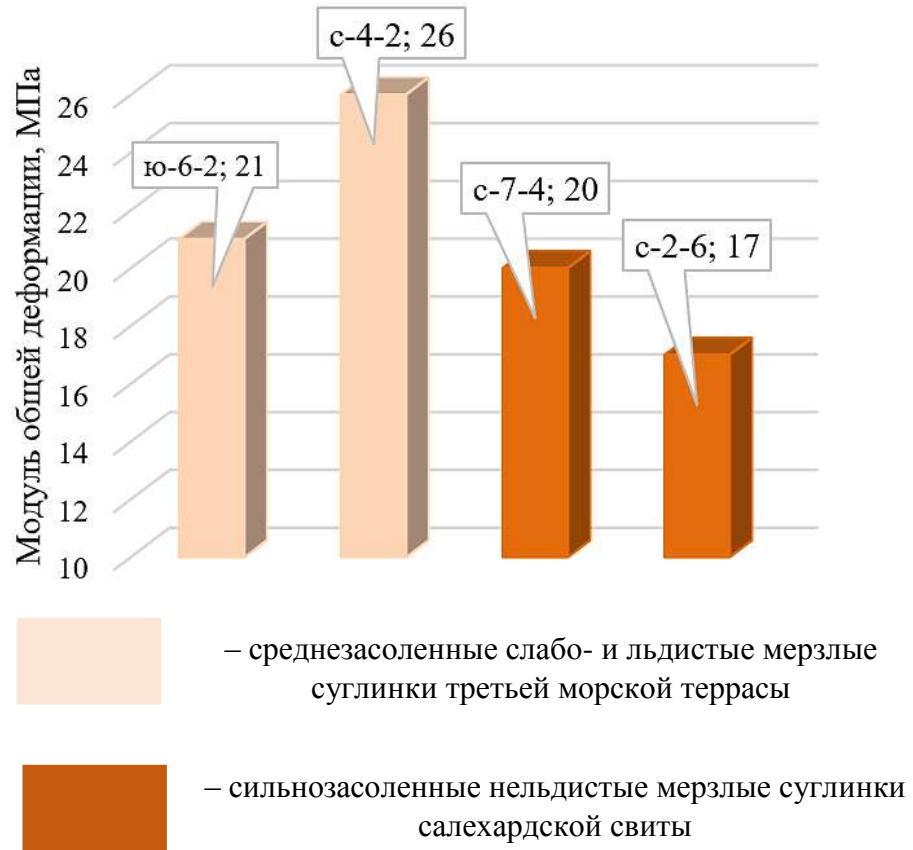


Рис. 60. Модуль общей деформации мерзлых суглинков, МПа

(данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

Среднезасоленные слабо- и льдистые мерзлые суглинки третьей морской террасы и сильнозасоленные нельдистые суглинки салехардской свиты обладают близкими значениями коэффициента относительного поперечного расширения. Для них характерны значения в пределах 0,41-0,45, что указывает на достаточно небольшую их сжимаемость в объеме и низкую сдвиговую жесткость (рис. 61).

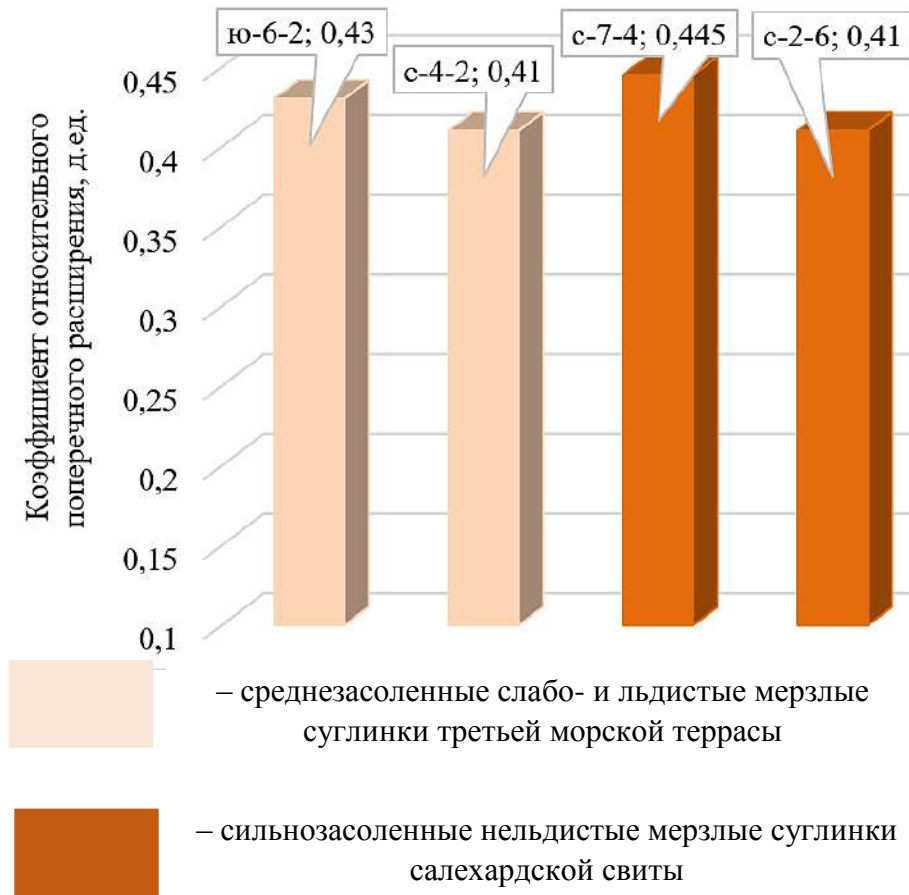


Рис. 61. Коэффициент относительного поперечного расширения мерзлых суглинков (данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

На рисунках 62, 63 представлена зависимость относительных продольных и поперечных деформаций от девиатора напряжений по результатам испытаний среднезасоленных слабо- и льдистых мерзлых суглинков третьей морской террасы и сильнозасоленных нельдистых мерзлых суглинков салехардской свиты соответственно. В табл. 38 приведен результат определения пределов упругого деформирования и текучести для параметров закона пластического течения в расширенной модели Друкера-Прагера (см. п. 3.2).

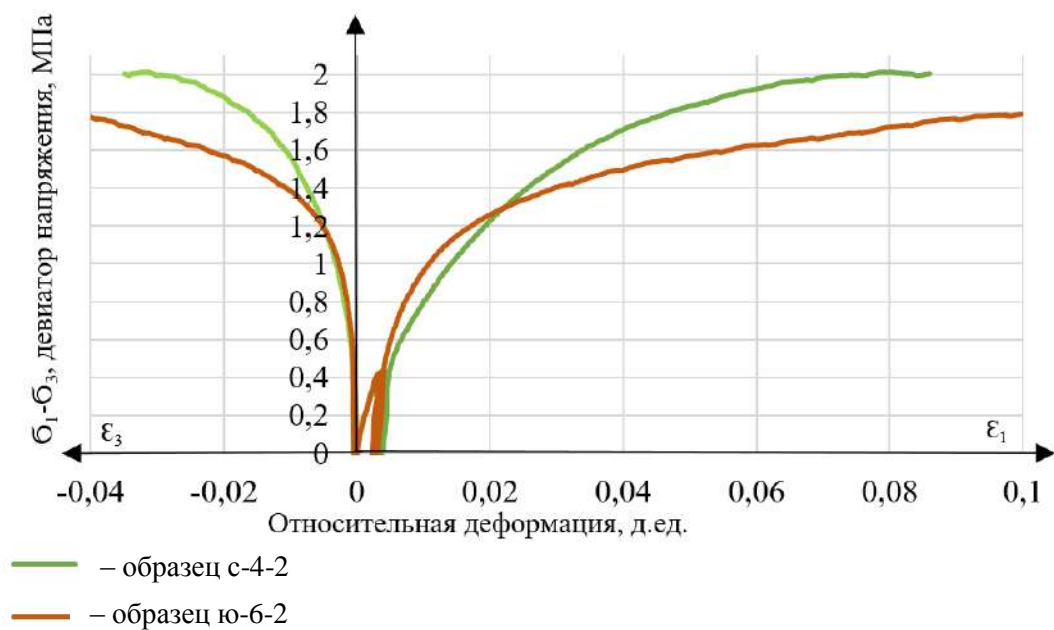


Рис. 62. Результаты испытаний трехосного сжатия среднесоленых слабо- и льдистых мерзлых суглинков третьей морской террасы (данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

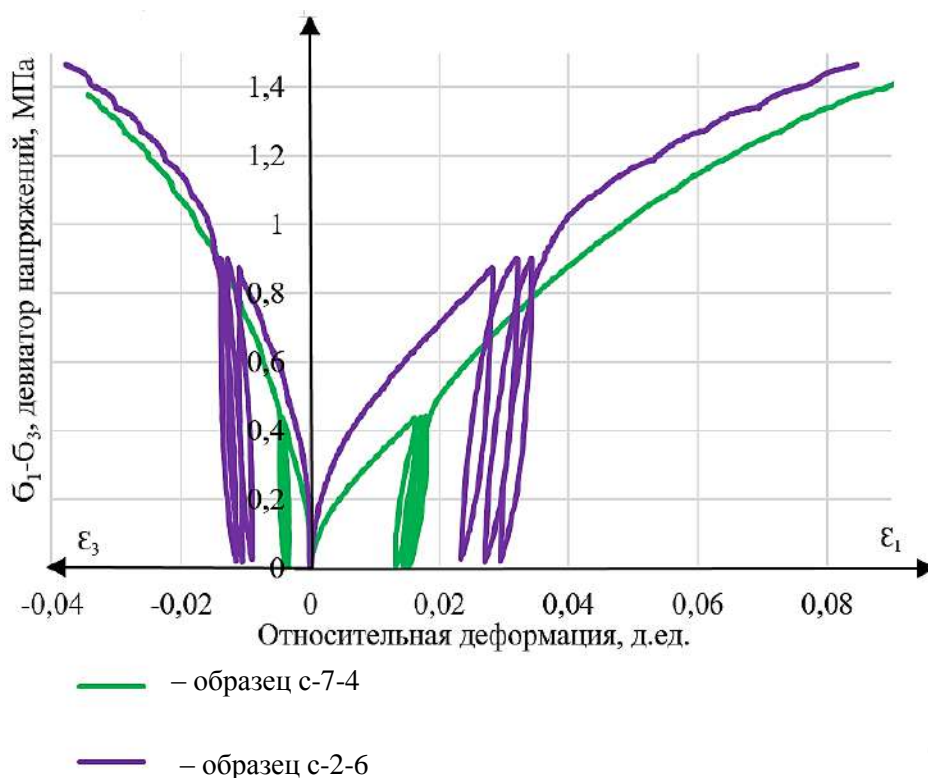


Рис. 63. Результаты испытаний трехосного сжатия сильносоленых нельдистых мерзлых суглинков салехардской свиты (данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

Таблица. 38. Результаты испытаний трехосного сжатия мерзлых суглинков по быстрой схеме нагружения

Номер образца	Тип грунта	Геол. индекс	$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	E_0 , МПа	ν	Предел текучести		Предел прочности		ψ , °
						q , МПа	γ , д.ед.	q , МПа	γ , д.ед.	
ю-6-2	Среднезасоленный льдистый суглинок	mIII ₂₋₃	1,8	21	0,43	0,35	0	1,8	0,14	0
с-4-2	Среднезасоленный слабльдистый суглинок	mIII ₂₋₃	2,0	26	0,41	0,15	0	2	0,12	0
с-7-4	Сильнозасоленный нельдистый суглинок	m,gmII ₂₋₄	1,47	20	0,45	0,1	0	1,47	0,12	0
с-2-6	Сильнозасоленный нельдистый суглинок	m,gmII ₂₋₄	1,5	17	0,41	0,09	0	1,48	0,14	0

Примечание 1: $\sigma_1 - \sigma_3$ – девиатор разрушения; E_0 – модуль общей деформации; ν – коэффициент относительного поперечного расширения; q – девиатор напряжений; γ – деформация сдвига; ψ – угол дилатансии.

Примечание 2: данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4.

Примечание 3: данные по схемам испытаний приведены в табл. 36.

Как видно из графиков на рис. 64, у мерзлых суглинков отсутствует эффект положительной дилатансии, в ходе нагружения не наблюдается разуплотнение образца с характерной для этого пиковой прочностью и увеличением порового пространства. По результатам испытаний всех образцов получен угол дилатансии близкий к 0°.

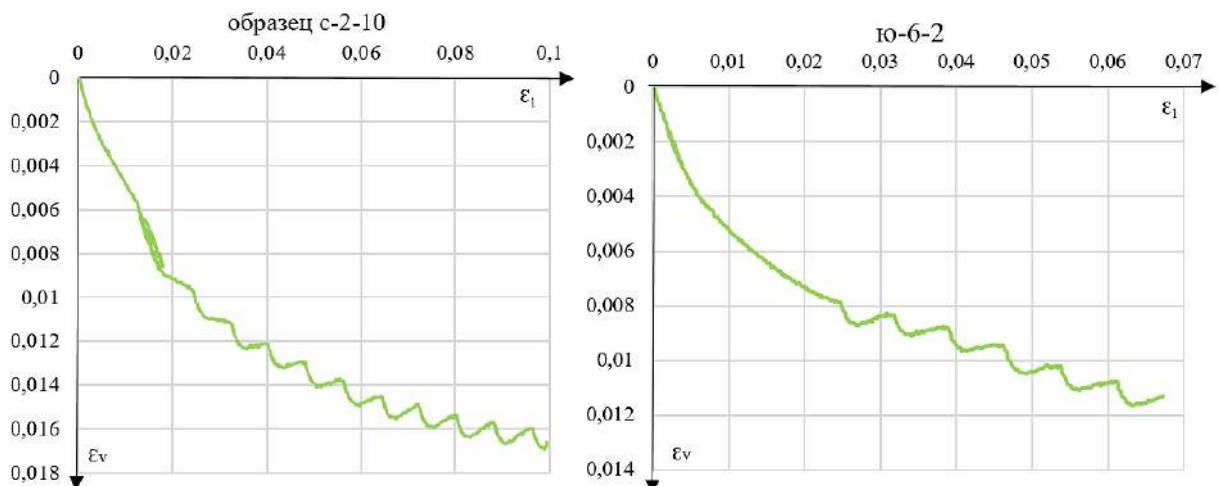


Рис. 64. Примеры графиков зависимости относительных объемных деформаций от продольных по результатам испытаний трехосного сжатия мерзлых суглинков

В целом для рассмотренных мерзлых суглинков характерны низкие значения условно-мгновенной сдвиговой прочности, высокая способность к деформированию и низкая сдвиговая жесткость. Это обусловлено особенностью их состава и строения, а именно высокой дисперсностью и значительным уровнем засоленности NaCl (см. главу 1). По данным [75] именно такой тип засоления приводит к наибольшему снижению прочности и увеличению деформируемости мерзлых грунтов.

Принципиально другое механическое поведение под нагрузкой наблюдается у пылеватых песков казанцевской свиты – по результатам быстрых испытаний они обладают достаточно высокой сдвиговой прочностью. По результатам всех испытаний она варьирует от 4,5 до 4,8 МПа. Максимальные показатели сдвиговой прочности отмечены у слабозасоленных слабо- и льдистых мерзлых песков (D_{sal} от 0,09 до 0,12%) и составляют 4,7-4,8 МПа (рис. 65). При увеличении степени засоленности до 0,17-0,18% сдвиговая прочность песчаного грунта падает на 5% и составляет 4,6 и 4,5 МПа соответственно (рис. 66). Более значительное влияние степени засоленности просматривается при анализе показателей деформируемости мерзлых песчаных грунтов. Так, наибольшее сопротивление деформированию наблюдается у слабозасоленного слабо- и льдистого мерзлого песка (образец с-4-5) с наименьшей степенью засоленности 0,07%, его модуль общей деформации составляет 215 МПа. Близкое значение – 208 МПа получено для образца мерзлого песка с-2-4 со степенью засоленности 0,09%. У средnezасоленных слабо- и льдистых мерзлых песков казанцевской свиты модуль общей деформации падает в среднем на 45%. Так, при степени засоленности 0,17% (образец ю-6-5) жесткость мерзлого песка уже составляет 117 МПа, а при 0,18% (образец с-3-4) – 98 МПа (рис. 67).

Слабозасоленные и средnezасоленные слабо- и льдистые мерзлые пески казанцевской свиты в целом обладают схожими значениями коэффициента относительного поперечного расширения, он колеблется от 0,27 до 0,31 у первых из них и от 0,25 до 0,29 у вторых.

Значения параметров закона пластического течения в расширенной модели Друкера - Прагера мерзлого песка казанцевской свиты представлены в табл. 39.

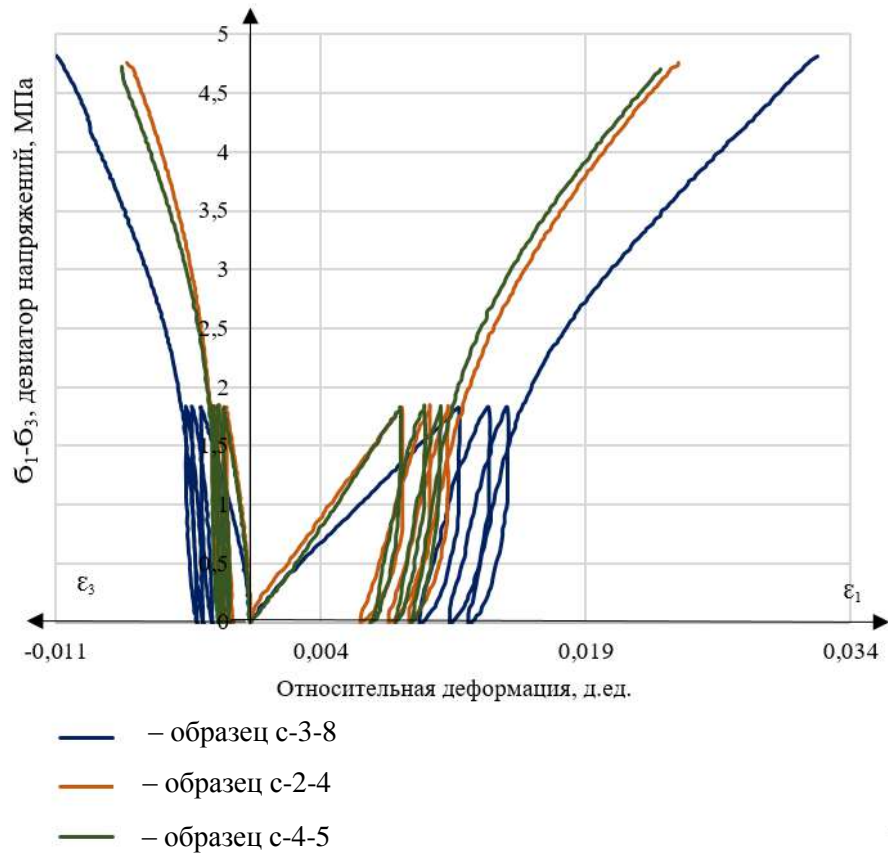


Рис. 65. Результаты испытаний трехосного сжатия слабозасоленных слабо- и льдистых мерзлых песков казанцевской свиты (данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и

приложении 2)

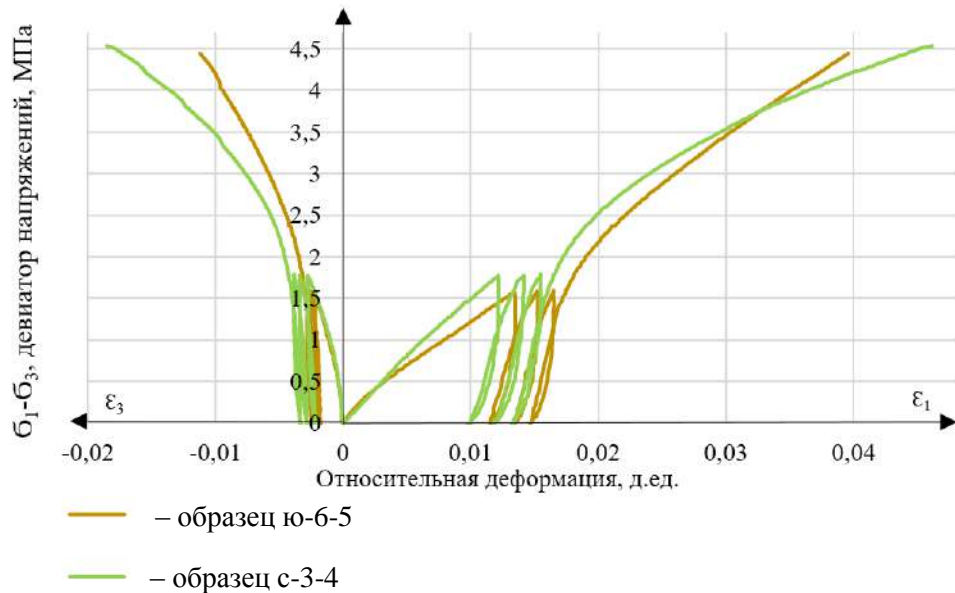


Рис. 66. Результаты испытаний трехосного сжатия средnezасоленных слабо- и льдистых мерзлых песков казанцевской свиты (данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

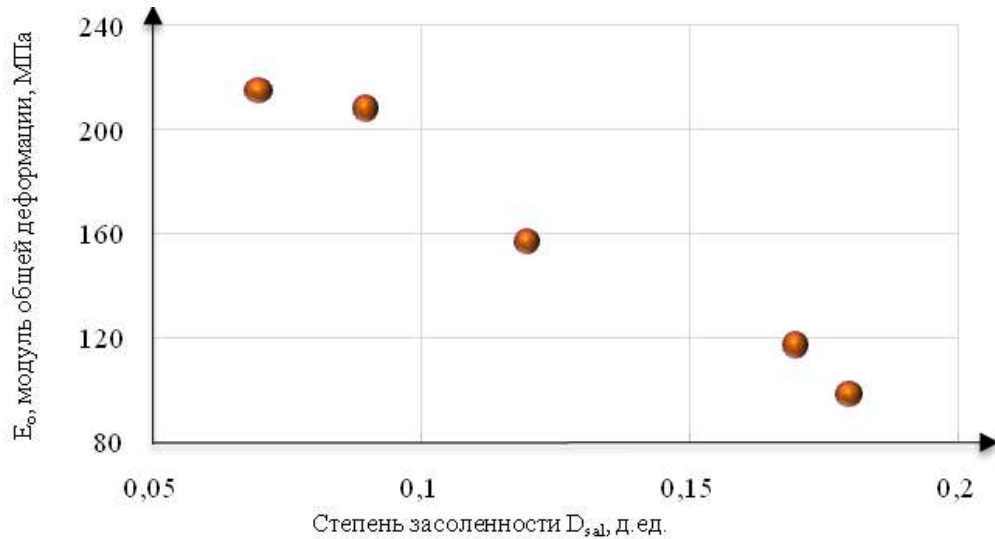


Рис. 67. График зависимости модуля общей деформации мерзлых песков казанцевской свиты от степени их засоленности по результатам испытаний методом трехосного сжатия

Таблица. 39. Результаты испытаний трехосного сжатия мерзлых песков казанцевской свиты по быстрой схеме нагружения

Номер образца	Тип грунта	Геол. индекс	$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	E_o , МПа	ν	Предел текучести		Предел прочности		ψ , °
						q , МПа	γ , д. ед.	q , МПа	γ , д. ед.	
с-2-4	Слабозасоленный слабльдистый песок	m,pmIII ₁	4,76	208	0,27	1,75	0	4,76	0,03	0
с-3-8	Слабозасоленный слабльдистый песок	m,pmIII ₁	4,8	157	0,3	1,8-0	0	4,8	0,04	0
с-4-5	Слабозасоленный льдистый песок	m,pmIII ₁	4,7	215	0,31	1,9-0	0	4,7	0,03	0
с-3-4	Среднезасоленный слабльдистый песок	m,pmIII ₁	4,54	98	0,25	1,4-0	0	4,6	0,06	0
ю-6-5	Среднезасоленный льдистый песок	m,pmIII ₁	4,6	117	0,29	1,5-0	0	4,6	0,05	0

Примечание 1: $\sigma_1 - \sigma_3$ – девиатор разрушения; E_o – модуль общей деформации; ν – коэффициент относительного поперечного расширения; q – девиатор напряжений; γ – деформация сдвига; ψ – угол дилатансии.

Примечание 2: данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4.

Примечание 3: данные по схемам испытаний приведены в табл. 36.

Мерзлые песчаные грунты казанцевской свиты не обладают способностью к разуплотнению в ходе нагружения. Во всех испытаниях угол дилатансии мерзлых песков оказался близок 0°. Примеры зависимости объемных деформаций от осевых по результатам испытаний мерзлых песков казанцевской свиты представлены на рис. 68.

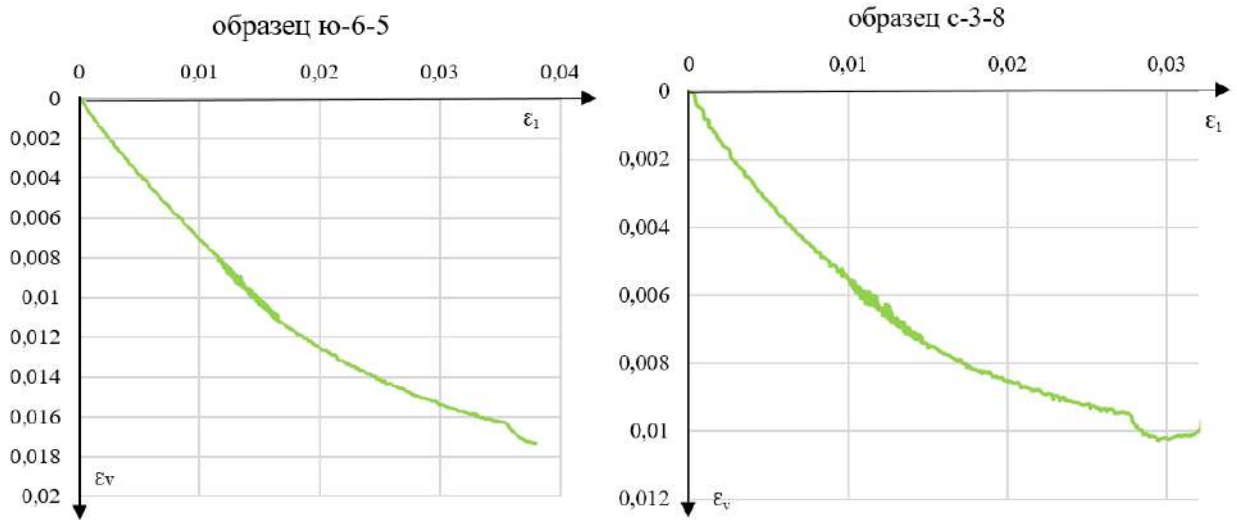


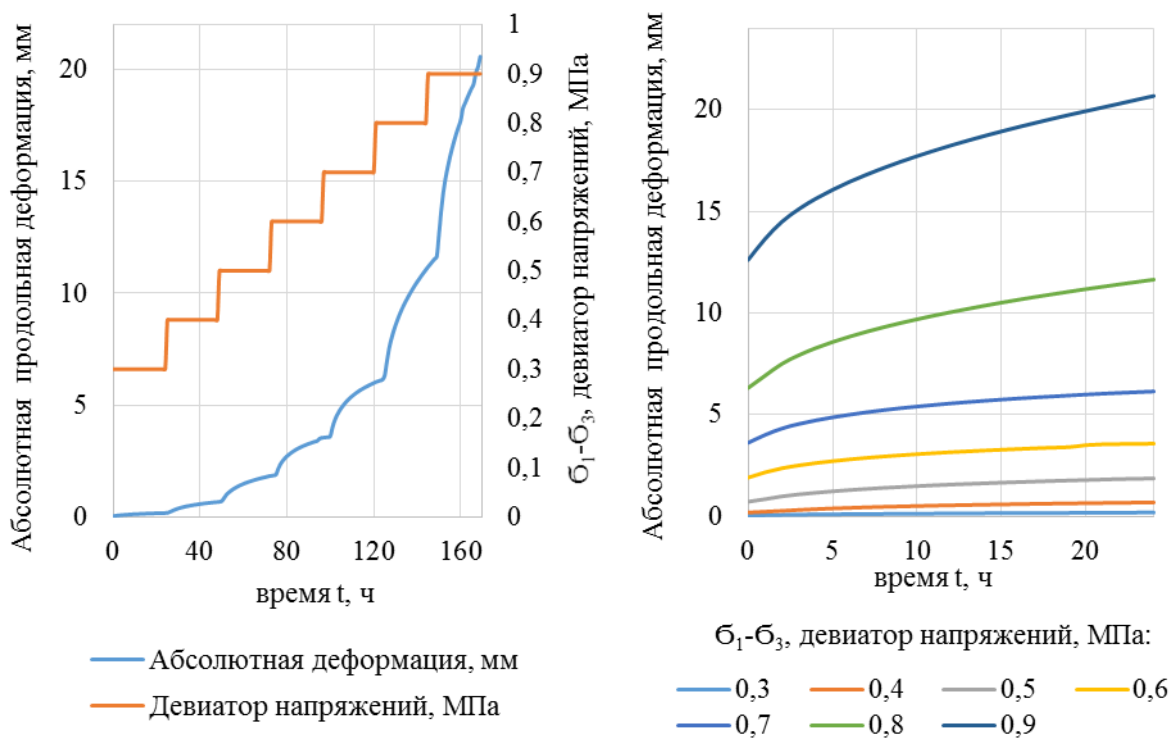
Рис. 68. Примеры графиков зависимости относительных объемных деформаций от продольных по результатам испытаний трехосного сжатия мерзлых песков казанцевской свиты

Длительные статические испытания

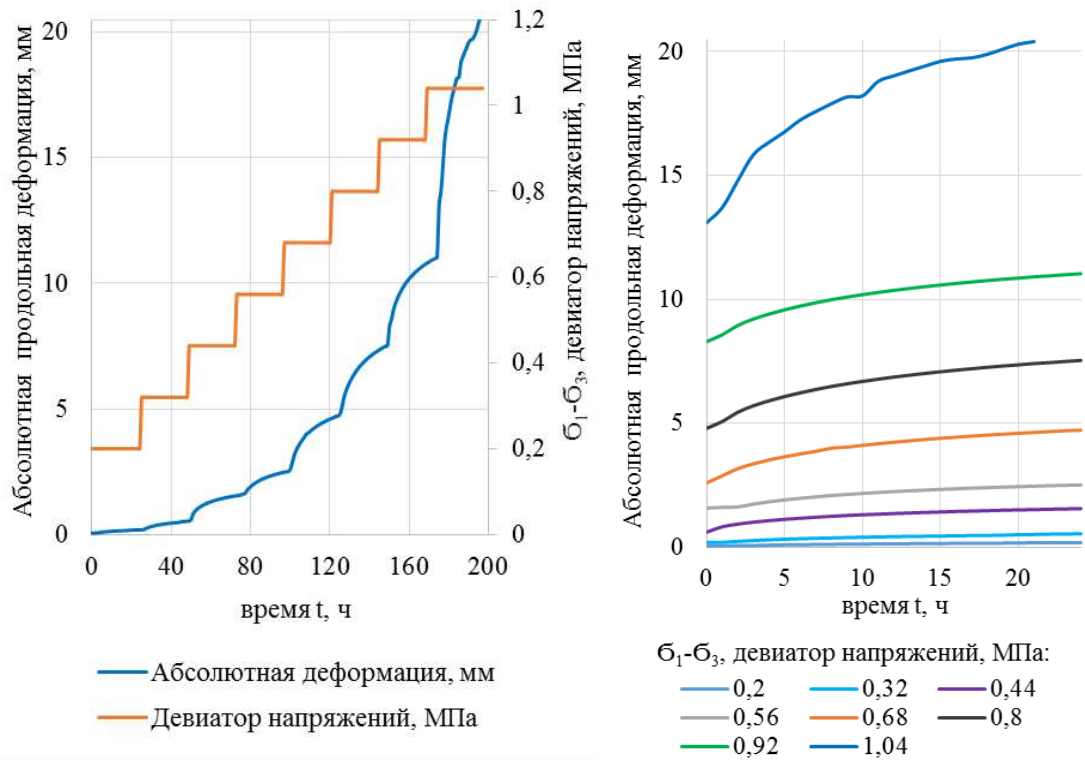
При длительном воздействии нагрузки в мерзлом грунте развиваются реологические процессы. Одним из них является процесс ползучести – нарастание деформаций во времени при постоянном напряжении. При низком уровне напряжений возникает затухающая ползучесть – преобладает уменьшение пористости, закрытие микротрещин, а также залечивание макро- и микротрещин в результате таяния льда на контактах частиц и дальнейшего его замерзания в менее напряженных зонах. Затухающая ползучесть характеризуется постепенным уменьшением скорости деформации, которая в пределе стремится к нулю [20, 55, 69]. При превышении некоторого предела напряжения возникает незатухающая ползучесть, которая включает в себя стадии неустановившейся, установившейся и прогрессирующей ползучести. Так, в первоначальный момент времени фиксируется неустановившаяся ползучесть, скорость деформации при которой стремится к определенному значению, отличному от нуля. На этой стадии преобладает процесс закрытия микротрещин, залечивание дефектов структуры влагой, выжимаемой из перенапряженных зон, происходит уменьшение пористости. Далее, при достижении постоянного значения скорости деформации наступает установившаяся ползучесть, или, как ее еще принято называть, – пластично-вязкое течение грунта. Установившаяся ползучесть характеризуется деформированием с постоянной скоростью, которая обуславливается равновесием между образованием новых дефектов структуры грунта и залечиванием уже существующих. Установившаяся ползучесть через определенное время переходит в прогрессирующую ползучесть с постоянно возрастающей скоростью [19, 71].

В настоящем исследовании предел длительной прочности мерзлого грунта фиксировался по переходу от затухающей ползучести к незатухающей (см. раздел 3.2).

На рис. 69 представлены кривые ползучести средnezасоленных льдистых мерзлых суглинков второй морской террасы. Из результатов видно, что кривые имеют затухающий характер ползучести при девиаторе напряжений до 0,7 МПа при всестороннем давлении 0,2 МПа (образец п-13-1.1/1) и 0,92 МПа при всестороннем давлении 0,4 МПа (образец п-13-1.1/2). Стадия незатухающей ползучести фиксируется при девиаторе напряжений 0,8 МПа при всестороннем давлении 0,2 МПа (образец п-13-1-1/1). При всестороннем давлении 0,4 МПа (образец п-13-1-1/2) стадия незатухающей ползучести начинается на 7 ступени при девиаторе напряжений 1,04 МПа. Дальнейшее увеличение напряжений привело к развитию пластично-вязкого течения со значительными скоростями до достижения относительной продольной деформации 20% (рис. 69). Таким образом, предел длительной прочности средnezасоленных льдистых мерзлых суглинков составил 0,7 МПа при всестороннем давлении 0,2 МПа и 0,92 МПа при всестороннем давлении 0,4 МПа. На основании этих данных определен след предельной поверхности текучести в координатах $q - p$, угол β наклона которой составил 39° (рис.70).



а) $\sigma_3 = 0,2$ МПа



б) σ₃ = 0,4 МПа

Рис. 69. Результаты испытаний среднесоленых льдистых мерзлых суглинков второй морской террасы при разном всестороннем давлении:

а) образец п-13-1.1/1 среднесоленый льдистый суглинок σ₃ = 0,2 МПа

б) образец п-13-1.1/2 среднесоленый льдистый суглинок σ₃ = 0,4 МПа

(данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

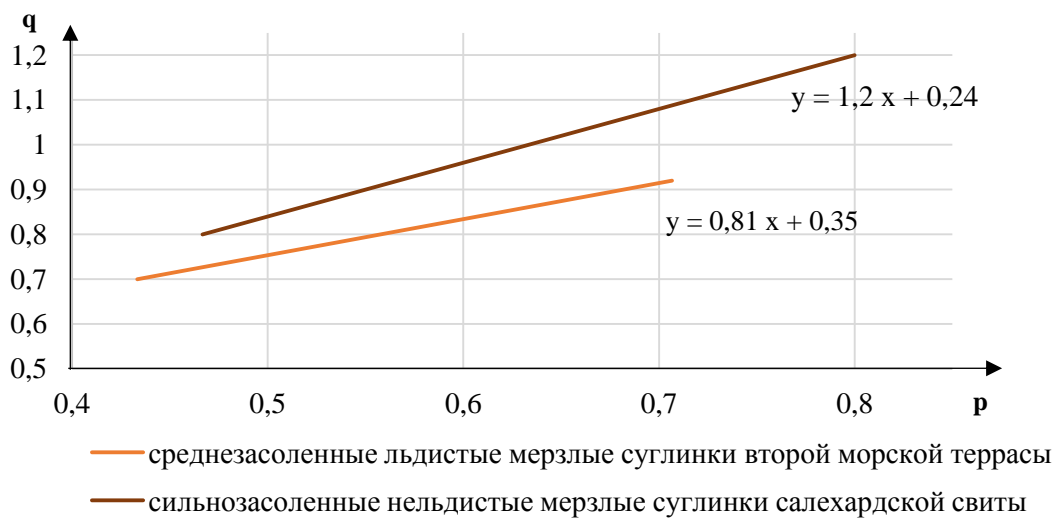


Рис. 70. Следы поверхностей текучести среднесоленых льдистых мерзлых суглинков второй морской террасы и сильносоленых нельдистых мерзлых суглинков салехардской свиты в координатах q-p

По кривым ползучести сильнозасоленных нельдистых мерзлых суглинков салехардской свиты видно, что стадия затухающей ползучести наблюдается до девиатора напряжений, не превышающего 0,8 МПа при всестороннем давлении 0,2 МПа (образец с-9-12) и 1,2 МПа при всестороннем давлении 0,4 МПа (образец с-4-11). Дальнейшее увеличение девиатора напряжений привело к переходу в стадию незатухающей ползучести (рис. 71). По результатам испытаний угол наклона поверхности текучести Друкера-Прагера для сильнозасоленных нельдистых мерзлых суглинков составил 50° (рис. 70). Дополнительно результаты испытаний мерзлых суглинков были обработаны согласно условию прочности Мора-Кулона. Полученные результаты представлены в табл. 40.

Интересно, что по результатам испытаний трехосного сжатия в большинстве случаев деформирование мерзлых суглинков не перешло в стадию прогрессирующего течения с постоянно увеличивающейся скоростью деформации. С течением времени и при увеличении вертикального давления мерзлые суглинки деформировались с большей, но постоянной скоростью, стадия пластично-вязкого течения продолжалась значительное время до достижения высокого уровня деформаций – более 20%. Такой характер деформирования отмечается и по литературным данным для некоторых глинистых талых грунтов. Похожие процессы отмечены А.В. Брушковым при изучении ползучести засоленных мерзлых грунтов методом одноосного сжатия, в работах [6-8] приводятся данные о затухающем характере деформирования мерзлых суглинистых отложений до величины деформации 20%.

На основании обработки испытаний трехосного сжатия средnezасоленных льдистых и сильнозасоленных нельдистых мерзлых суглинков получены графики зависимости эквивалентной скорости деформации ползучести от времени. Полученные распределения точек описаны степенным уравнением закона ползучести (4), с помощью которого подобраны параметры ползучести A , m , n для каждого типа грунта (табл. 40) (см. раздел 3.2.).

На рис. 72 в качестве примера приведены графики изменения эквивалентной скорости деформации ползучести средnezасоленного льдистого мерзлого суглинка второй морской террасы (образец п-13-1-1/1) и сильнозасоленного нельдистого суглинка салехардской свиты (образец с-9-12). На основании обработки каждой ступени испытаний образцов п-13-1-1/1 и с-9-12 подобраны параметры ползучести A , m , n .

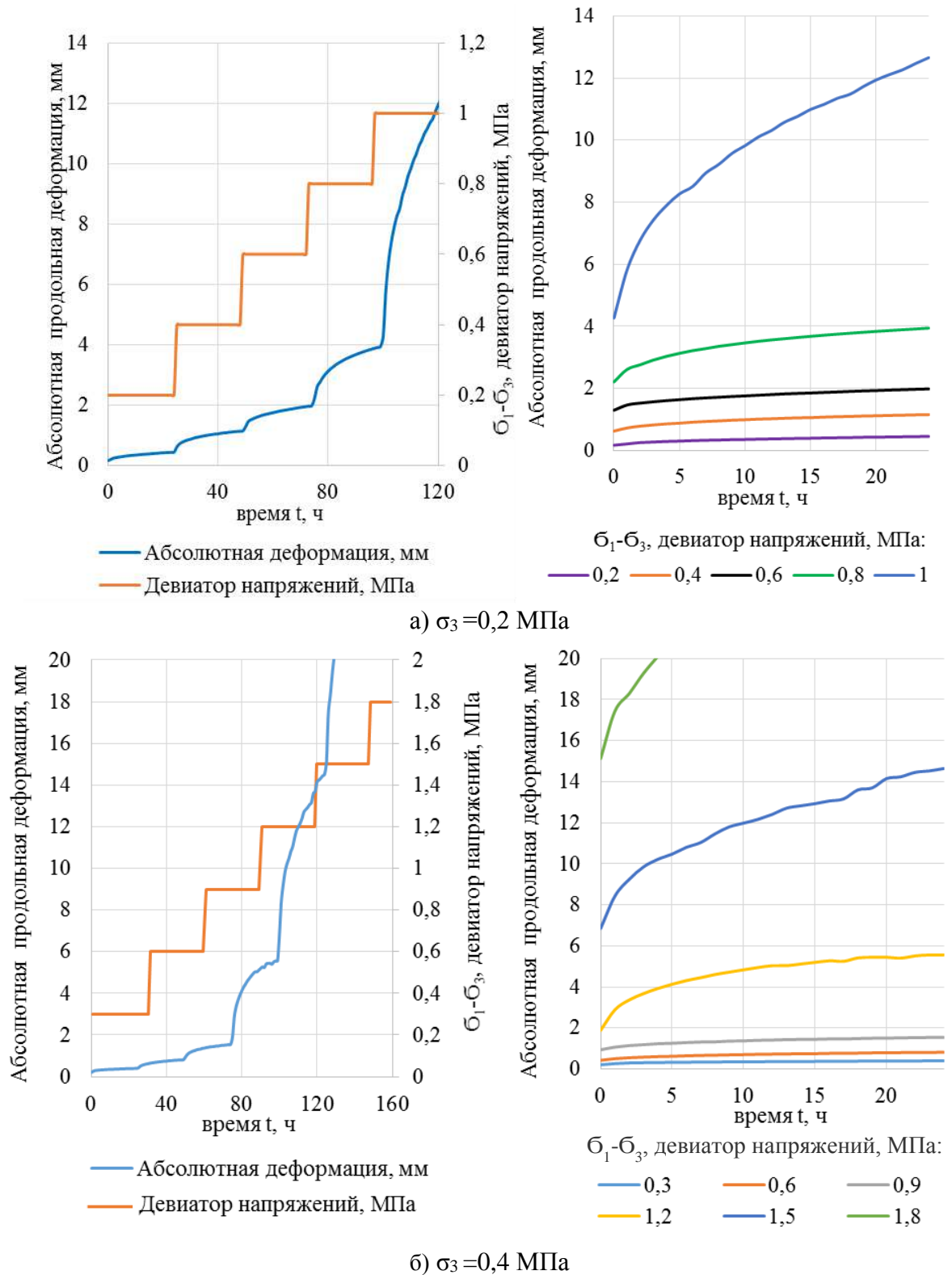


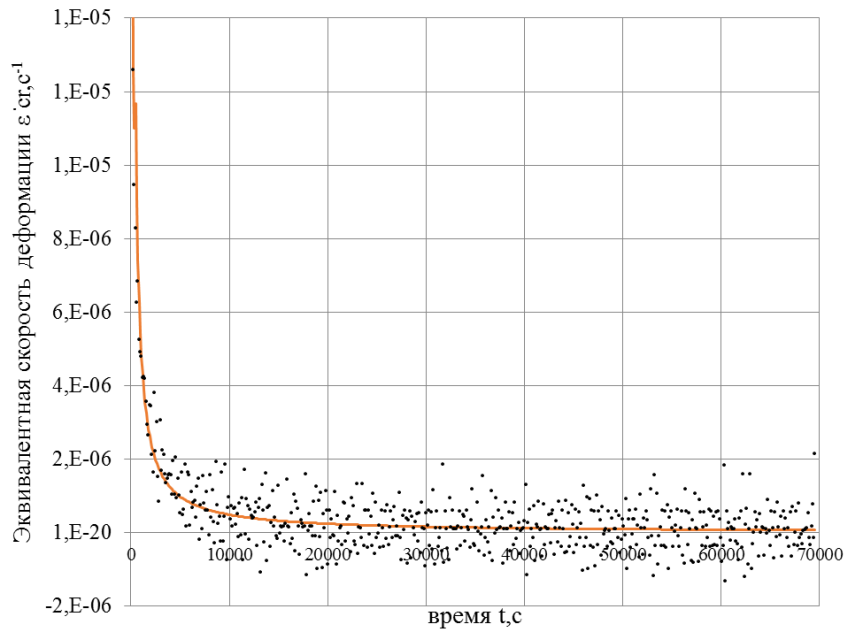
Рис. 71. Результаты испытаний сильнозасоленных нельдистых мерзлых суглинков

салехардской свиты при разном всестороннем давлении:

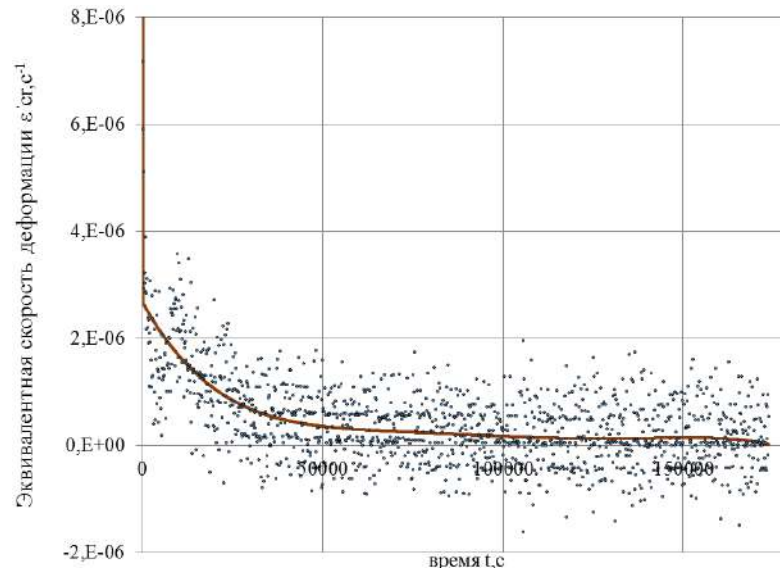
а) образец с-9-12 сильнозасоленный нельдистый суглинок $\sigma_3 = 0,2$ МПа,

б) образец с-4-11 сильнозасоленный нельдистый суглинок $\sigma_3 = 0,4$ МПа

(данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)



а)



б)

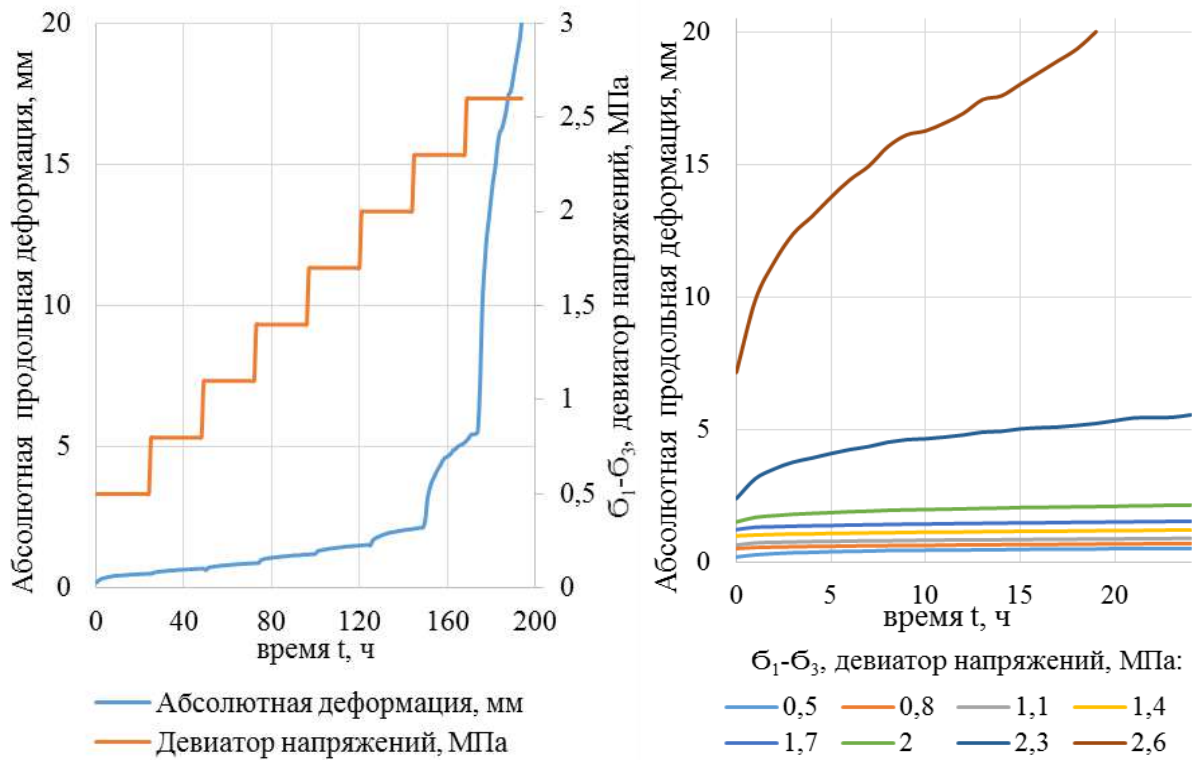
- эквивалентная скорость деформации ползучести (5) в момент времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия
- аппроксимирующая реологическая кривая, полученная по степенному закону расширенной модели Друкера-Прагера (4)

Рис. 72. Изменение эквивалентной скорости деформации ползучести с течением времени по результатам испытаний:

- а) средnezасоленного льдистого суглинка (образец п-13-1-1/1) при девиаторе напряжений 0,1 МПа и всестороннем давлении 0,2 МПа,
- б) сильнозасоленного нельдистого мерзлого суглинка (образец с-9-12) при девиаторе напряжений 0,6 МПа и всестороннем давлении 0,4 МПа

Длительные испытания мерзлых песков казанцевской свиты проведены на образцах с различной степенью засоленности (см. раздел 3.1, приложение 4), что позволило изучить ее влияние на процесс ползучести.

На рис. 73 представлены кривые ползучести двух образцов мерзлых песков с различной степенью засоленности при всестороннем давлении 0,2 МПа. В зависимости от засоленности мерзлых песков переход в стадию незатухающей ползучести осуществился при разном уровне напряжений. По результатам испытаний слабозасоленного льдистого песка образца с-1-6 ($D_{sal} = 0,09\%$) при девиаторе напряжений 2,0 МПа в нем зафиксирована затухающая ползучесть, при девиаторе напряжений 2,25 МПа – незатухающая. Тогда как в образце средnezасоленного слабольдистого песка образца п-13-2-б/1 ($D_{sal} = 0,24\%$) стадия затухающей ползучести наблюдалась только до уровня девиатора напряжений 1,5 МПа, а при значении девиатора 1,8 МПа и выше уже было отмечено пластично-вязкое течение.



а)

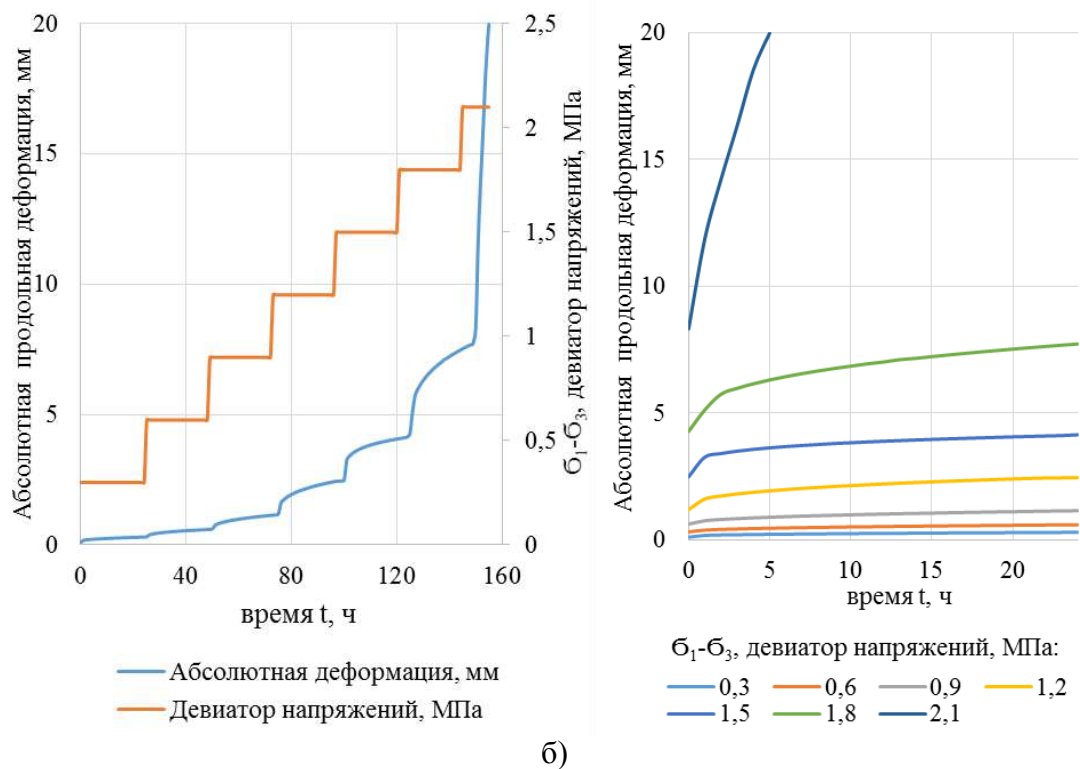


Рис. 73. Результаты испытаний мерзлых песков казанцевской свиты с разной степенью засоленности при всестороннем давлении 0,2 МПа:

а) образец с-1-6 слабозасоленный льдистый песок ($D_{sal} = 0,09\%$),

б) образец п-13-2-6/1 средnezасоленный слабольдистый песок ($D_{sal} = 0,24\%$)

(данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

Идентичное влияние засоленности на процесс ползучести наблюдалось у образцов мерзлого песка казанцевской свиты с-3-8, п-13-1-4, испытанных при всестороннем давлении 0,4 МПа. Переход в стадию незатухающей ползучести слабозасоленного слабольдистого песка образца с-3-8 ($D_{sal} = 0,12\%$) произошел при девиаторе напряжений 2,6 МПа, затухающая ползучесть наблюдалась до девиатора напряжений 2,25 МПа. У средnezасоленного слабольдистого песка образца п-13-1-4 ($D_{sal} = 0,22\%$) затухающая ползучесть отмечена до величины девиатора напряжений 1,8 МПа, а пластично-вязкое течение развилось при девиаторе напряжений 2,1 МПа (рис 74).

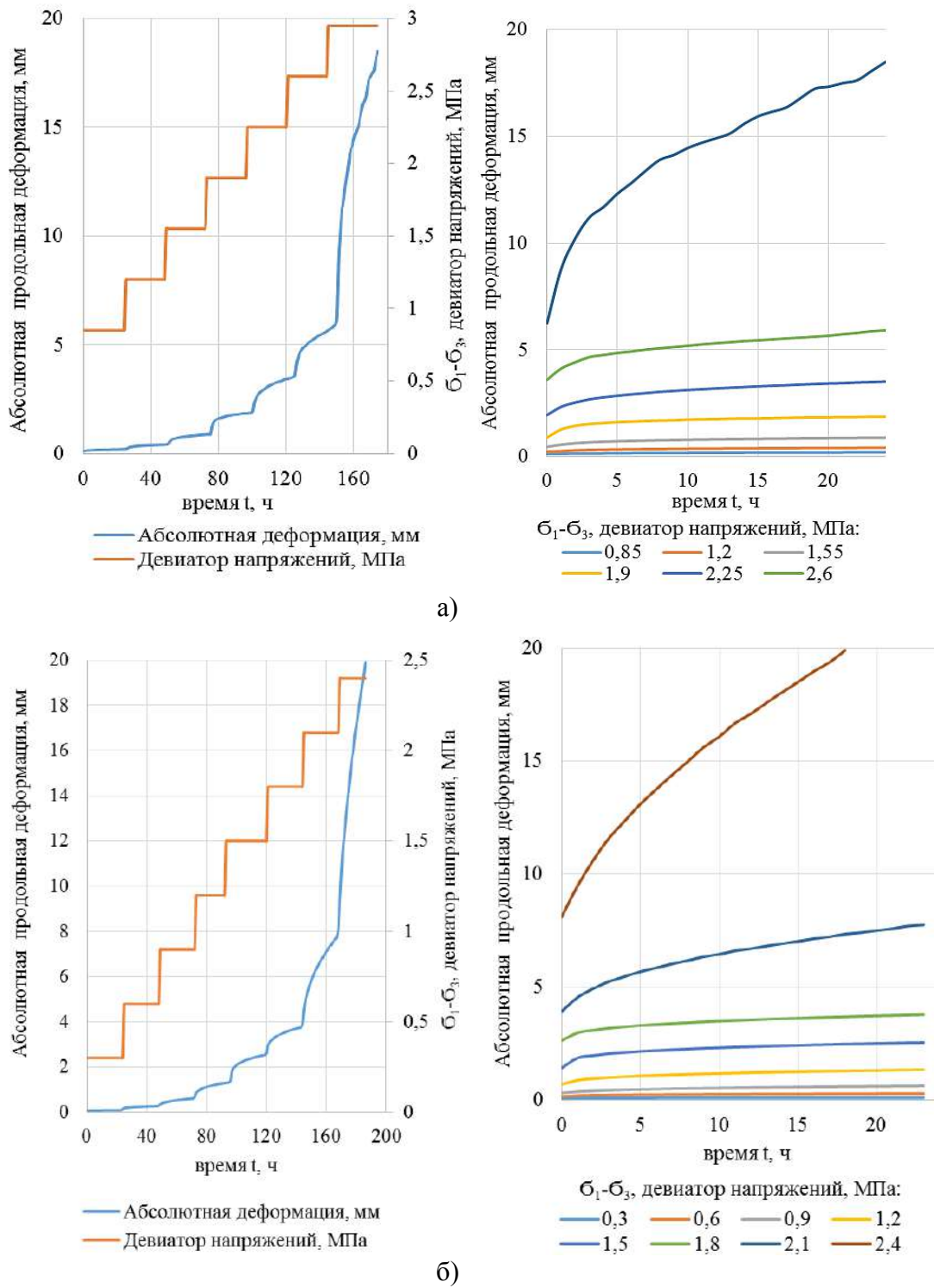


Рис. 74. Результаты испытаний мерзлых песков казанцевской свиты с разной степенью засоленности при всестороннем давлении 0,4 МПа:

а) образец с-3-8 слабозасоленный слабльдистый песок ($D_{sal} = 0,12\%$),

б) образец п-13-1-4 средnezасоленный слабльдистый песок ($D_{sal} = 0,22\%$)

(данные о составе, строении и свойствах образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4)

На основании проведенных испытаний мерзлых песков казанцевской свиты с различной степенью засоленности построены следы предельных поверхностей текучести (рис. 75). Дополнительно получены показатели прочности мерзлых песков по условию прочности Мора-Кулона (табл. 40).

На основании аппроксимации степенной функцией (4) графиков зависимости эквивалентной скорости деформации ползучести от времени для каждого типа мерзлого песчаного грунта подобраны параметры ползучести A , m , n . Некоторые из указанных графиков приведены на рис. 76. В целом по результатам длительных испытаний видно, что с ростом степени засоленности мерзлого песка практически все параметры ползучести изменяются в сторону ослабления (табл. 40).

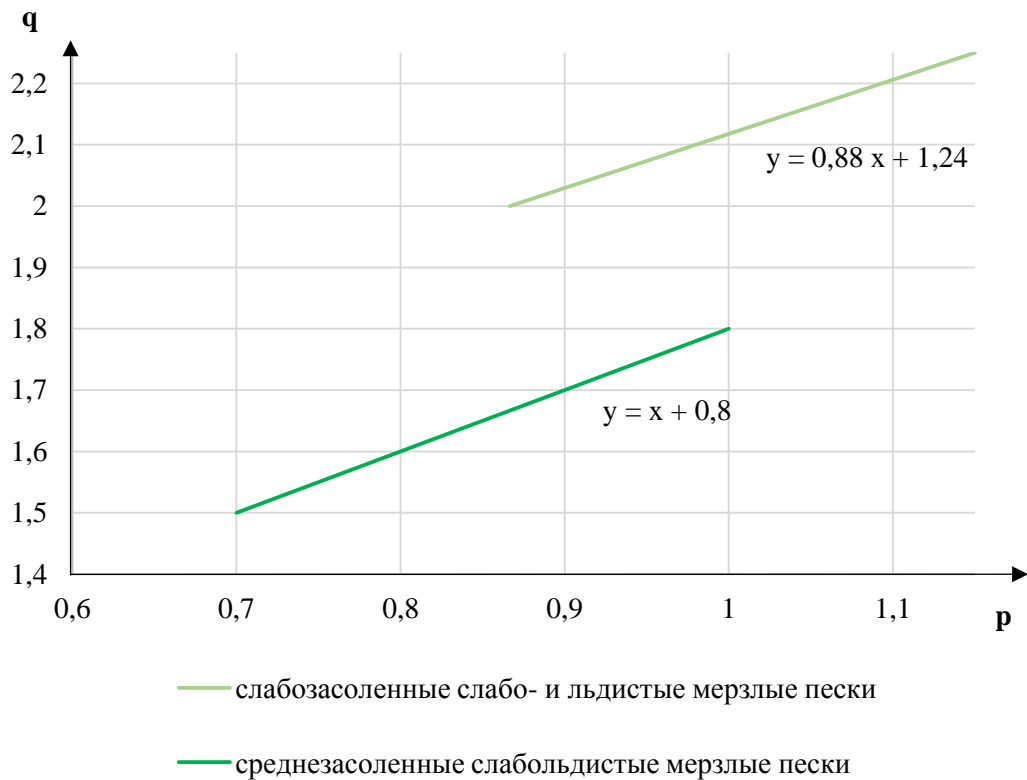
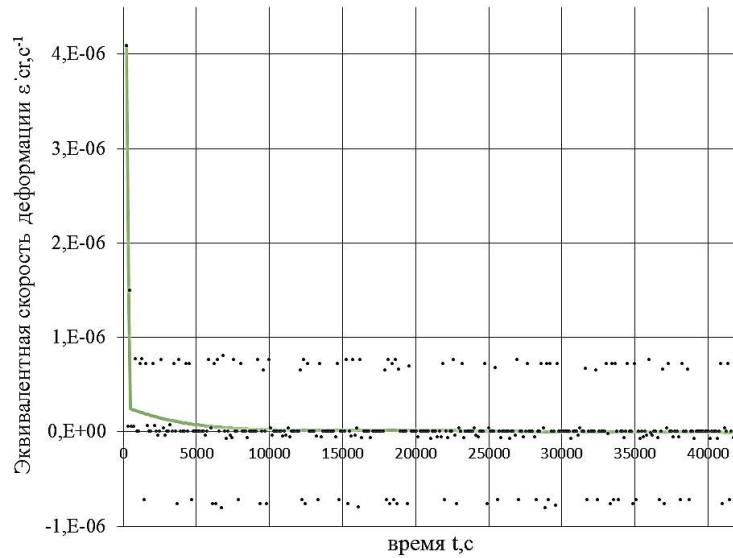
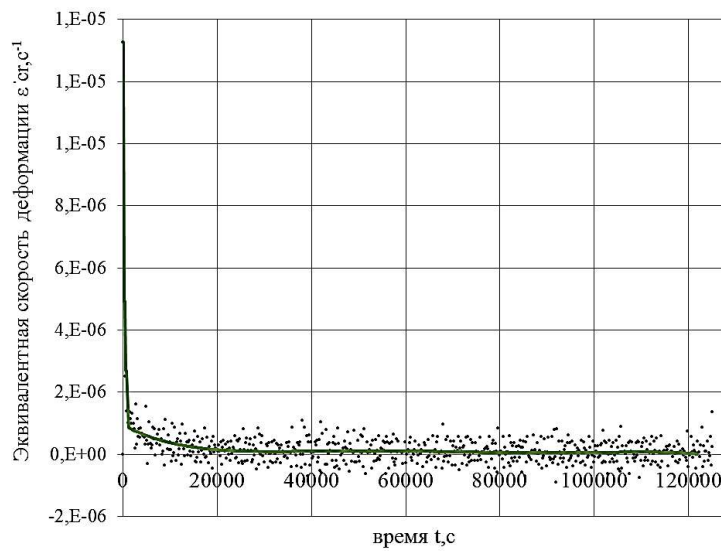


Рис.75. Следы поверхностей текучести мерзлых песков казанцевской свиты с разной степенью засоленности в координатах q - p



а)



б)

● эквивалентная скорость деформации ползучести (5) в момент времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия

— аппроксимирующая реологическая кривая, полученная по степенному закону расширенной модели Друкера-Прагера (4)

Рис. 76. Изменение эквивалентной скорости деформации ползучести с течением времени по результатам испытаний:

- а) слабозасоленного слабодыстического песка казанцевской свиты при девиаторе напряжений 0,85 МПа и всестороннем давлении 0,4 МПа (образец с-3-8),
 б) средnezасоленного слабодыстического песка казанцевской свиты при девиаторе напряжений 1,2 МПа и всестороннем давлении 0,4 МПа (образец п-13-1-4)

Таблица 40. Результаты испытаний трехосного сжатия многолетнемерзлых грунтов по длительной схеме нагружения

Номер образца	Глубина, м	Геол. индекс	Тип грунта	Предел длительной прочности $\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	Всестороннее давление σ_3 , МПа	Угол Друкера-Прагера, °	A	m	n	c, МПа	ϕ , °
п-13-1-1/1	3,4-4,0	mIII ₃₋₄	среднезасоленный льдистый суглинок	0,7	0,2	39	$4,15 \cdot 10^{-9}$	-0,56	1,15	0,15	19,6
п-13-1-1/2	3,4-4,0	mIII ₃₋₄	среднезасоленный льдистый суглинок	0,92	0,4						
с-9-12	60,0-60,6	m,gmII ₂₋₄	сильнозасоленный нельдистый суглинок	0,8	0,2	50	$5,59 \cdot 10^{-9}$	-0,74	1,03	0,10	26,6
с-4-11	50,0-50,6	m,gmII ₂₋₄	сильнозасоленный нельдистый суглинок	1,2	0,4						
с-1-6	21,8-22,5	m,pmIII ₁	слабозасоленный льдистый песок	2,0	0,2	41,4	$1,09 \cdot 10^{-11}$	-0,91	1,00	0,54	21
с-3-8	29,4-30,0	m,pmIII ₁	слабозасоленный слабольдистый песок	2,25	0,4						
п-13-2-6/1	21,9-22,5	m,pmIII ₁	среднезасоленный слабольдистый песок	1,5	0,2	45	$1,60 \cdot 10^{-10}$	-0,5	1,05	0,34	23,2
п-13-1-4	14,7-15,0	m,pmIII ₁	среднезасоленный слабольдистый песок	1,8	0,4						

Примечание 1: угол Друкера-Прагера – угол наклона поверхности текучести в расширенной модели Друкера-Прагера; A, m, n – параметры ползучести в расширенной модели Друкера-Прагера; c – длительное сцепление по условию прочности Мора-Кулона; ϕ – длительный угол внутреннего трения по условию прочности Мора-Кулона.

Примечание 2: данные по составу, строению и свойствам испытанных образцов мерзлого грунта приведены в табл. 35 и приложении 4.

Примечание 3: данные по схемам испытаний приведены в табл. 37.

3.3.2. Результаты испытаний льда методом трехосного сжатия

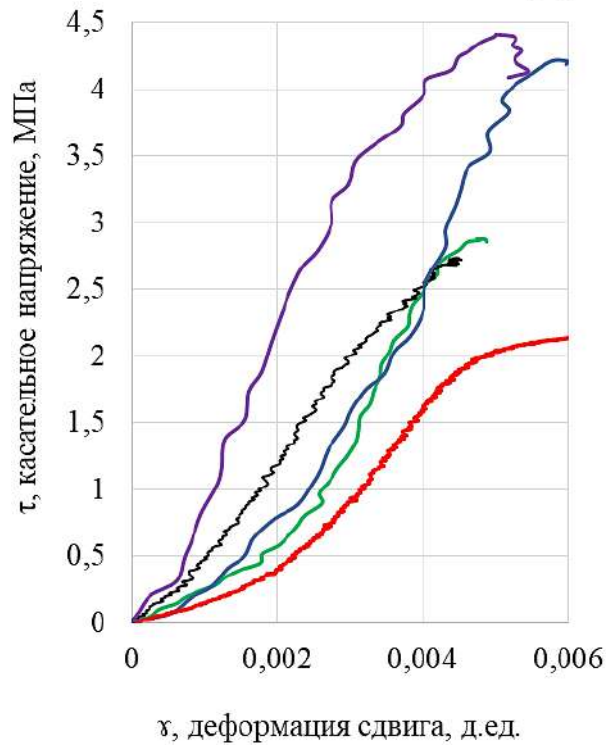
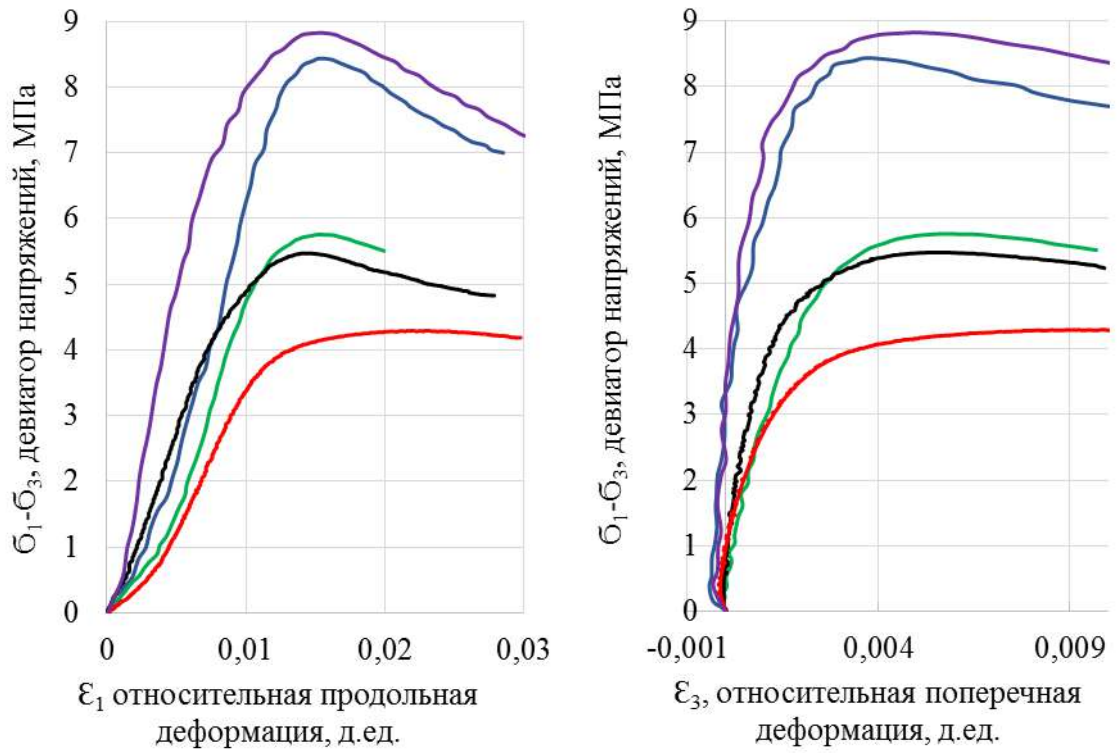
Быстрые кинематические испытания

По результатам быстрых кинематических испытаний получен высокий уровень сдвиговой прочности и жесткости трех типов льда. При этом все показатели физико-механических свойств льда оказались в зависимости от его состава, строения и скорости деформирования. Рассмотрим результаты испытаний каждого типа льда отдельно.

На рис. 77. представлены результаты испытаний 4 образцов ультрапресного чистого льда при разных скоростях деформирования. По ним видно, что при высоких скоростях деформирования лед обладает наибольшим уровнем сдвиговой прочности. Так, ее максимальное значение 8,8 МПа (образец № 1²) и 8,4 МПа (образец № 2) зафиксировано при скорости деформирования 4 мм/мин и всестороннем давлении 0,3 МПа. Снижение скорости в 8 раз до 0,5 мм/мин привело к падению сдвиговой прочности льда примерно в полтора раза и составило 5,5 МПа при всестороннем давлении 0,3 МПа (образец № 3). Наиболее низкое значение сдвиговой прочности 4,3 МПа зафиксировано при скорости деформирования 0,1 мм/мин и всестороннем давлении 0,3 МПа (образец № 31). В целом при снижении скорости деформирования в 40 раз (от 4 мм/мин до 0,1 мм/мин) прочность льда упала примерно на 50% при всестороннем давлении 0,3 МПа. Интересно, что при скоростях деформирования от 4 до 0,5 мм/мин (образцы № 1, 2, 28, 3) разрушение льда происходило при близких значениях деформации. Так, относительная продольная деформация на момент разрушения образцов № 1, 2, 28 и 3 составила 1,4-1,55%, а сдвиговая – 0,44-0,55% (рис. 77, табл. 41).

В целом результаты изучения влияния скорости деформирования на показатели физико-механических свойства льда встречаются в литературе, но зачастую имеют значительные расхождения и иногда полностью противоречат друг другу. По данным Н.А. Цытовича, М.И. Сумгина [70] при увеличении скорости от 2 до 5 МПа/мин предел прочности на одноосное сжатие падает с 6 до 2,4 МПа. Схожая закономерность установлена К.Н. Коржавиным [43, 84] – при увеличении скорости деформирования от 2 см/мин до 20 см/мин прочность на одноосное сжатие льда снижается с 1,45 до 0,97 МПа при температуре 0 °С, с 2,75 до 1,05 МПа при температуре -4 °С и с 4,9 до 1,42 МПа при температуре -10 °С.

² Образец № 1 не удалось испытать до разрушения с первого раза из-за ошибочного указания критерия остановки испытания (максимальная вертикальная нагрузка была задана равной 5 МПа). В результате после достижения указанного уровня напряжения испытание было прервано, и образец полностью разгружен. После корректировки схемы испытания образец № 1 был повторно нагружен и доведен до разрушения.



- образец № 1, скорость деформирования 4 мм/мин, $\sigma_3=0,3$ МПа,
- образец № 2, скорость деформирования 4 мм/мин, $\sigma_3=0,3$ МПа,
- образец № 28, скорость деформирования 1 мм/мин, $\sigma_3=0,4$ МПа,
- образец № 3, скорость деформирования 0,5 мм/мин, $\sigma_3=0,3$ МПа,
- образец № 31, скорость деформирования 0,1 мм/мин, $\sigma_3=0,3$ МПа

Рис. 77. Результаты испытаний трехосного сжатия ультрапресного чистого льда по быстрой схеме нагружения при разной скорости деформирования

Аналогичное снижение прочности льда с увеличением скорости деформирования получено В.В. Лавровым [45] и Ф.И. Птухиным [54]. Имеются данные о том, что при малых скоростях деформирования наблюдается обратная зависимость, что было выявлено С.С. Вяловым и В.А. Черниговым [15], Е.П. Шушериной и А.Е. Гуликовым [72] и др. [36, 37]. В результате установилось мнение, что с увеличением скорости деформирования вначале прочность льда увеличивается до некоторого максимума, а потом уменьшается, стремясь к пределу при очень высоких скоростях. Однако в дальнейшем эта теория была поставлена под сомнение результатами экспериментов других исследователей. Так, I. Hawkes и M. Mellor [79] провели большое количество испытаний при скоростях деформирования от 10^{-11} с^{-1} до 10^{-2} с^{-1} и получили плавное возрастание прочности льда в интервале скоростей более 9 порядков, при этом в области высоких скоростей деформирования (более 10^{-4} с^{-1}) зависимость выполаживалась [36, 37]. По результатам настоящей работы подтверждена последняя теория – установлено падение прочности льда при снижении скорости деформирования и наоборот, что было отмечено при испытании всех трех типов льда.

Как показали испытания ультрапресного чистого льда, скорость деформирования также оказывает значительное влияние на деформационные свойства льда. При ее снижении отмечено падение сдвиговой жесткости льда на 20-50%. Так, при скорости 4 мм/мин модуль сдвига составляет в среднем 1200 МПа, а при 0,1 мм/мин уже 605 МПа ($\sigma_3=0,3$ МПа) (приложение 6). При высоких скоростях деформирования во льду в большей мере проявляются упругие свойства, а при низких – увеличивается доля пластических деформаций. Установлено, что в испытаниях с высокой скоростью деформирования 4 мм/мин предел текучести ультрапресного чистого льда практически совпадает с пределом прочности и отличается лишь на 4-5%. При скорости деформирования 1 мм/мин предел текучести составляет 90% предела прочности льда, а при 0,5-0,1 мм/мин уже 80%. Снижение роли упругого деформирования льда при низких скоростях деформирования происходит в результате того, что в ходе такого испытания отдельные элементы льда успевают сдвинуться относительно друг друга без нарушения его связности – в большей мере развивается пластическая деформация. Основными механизмами ее реализации во льду служат: движение дислокаций в виде скольжения и двойникования, перемещения дислоцированных атомов и вакансий. Преимущественным видом пластического деформирования льда является скольжение, которое проявляется в виде смещения одной части кристалла относительно другой по кристаллографическим плоскостям. Этими плоскостями являются плоскости, наиболее плотно заполненные атомами – базисные (см. раздел 3.5). Скольжение вдоль базисных плоскостей происходит подобно сдвигу

колоды карт. В реальном льду развитие пластических деформаций облегчается наличием дефектов структуры в виде воздушных включений, примесей и др. [14, 17].

Рассмотренная зависимость упругости и пластичности льда визуально находит свое отражение в увеличении количества возникающих в образце трещин при увеличении скорости деформирования и наоборот. По результатам испытаний ультрапресного чистого льда со скоростью деформирования 4 мм/мин в образцах № 1 и № 2 зафиксировано лавинообразное разрушение льда, которое сопровождалось сильным помутнением образца за счет дробления кристаллов и образования множества трещин и сколов. Их количество настолько велико, что визуально образец практически не пропускает свет и при небольшом силовом воздействии крошится, распадается на части в руках. Образованные трещины проходят по всему образцу, их длину тяжело визуально оценить, при этом заметно, что некоторые из них имеют зияющий характер. Во время проведения экспериментов при высоких скоростях деформирования во льду отмечены акустические явления – громкий треск от пробегания трещин.

На рис. 78 представлен образец ультрапресного чистого льда после испытания со скоростью деформирования 4 мм/мин, остановка нагружения была проведена практически сразу после достижения предельной сдвиговой прочности.



Рис. 78. Образец ультрапресного чистого льда до и после испытания в условиях трехосного сжатия со скоростью деформирования 4 мм/мин при $\sigma_3 = 0,3$ МПа

При скорости деформирования 1 мм/мин в образце льда зафиксировано меньшее количество трещин – помутнение за счет дробления присутствует только в средней части.

Торцевые части образца также содержат трещины, однако их количество гораздо ниже, так что лед тут в некоторой степени сохраняет прозрачность. Визуально длина трещин варьирует от первых миллиметров до 4-5 см, они располагаются горизонтально, вертикально и наклонно (рис. 79).



Рис. 79. Образец ультрапресного чистого льда после испытания в условиях трехосного сжатия со скоростью деформирования 1 мм/мин при $\sigma_3 = 0,4$ МПа

Снижение скорости деформирования до 0,1 и 0,05 мм/мин привело к разрушению льда с еще меньшим количеством трещин. При скорости деформирования 0,1 мм/мин зафиксирована зона дробления в средней части образца, длина трещин тут составляет первые миллиметры. Остальная часть образца практически не содержит трещин (рис. 80). Исследование структурно-текстурных особенностей образца ультрапресного чистого льда после проведения испытания со скоростью деформирования 0,1 мм/мин представлено в разделе 3.4.

При скорости деформирования 0,05 мм/мин (результаты определения показателей физико-механических свойств данного образца в настоящей работе не приводятся) наблюдалось лишь незначительное количество трещин в зоне верхнего торца образца, остальная его часть полностью осталась прозрачной (рис. 80).



а)



б)

Рис. 80. Образцы ультрапресного чистого льда после испытаний в условиях трехосного сжатия при $\sigma_3 = 0,3$ МПа со скоростью деформирования:

а) 0,1 мм/мин, б) 0,05 мм/мин

Исследования механического поведения ледогрунта под нагрузкой показали схожие зависимости показателей физико-механических свойств от скорости деформирования (рис. 81). Так, при снижении скорости от 4 мм/мин (образец № 21) до 0,1 мм/мин (образец № 25) предел сдвиговой прочности падает на 50% с 6,5 МПа до 3,4 МПа. Разрушение ледогрунта при скорости деформирования 4 мм/мин ($\sigma_3=0,3$ МПа) и 1 мм/мин ($\sigma_3=0,4$ МПа) произошло при схожих значениях деформации – относительная продольная деформация в обоих случаях составила 2%, а сдвиговая 0,7% и 0,6% соответственно. Снижение скорости деформирования до 0,1 мм/мин ($\sigma_3=0,3$ МПа) способствовало увеличению накопленных деформаций ледогрунта как на момент достижения пластичности, так и разрушения – относительная продольная деформация составила 2,3% и 2,9%, а сдвиговая 0,84% и 1,0% соответственно (рис. 81), (табл. 41).

Увеличение скорости деформирования с 4 мм/мин (образец № 21) до 0,1 мм/мин (образец № 25) приводит к сокращению модуля сдвига на около 70% – с 763 МПа до 205 МПа (приложение 6). Предел текучести льда при скорости деформирования 4 мм/мин составил около 90% предела прочности, а при скоростях 1 мм/мин и 0,1 мм/мин снижается в среднем до 85% предела прочности (табл. 41).

Характер деформирования и разрушения ледогрунта аналогичен ультрапресному чистому льду. В образце ледогрунта после испытания со скоростью деформирования 4 мм/мин возникло помутнение за счет образования множества трещин в слоях чистого льда и льда с включениями пылеватого песка. В последних отмечено большое количество мелких вертикальных трещин, длина которых колеблется от первых миллиметров до 10 мм. Слоистое строение ледогрунта позволяет рассмотреть образованные трещины на нижнем и верхнем торцах образца в слоях чистого льда за счет подстилающего непрозрачного слоя. Так, на торцевых частях образца зафиксированы секущие, радиальные трещины длиной до 1,5-2 см, при этом весь слой льда оказался пронизан очень мелкой сеточкой трещин (рис. 82).

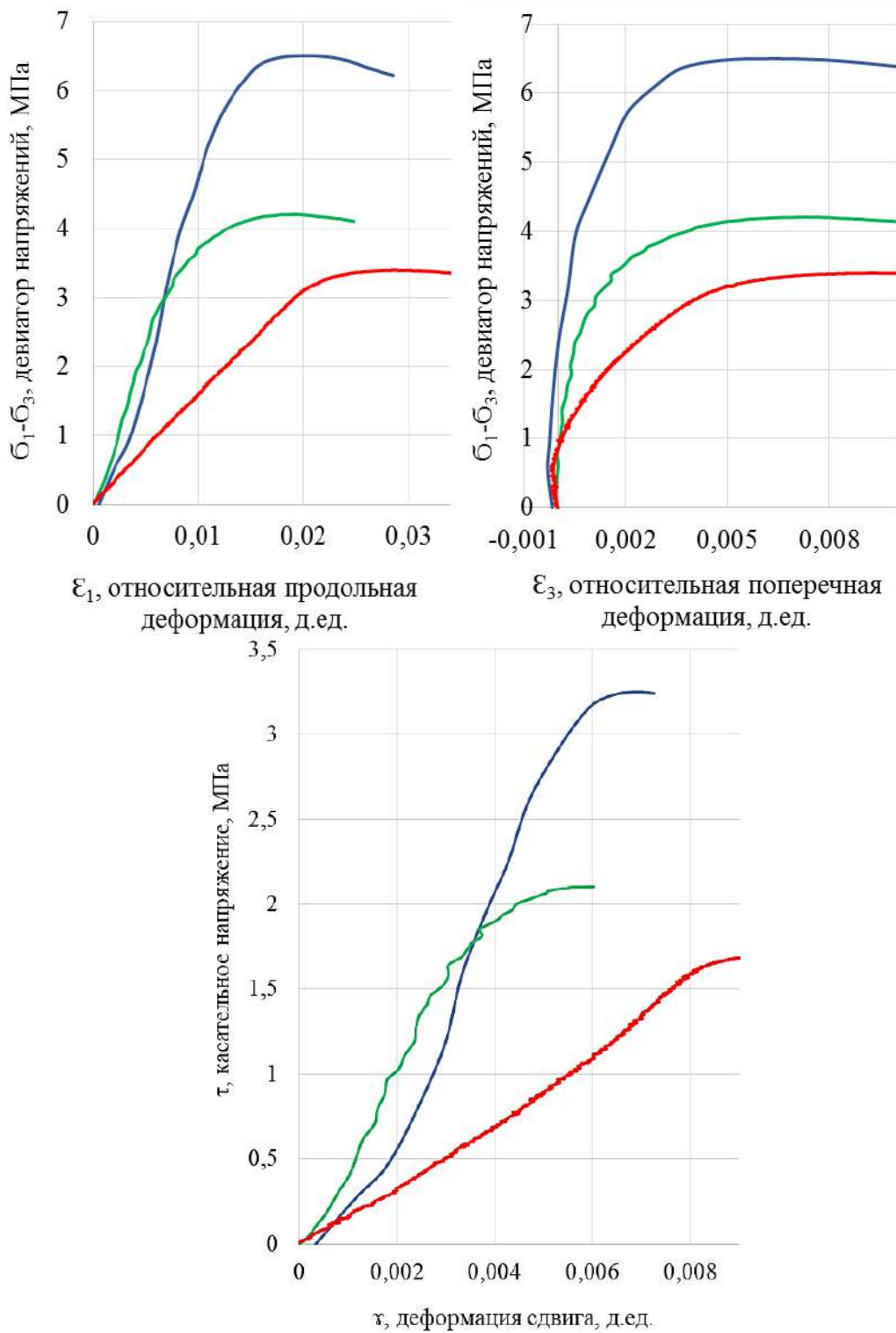


Рис. 81. Результаты испытаний трехосного сжатия ледогрунта по быстрой схеме нагружения при разной скорости деформирования



Рис. 82. Образец ледогрунта после испытания в условиях трехосного сжатия со скоростью деформирования 4 мм/мин при $\sigma_3 = 0,3$ МПа

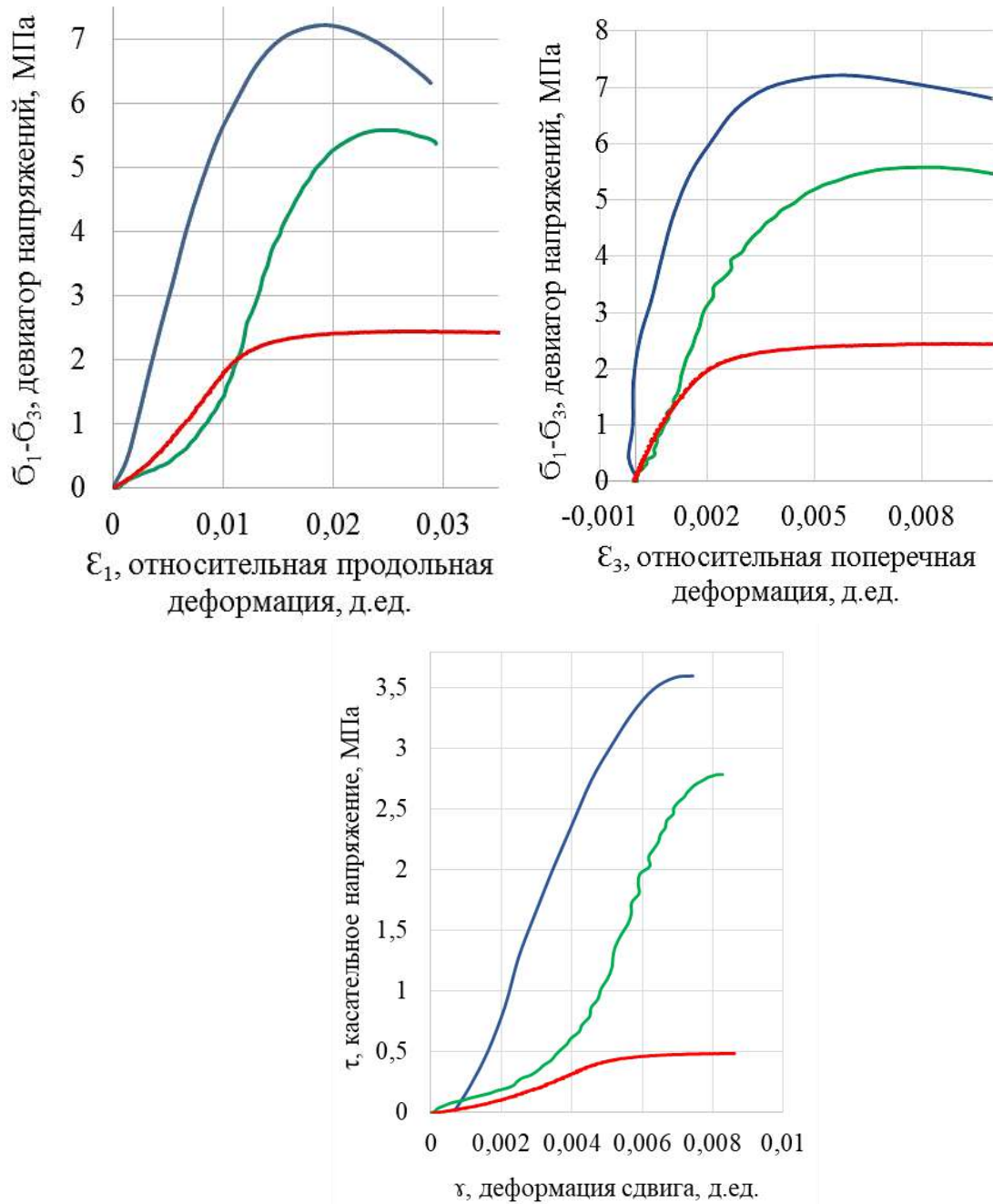
В образце ледогрунта после испытания со скоростью деформирования 1 мм/мин некоторые из слоев льда и льда с примесью грунта визуально не содержат трещин. Боковая поверхность образца осталась гладкой, местами сохранилась прозрачность. Наибольшее трещинообразование зафиксировано на верхнем торце образца, тут сформировалось похожее мелкосетчатое распределение нарушений. От края торца к центру образца в некоторых местах отмечены удлиненные трещины до 1,5 см. Визуально в слоях льда с примесью пылеватого песка не замечено хрупких нарушений. Интересно, что при сравнении образцов ледогрунта и ультрапресного чистого льда после проведения испытаний со скоростью деформирования 1 мм/мин у первого из них было обнаружено гораздо меньшее количество трещин (рис. 83).



Рис. 83. Образец ледогрунта после испытания в условиях трехосного сжатия со скоростью деформирования 1 мм/мин при $\sigma_3 = 0,4$ МПа

Испытания трехосным сжатием слабосоленого чистого льда в целом показали схожие зависимости. Только по одному из образцов № 34, испытанному со скоростью деформирования 0,1 мм/мин, получены существенно более низкие показатели прочности. Так, при увеличении скорости от 4 мм/мин до 0,1 мм/мин падение предела прочности составило более 65%.

При скорости деформирования 4 мм/мин предел текучести слабосоленого чистого льда составляет более 90% предела прочности, а при 1 и 0,1 мм/мин падает до около 80% предела прочности (рис. 84).



- образец № 32, скорость деформирования 4 мм/мин, $\sigma_3=0,3$ МПа,
- образец № 29, скорость деформирования 1 мм/мин, $\sigma_3=0,4$ МПа,
- образец № 34, скорость деформирования 0,1 мм/мин, $\sigma_3=0,3$ МПа

Рис. 84. Результаты испытаний трехосного сжатия слабосоленого чистого льда по быстрой схеме нагружения при разной скорости деформирования

Модуль сдвига слабосоленого чистого льда при скорости деформирования 4 мм/мин (образец № 32) составил 688 МПа, при снижении скорости в 4 раза до 1 мм/мин (образец № 29) наблюдалось незначительное его падение до 677 МПа. Наиболее низкая сдвиговая

жесткость отмечена при скорости деформирования 0,1 мм/мин (образец № 34), здесь модуль сдвига составил 172 МПа (приложение 6).

В связи с тем, что образцы слабосоленого чистого льда были непрозрачными, тяжело было визуально оценить характер нарушений их сплошности после испытаний. На рис. 85 представлен образец, испытанный со скоростью деформирования 4 мм/мин, – в нем при увеличении просматривается множество трещин, по торцевой части видны удлиненные вертикальные трещины длиной до 1 см.



Рис. 85. Образец слабосоленого чистого льда после испытания в условиях трехосного сжатия со скоростью деформирования 4 мм/мин при $\sigma_3 = 0,3$ МПа

На рис. 86 приведены примеры графиков зависимости относительных объемных деформаций от продольных трех типов льда. По ним видно, что в ходе девиаторного нагружения у льда не зафиксирована способность к разуплотнению – угол дилатансии оказался близок к 0° . Такой результат был получен при всех скоростях деформирования – от 4 мм/мин до 0,1 мм/мин (рис. 86).

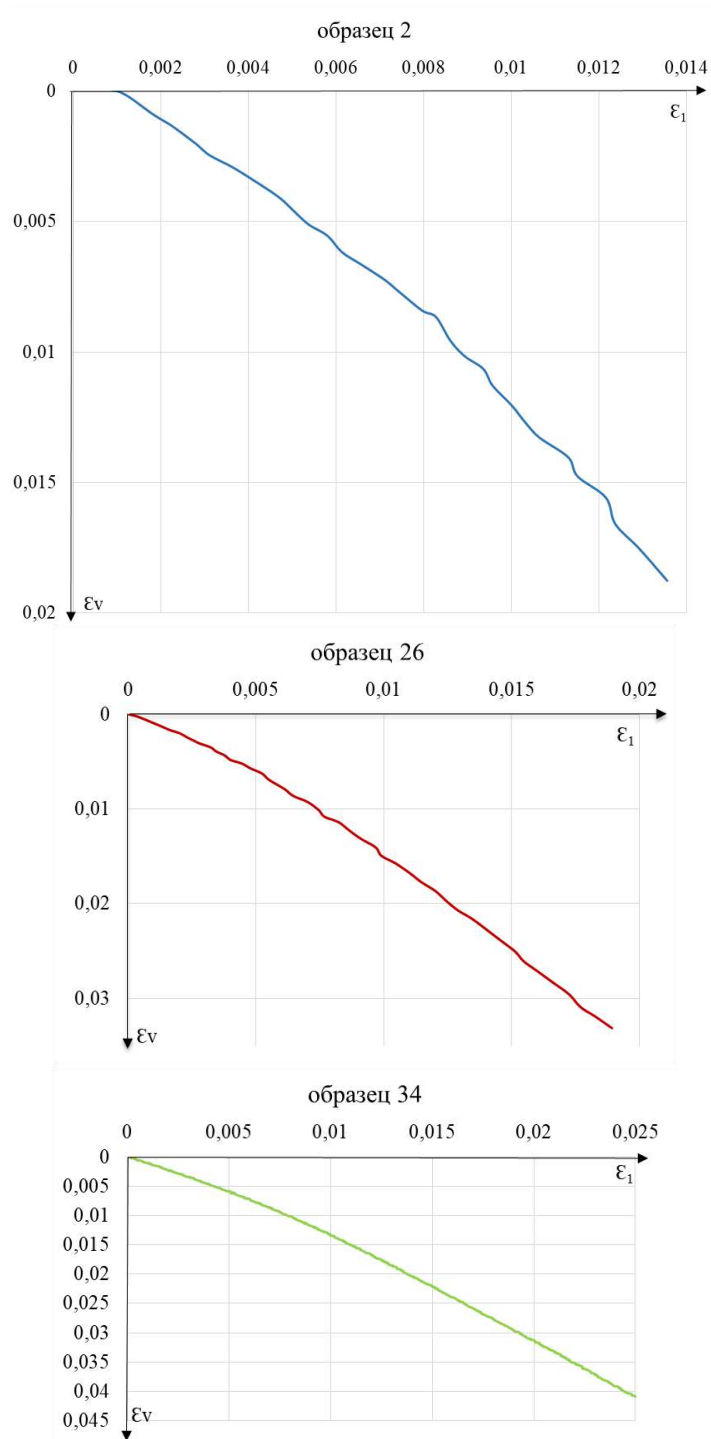


Рис. 86. Некоторые из графиков зависимости относительных объемных от продольных деформаций по результатам испытаний трехосного сжатия трех типов льда

При выполнении исследований было замечено, что многие образцы льда после деформирования с высокой скоростью оказывались влажными. Это наблюдалось при их изъятии из камеры трехосного сжатия – нагрузочный штамп, а также пьедесталы были покрыты слоем воды. В первоначальный момент времени возникло предположение о нарушении целостности латексной оболочки в ходе проведения испытаний. Однако рассматриваемый эффект повторялся из раза в раз, и после тщательной проверки герметичности оболочек предыдущий вариант был отвергнут. Наблюдаемое явление, вероятно, связано с плавлением льда под нагрузкой. Так, в ходе испытаний быстровозрастающей нагрузкой на контактах кристаллов льда образуется повышенное давление, которое способствует плавлению льда и образованию излишек воды на поверхности образца. Данный процесс можно наблюдать и при длительном приложении нагрузки, однако в этом случае уже успевает развиваться режеляция – перемещение воды из более в менее напряженную зону и повторное ее замерзание.

Таблица 41. Результаты испытаний трехосного сжатия трех типов льда по быстрой схеме нагружения

№	Тип льда	v, мм/мин	σ_3 , МПа	$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	G, МПа	E_0 , МПа	v	Предел текучести		Предел прочности		ψ , °
								q, МПа	γ , д.ед.	q, МПа	γ , д.ед.	
1	ЧЛ	4	0,3	8,8	1333	579,5	0,32	8,3	0	8,8	0,005	0
2	ЧЛ	4	0,3	8,4	1030	611	0,22	8,1	0	8,4	0,005	0
28	ЧЛ	1	0,4	5,76	928	402	0,35	5,08	0	5,76	0,005	0
3	ЧЛ	0,5	0,3	5,47	702	400	0,35	4,3	0	5,47	0,004	0
31	ЧЛ	0,1	0,3	4,29	605	304	0,27	3,5	0	4,29	0,006	0
21	ЛГ	4	0,3	6,5	763	338	0,31	5,73	0	6,5	0,007	0
26	ЛГ	1	0,4	4,2	504	230	0,37	3,38	0	4,2	0,0055	0
25	ЛГ	0,1	0,3	3,4	205	146	0,26	3,06	0	3,4	0,009	0
32	СЛ	4	0,3	7,2	688	365	0,31	6,60	0	7,2	0,007	0
29	СЛ	1	0,4	5,58	677	236	0,31	4,9	0	5,58	0,008	0
34	СЛ	0,1	0,3	2,44	172	147	0,25	1,95	0	2,44	0,009	0

Примечание 1: ЧЛ – ультрапресный чистый лед; ЛГ – ледогрунт; СЛ – слабосоленый чистый лед.

Примечание 2: v – скорость деформирования; σ_3 – всестороннее давление; $\sigma_1 - \sigma_3$ – девиатор разрушения; G – модуль сдвига; E_0 – модуль общей деформации; v – коэффициент относительного поперечного расширения; q – девиатор напряжений; γ – относительная деформация сдвига; ψ – угол дилатансии.

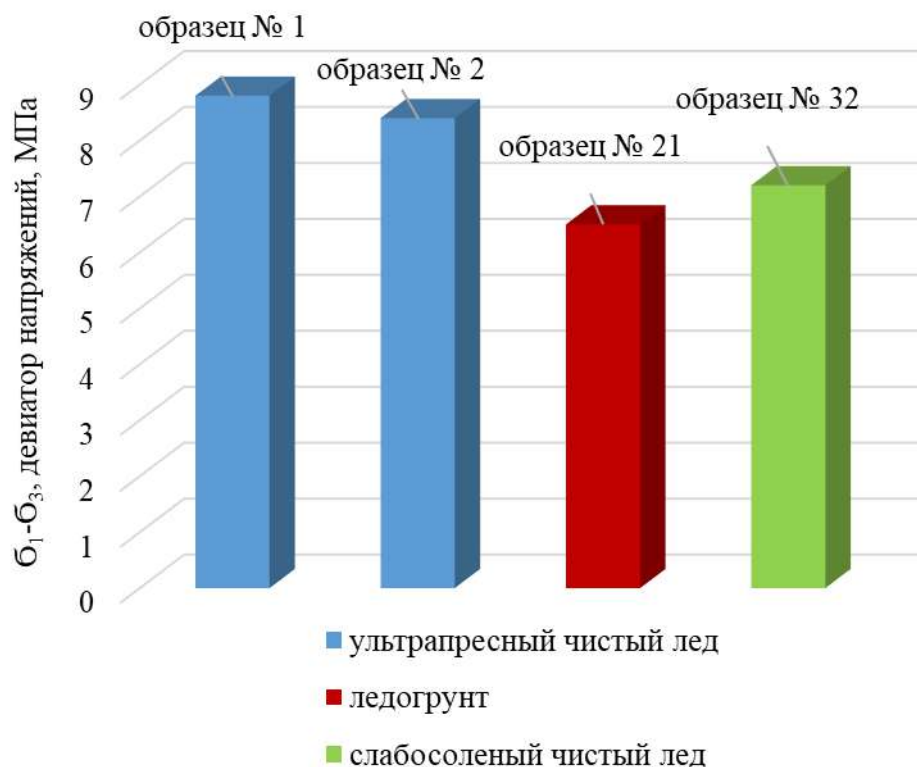
Примечание 3: данные по составу и строению образцов льда приведены в разделе 3.1.

Примечание 4: данные по схемам испытаний приведены в табл. 36.

По результатам быстрых испытаний обнаружено влияние состава и строения льда на показатели его физико-механических свойств. Так, ультрапресный чистый лед оказался более прочным и менее деформируемым, чем ледогрунт. В среднем сдвиговая прочность последнего в зависимости от скорости деформирования была ниже на 20-25%, а сдвиговая

жесткость на 25-65%. Со снижением скорости деформирования разница в некоторых показателях физико-механических свойств увеличивалась. Например, при скорости деформирования 4 мм/мин модуль сдвига ультрапресного чистого льда был выше на 25%, при скорости 1 мм/мин – на 45%, а при 0,1 мм/мин – на 65%. Вероятно, при быстром возрастании нагрузки наличие минеральных примесей и слоистое строение льда приводит к ослаблению сопротивления деформированию и концентрации напряжений на контактах слоев. Снижение прочности льда при добавлении в него грунтовых частиц в быстрых испытаниях также наблюдали зарубежные коллеги L. Arenson и S. Springman. Они выяснили, что в зависимости от процентного содержания минеральных частиц прочность льда либо снижается, либо увеличивается – при добавлении около 20% минеральных примесей в лед его прочность снижалась на фоне чистого льда без примесей [77].

При сравнении результатов испытаний ультрапресного чистого льда и слабосоленого чистого льда последний из них оказался менее прочным и более деформируемым. При этом разница в их сдвиговой прочности и жесткости зависела от скорости деформирования. Наименьшее отличие в их механическом поведении наблюдалось при скорости деформирования 1 мм/мин – расхождение в сдвиговой прочности составило 4%, а в модуле сдвига – 30%. При скорости деформирования 0,1 мм/мин показатели прочности и деформируемости имели большую разницу (табл. 41, рис. 87, приложения 6).



а) 4 мм/мин

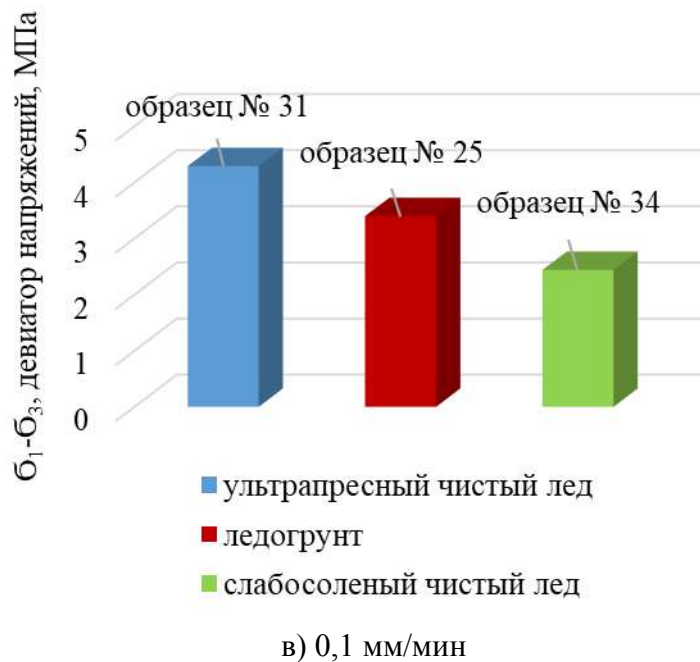
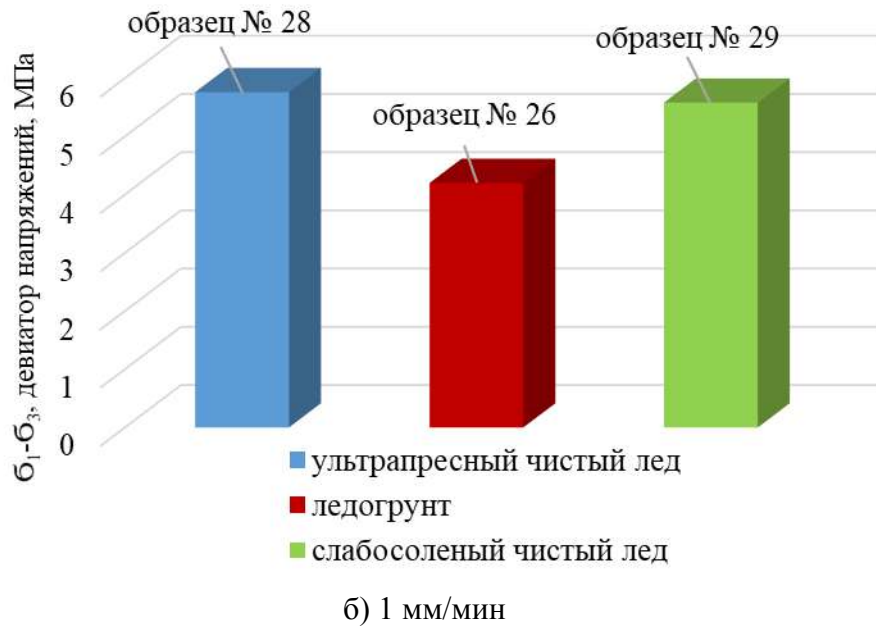


Рис. 87. Девииатор разрушение трех типов льда при разных скоростях деформирования

Длительные статические испытания

На рис. 88 представлены кривые ползучести ультрапресного чистого льда по результатам испытания при всестороннем давлении 0,5 МПа (образец № 4). На первых 3-х ступенях нагрузки скорость продольной деформации за последние 4 ч не превышает 0,01 мм/ч – наклон кривых ползучести практически отсутствует, что отчетливо видно при их сравнении с предельным по критической линии (см. раздел 3.2). При увеличении девиатора напряжений до 1,0 МПа на 4 ступени устанавливается постоянная скорость продольной деформации около 0,01 мм/ч. Дальнейшее увеличение девиатора напряжений

до 1,25 МПа и 1,5 МПа привело к течению с большей, но постоянной скоростью, которая на 6 ступени достигла 0,04-0,05 мм/ч и более. Таким образом, условный предел длительной прочности ультрапресного чистого льда при всестороннем давлении 0,5 МПа установлен при девиаторе напряжений 0,75 МПа.

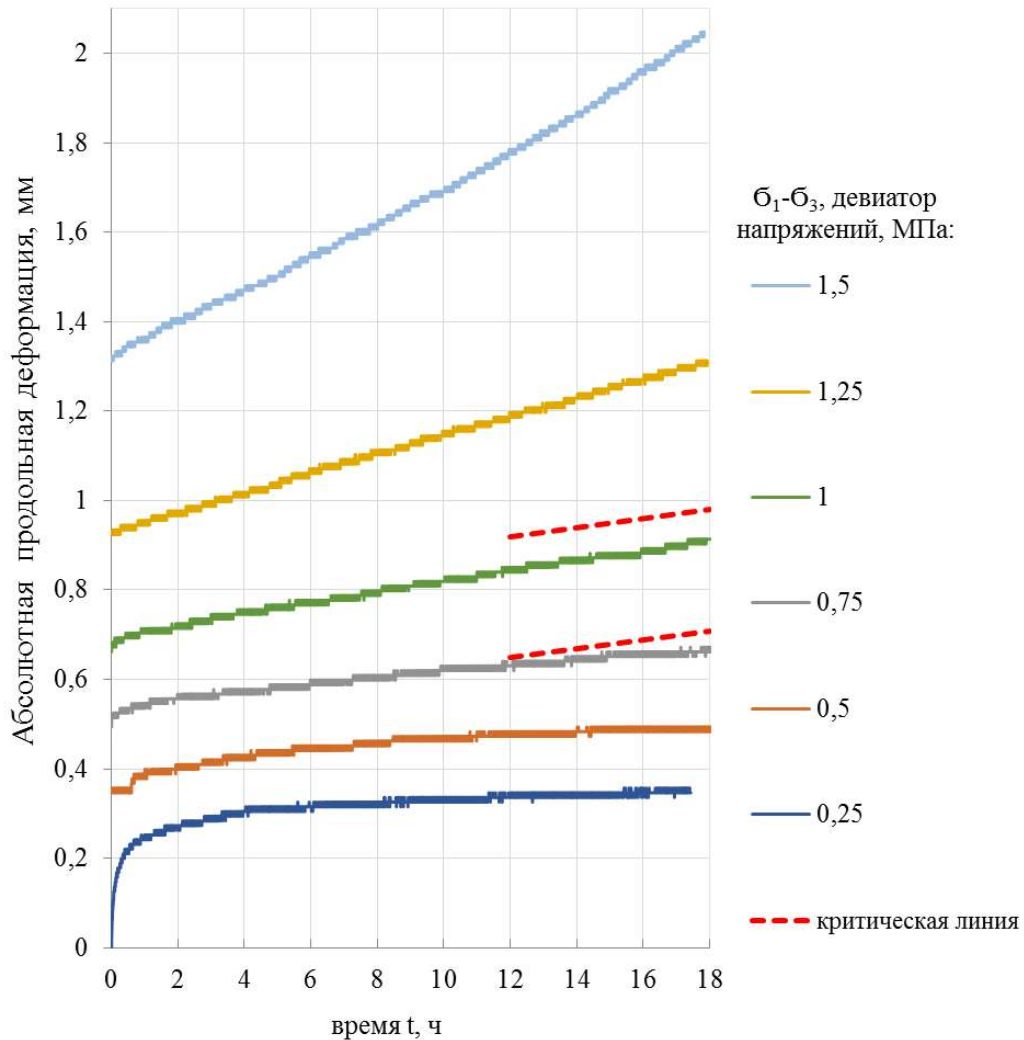


Рис. 88. Результаты испытания трехосного сжатия ультрапресного чистого льда (образец № 4) при всестороннем давлении 0,5 МПа, 1-6 ступени

Наблюдаемое деформирование льда под действием постоянной нагрузки сопровождается двумя параллельными процессами – восстановлением связей и их нарушением. Так, изменение формы и ориентации кристаллов, рост менее напряженных кристаллов за счет более напряженных и залечивание образованных микротрещин приводят к увеличению жесткости льда. Нарушение внутренних связей между пластинками внутри кристаллов и между самими кристаллами, переориентация кристаллов базисными плоскостями вдоль плоскости сдвига и др. способствует разупрочнению льда. При небольшом уровне напряжений во льду преобладает восстановление связей, когда скорость деформации постепенно снижается до пренебрежимо малого уровня [14, 17]. Затем при

увеличении напряжений доля разупрочнения растёт, и лёд начинает вязко течь с постоянной скоростью деформации, что было явно зафиксировано на 4-6 ступенях испытания ультрапресного чистого льда образца № 4.

При испытании образца № 4 удалось достичь стадии прогрессирующего течения льда с постоянно возрастающей скоростью продольной деформации. Она была зафиксирована при девиаторе напряжений 1,75 МПа на 7 ступени нагружения спустя примерно 108 ч после начала эксперимента. Так, на 7 ступени за 18 ч продольная деформация образца составила около 3,5 мм. Здесь уже преобладал процесс значительного расслабления льда и интенсивное нарушение его внутренних связей (рис. 89). Интересно, что даже после перехода деформирования в стадию прогрессирующего течения образец льда сохранил прозрачность, но значительно изменил свою форму (рис. 90). Подробное исследование влияния длительного нагружения на структуру ультрапресного чистого льда приведено в разделе 3.4.

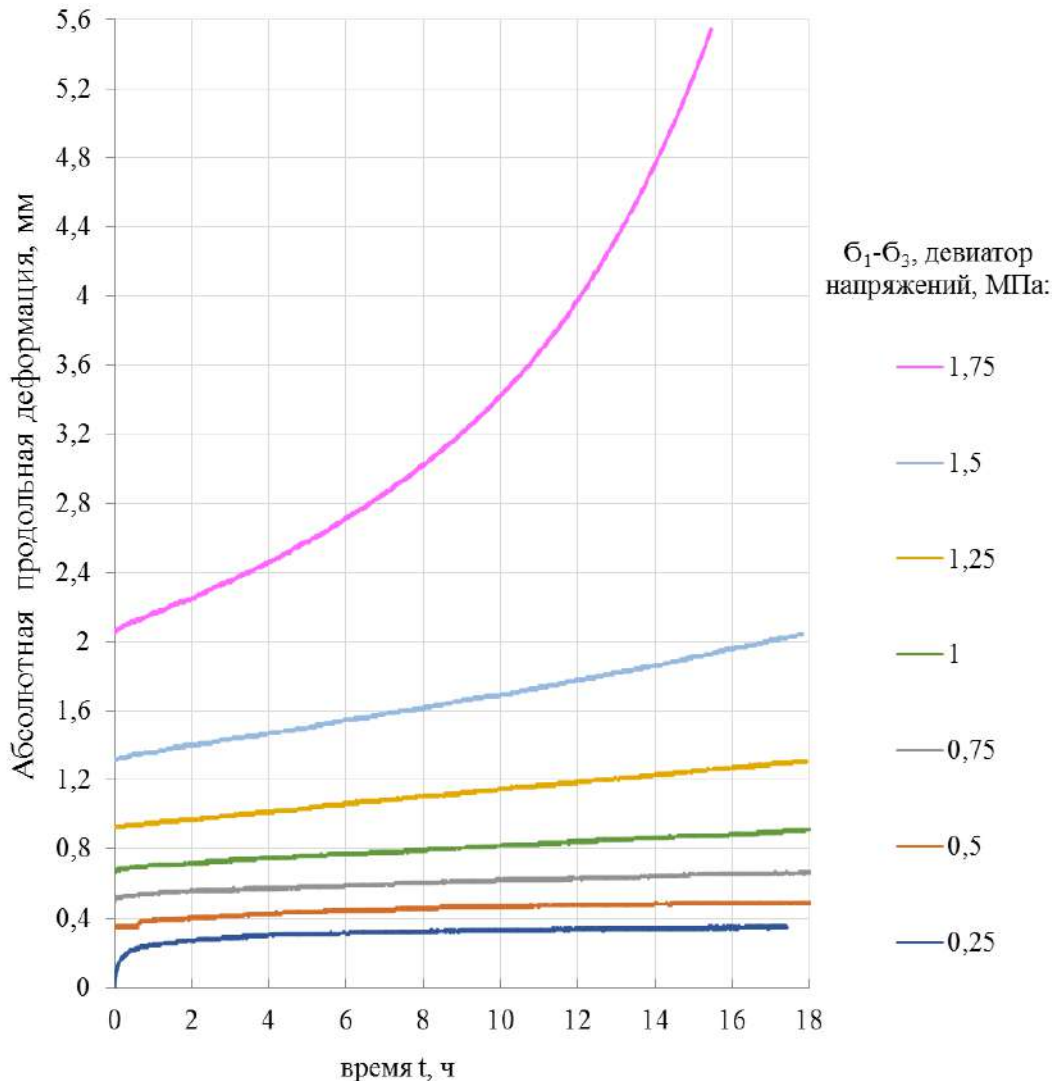


Рис. 89. Результаты испытания трехосного сжатия ультрапресного чистого льда (образец № 4) при всестороннем давлении 0,5 МПа, 1-7 ступени



Рис. 90. Ультрапресный чистый лед до и после длительного испытания в условиях трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,5 МПа

При испытании ультрапресного чистого льда со всесторонним давлением 0,1 МПа (образец № 15) деформирование со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч зафиксировано при девиаторе напряжений 0,7 МПа. За условный предел длительной прочности принят уровень девиатора напряжений 0,6 МПа. Интересно, что более чем за 180 ч испытания до девиатора напряжений 1,1 МПа деформирование льда так и не перешло в стадию прогрессирующего течения, на каждой из ступеней наблюдалось течение с постоянной скоростью деформации (рис. 91, 92).

Подобный процесс длительного деформирования льда с постоянной скоростью без перехода к прогрессирующему течению отмечен К.Ф. Войтковским при опытах по кручению цилиндрических образцов искусственно замороженного льда. В отдельных экспериментах при касательных напряжениях до 0,1 МПа и температуре $-1,8^{\circ}\text{C}$ течение с постоянной скоростью установилось через 50-100 ч и продолжалось до 5000 ч (около 7 месяцев). При этом в ходе такого длительного деформирования не отмечено тенденции как к повышению скорости деформирования, так и к ее затуханию (К.Ф. Войтковский, 1957).

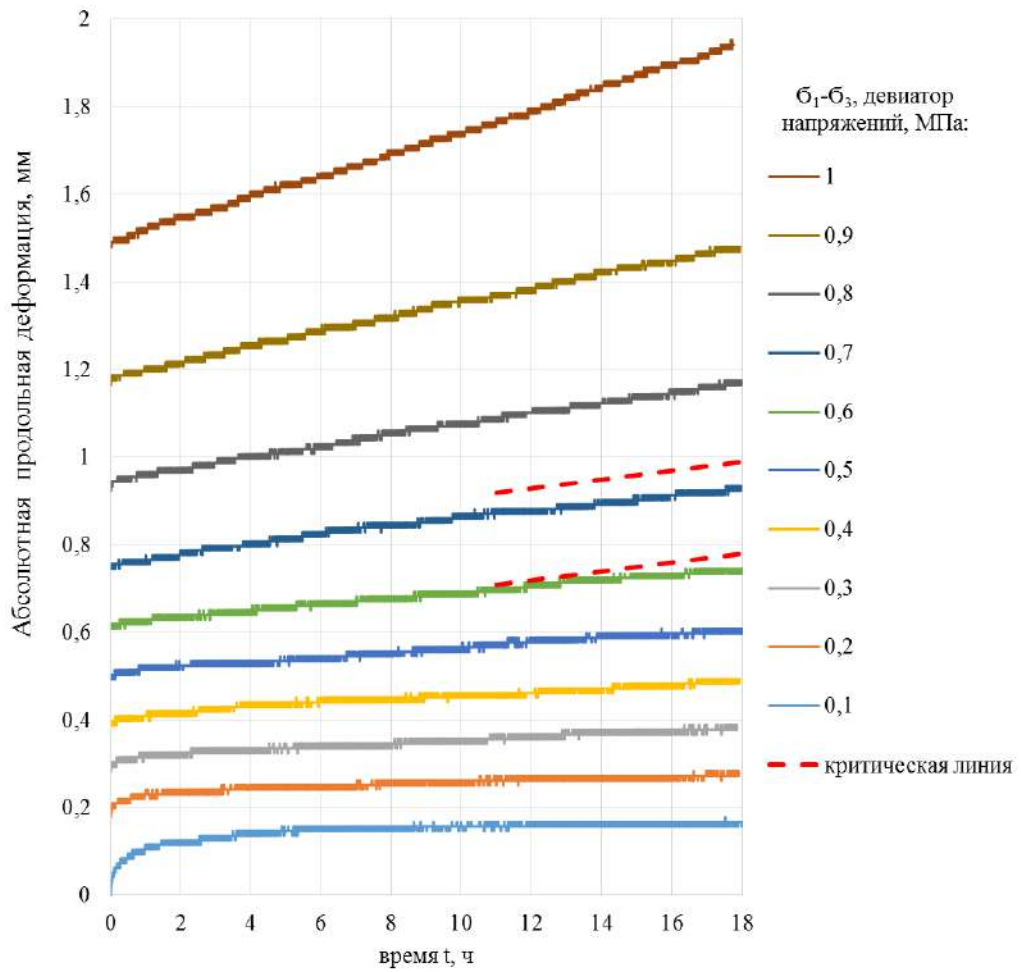


Рис. 91. Результаты испытания трехосного сжатия ультрапресного чистого льда (образец № 15) при всестороннем давлении 0,1 МПа



Рис. 92. Ультрапресный чистый лед до и после (образец № 15) длительного испытания в условиях трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,1 МПа

По кривым ползучести ультрапресного чистого льда при всестороннем давлении 0,3 МПа (образец № 13) виден схожий характер деформирования. До уровня девиатора напряжений 0,6 МПа зафиксировано деформирование со скоростью продольной деформации менее 0,01 мм/ч. Увеличение напряжений до 0,75 МПа привело к пластично-вязкому течению льда с постоянной скоростью продольной деформации около 0,01-0,02 мм/ч. Дальнейшее увеличение девиатора напряжений до 1,05 МПа способствовало течению с большей, но постоянной на ступенях, скоростью деформации 0,03-0,04 мм/ч и более. За условный предел прочности принято значение девиатора напряжений 0,6 МПа (рис. 93).

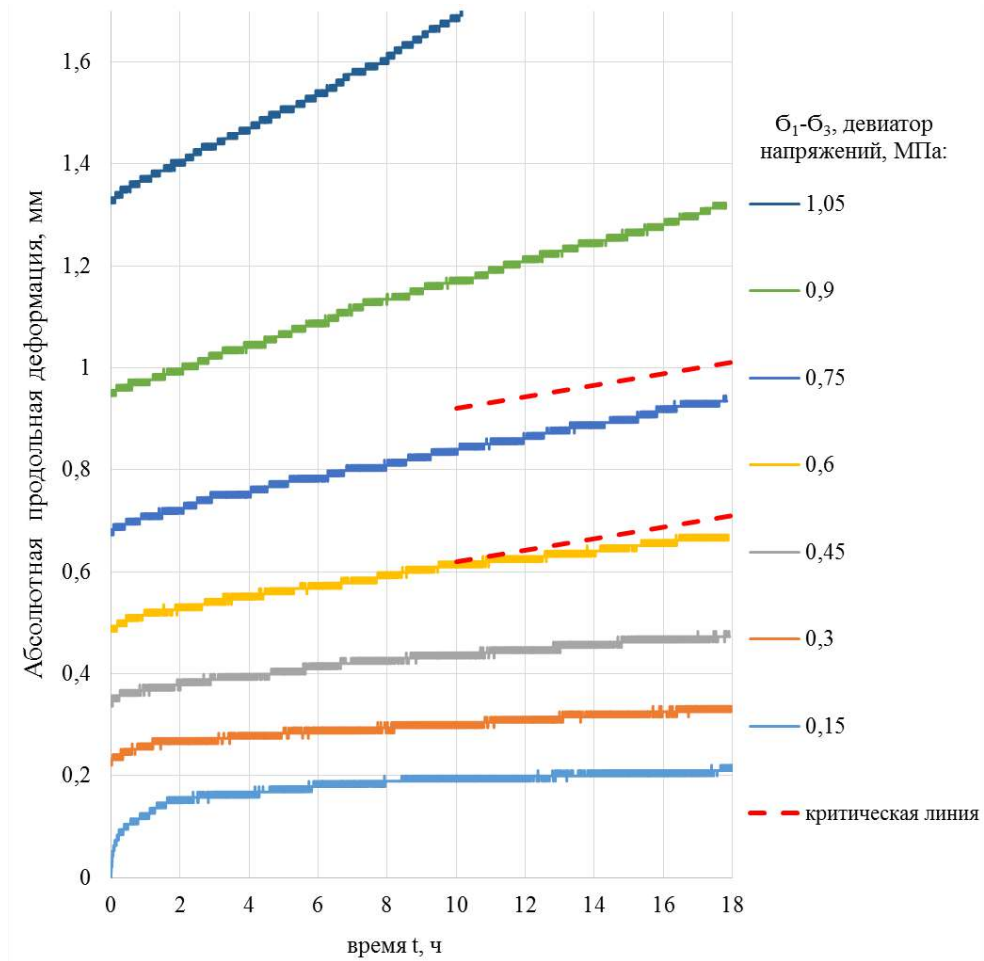


Рис. 93. Результаты испытания трехосного сжатия ультрапресного чистого льда (образец № 13) при всестороннем давлении 0,3 МПа

Результаты испытания ультрапресного чистого льда при всестороннем давлении 0,3 МПа (образец № 13) использованы для получения параметров ползучести A , m , n . На основании формул (5), (6), (7) определено изменение эквивалентной деформации ползучести $\dot{\epsilon}^{cr}$ с течением времени при каждом уровне эквивалентного напряжения

ползучести $\dot{\epsilon}^{cr}$ (3) (рис. 94). Получена зависимость эквивалентной скорости деформации ползучести $\dot{\epsilon}^{cr}$ (4) от времени для каждой ступени нагружения.

На рис. 94 видно, что на ступенях 2-6 отсутствует заметный спад скорости эквивалентной деформации ползучести с течением времени. Лишь на 1 ступени отмечается некоторое ее снижение. Это говорит о том, что при переходе на новую ступень достаточно быстро возникает установившаяся ползучесть с постоянной эквивалентной скоростью, которая с течением времени изменяется незначительно. В зависимости от уровня напряжений она либо пренебрежимо мала, как на первых ступенях нагрузки, либо значительна, как на последних. Такую особенность деформирования льда, вероятно, можно объяснить его низкой способностью к упрочнению с течением времени. Так, для параметра ползучести m , отвечающего за упрочнение материала с течением времени, получено достаточно низкое значение равное $-0,26$. Параметр ползучести A , характеризующий величину предельной скорости деформации при постоянном напряжении, оказался высоким и достиг $2,70 \cdot 10^{-6}$. Значение параметра n на основании аппроксимации составило $1,14$.

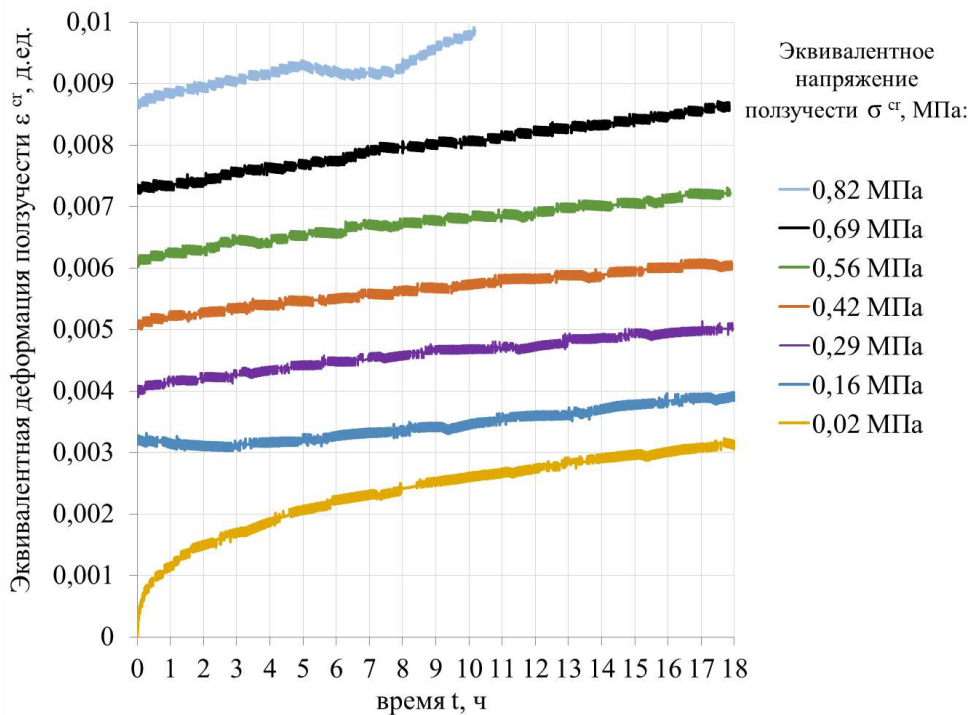


Рис. 94. Эквивалентная деформация ползучести ультрапресного чистого льда (образец № 13) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,3 МПа

Испытания трехосным сжатием ледогрунта показали несколько иной характер механического поведения под нагрузкой. На рис. 95 представлены кривые ползучести ледогрунта при всестороннем давлении 0,5 МПа (образец № 12). На первых 5 ступенях наблюдалось деформирование со скоростью продольной деформации менее 0,01 мм/ч. При

увеличении девиатора напряжений до 1,2 МПа скорость продольной деформации достигла 0,02 мм/ч. Дальнейшее увеличение девиатора напряжений до 1,4-1,8 МПа привело к течению со значительной, но постоянной скоростью. Так, например, при величине напряжения 1,6 МПа зафиксирована установившаяся ползучесть со скоростью продольной деформации 0,08 мм/ч, а при 1,8 МПа уже 0,24 мм/ч! Примечательно, что при таких высоких скоростях, когда продольная деформации образца уже достигла 7 мм, до сих пор наблюдалась стадия установившегося течения (рис. 95).

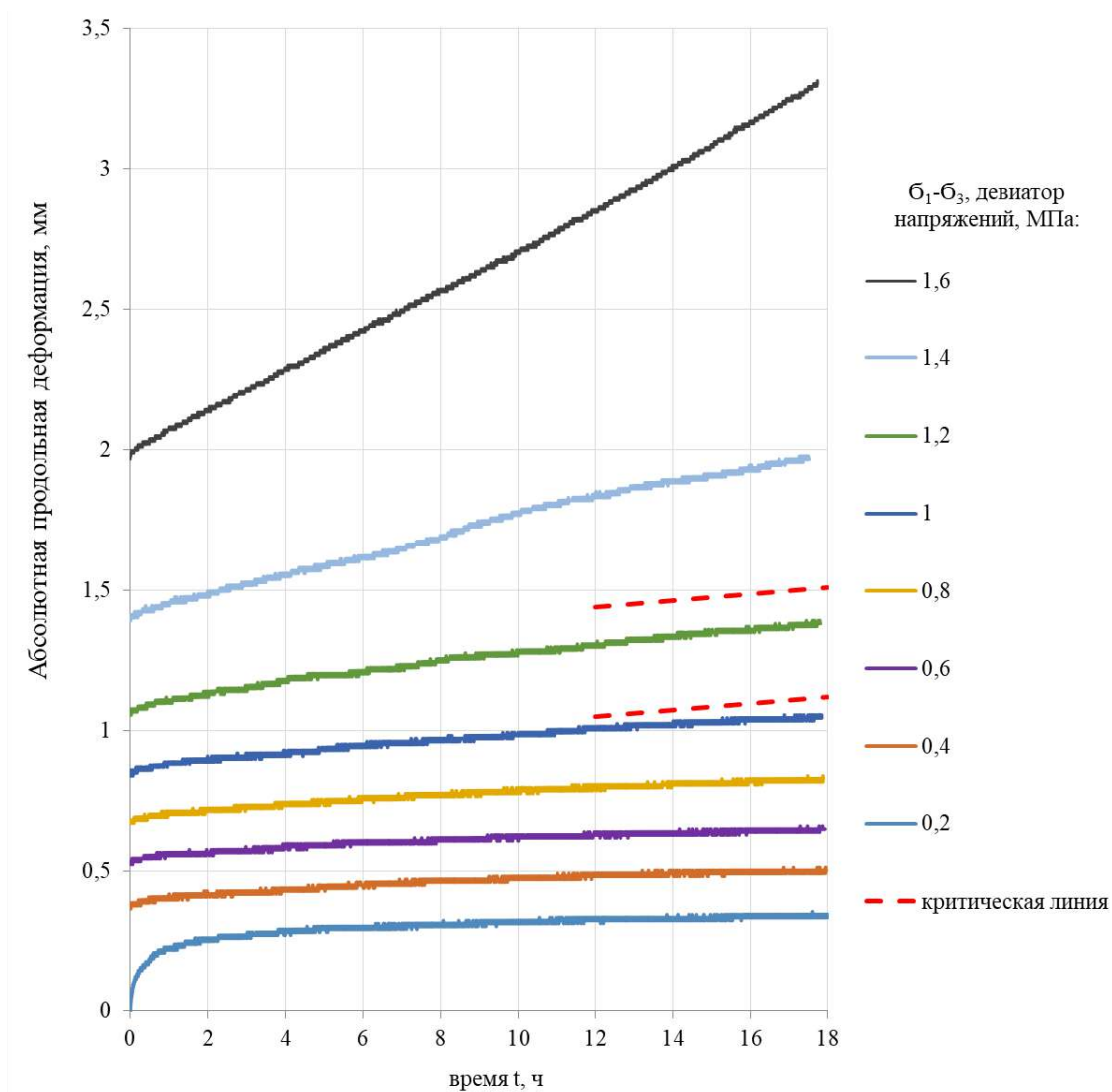


Рис. 95. Результаты испытания трехосного сжатия ледогрунта (образец № 12) при всестороннем давлении 0,5 МПа, 1-8 ступени

Испытание образца № 12 продолжалось до достижения примерно 19% продольной деформации (около 18,3 мм), общая продолжительность испытания составила около 180 ч (более 7 дней). Однако даже на высоких ступенях нагрузки зафиксирована установившаяся ползучесть. Так, на последней 10-ой ступени при девиаторе напряжений 2 МПа установилась чрезвычайно высокая, но постоянная скорость деформации равная 0,6 мм/ч, а

перехода деформирования в стадию прогрессирующего течения так и не произошло (рис. 96). Из этого следует, что лед может пластично-вязко течь с очень высокими скоростями деформации и до перехода в стадию нелинейной ползучести, при этом величина скорости будет определяться действующим напряжением. Оценка длительной прочности льда по напряжению перехода в прогрессирующую ползучесть (в данном случае деформации превысили бы 20%) привела бы к сильному ее завышению и снижению достоверности дальнейшего прогноза изменения НДС грунтовых толщ. Условный предел длительной прочности ледогрунта при всестороннем давлении 0,5 МПа принят при девиаторе напряжений 1 МПа (рис. 95, 96).

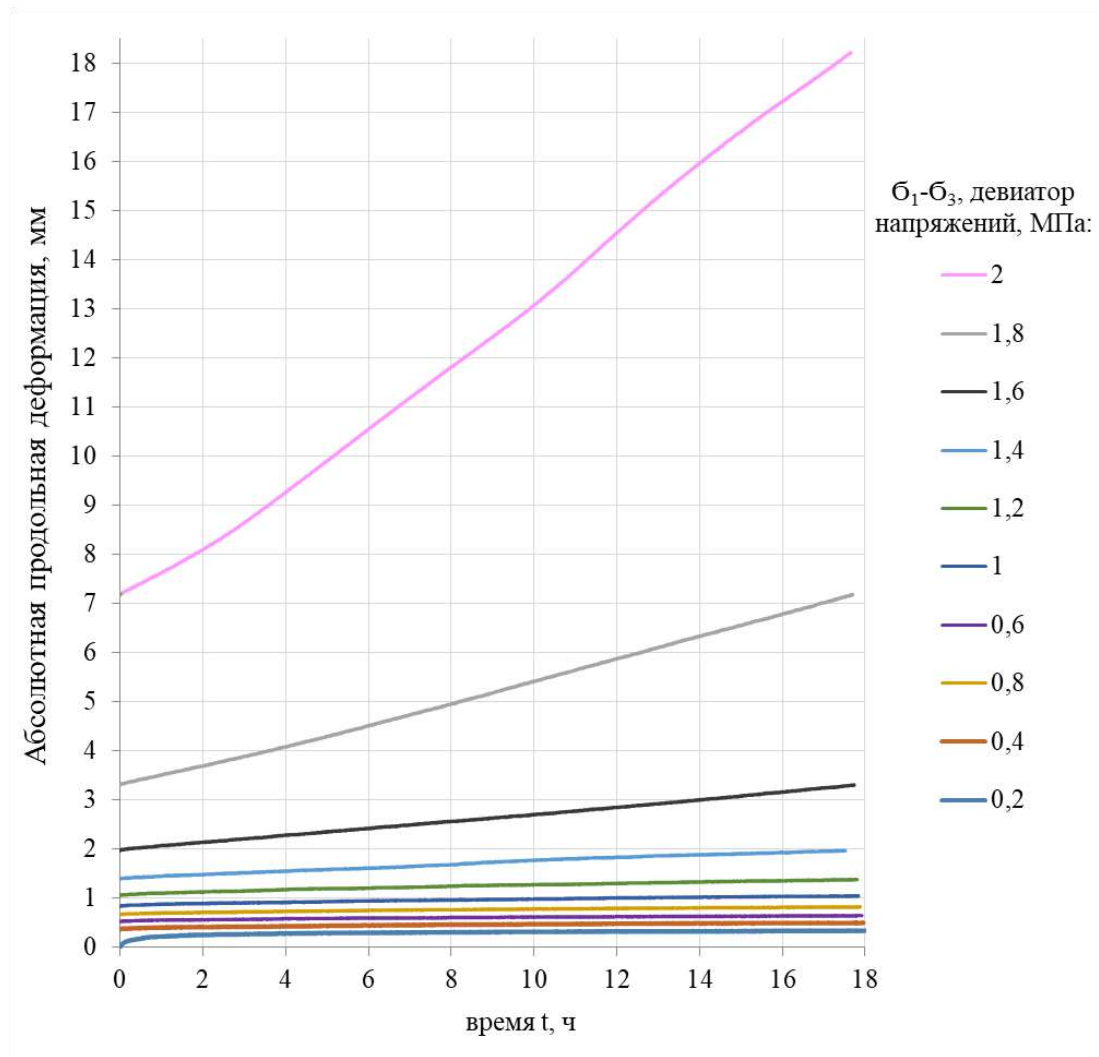


Рис. 96. Результаты испытания трехосного сжатия ледогрунта (образец № 12) при всестороннем давлении 0,5 МПа, 1-10 ступени

Вид образца № 12 после испытания трехосным сжатием при всестороннем давлении 0,5 МПа приведен на рис 97. Наблюдаемое искажение формы образца (в виде «бочки») указывает на вязкий тип разрушения льда в длительных испытаниях. Слои чистого льда и льда с примесью грунта сохранили свою субгоризонтальность. Первые из них

характеризуются прежней прозрачностью и отсутствием каких-либо трещин (рис. 97). Более подробное исследование влияния длительного нагружения на структурно-текстурные особенности ледогрунта образца № 12 приведены в разделе 3.4.



Рис. 97. Образец ледогрунта № 12 после длительного испытания в условиях трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,5 МПа

На рис. 98 представлены кривые ползучести ледогрунта при всестороннем давлении 0,1 МПа (образец № 19). Определено, что на 1-8 ступенях нагрузки скорость продольной деформации составляет менее 0,01 мм/ч. При увеличении девиатора напряжений до 0,9 МПа и выше зафиксировано течение с постоянной скоростью деформации, которая на 10 ступени достигает 0,03-0,04 мм/ч. За 180 ч испытания продольная деформация образца составила около 3,2 мм, стадия прогрессирующей ползучести не была достигнута. Условный предел длительной прочности установлен при девиаторе напряжений 0,8 МПа (рис. 98).

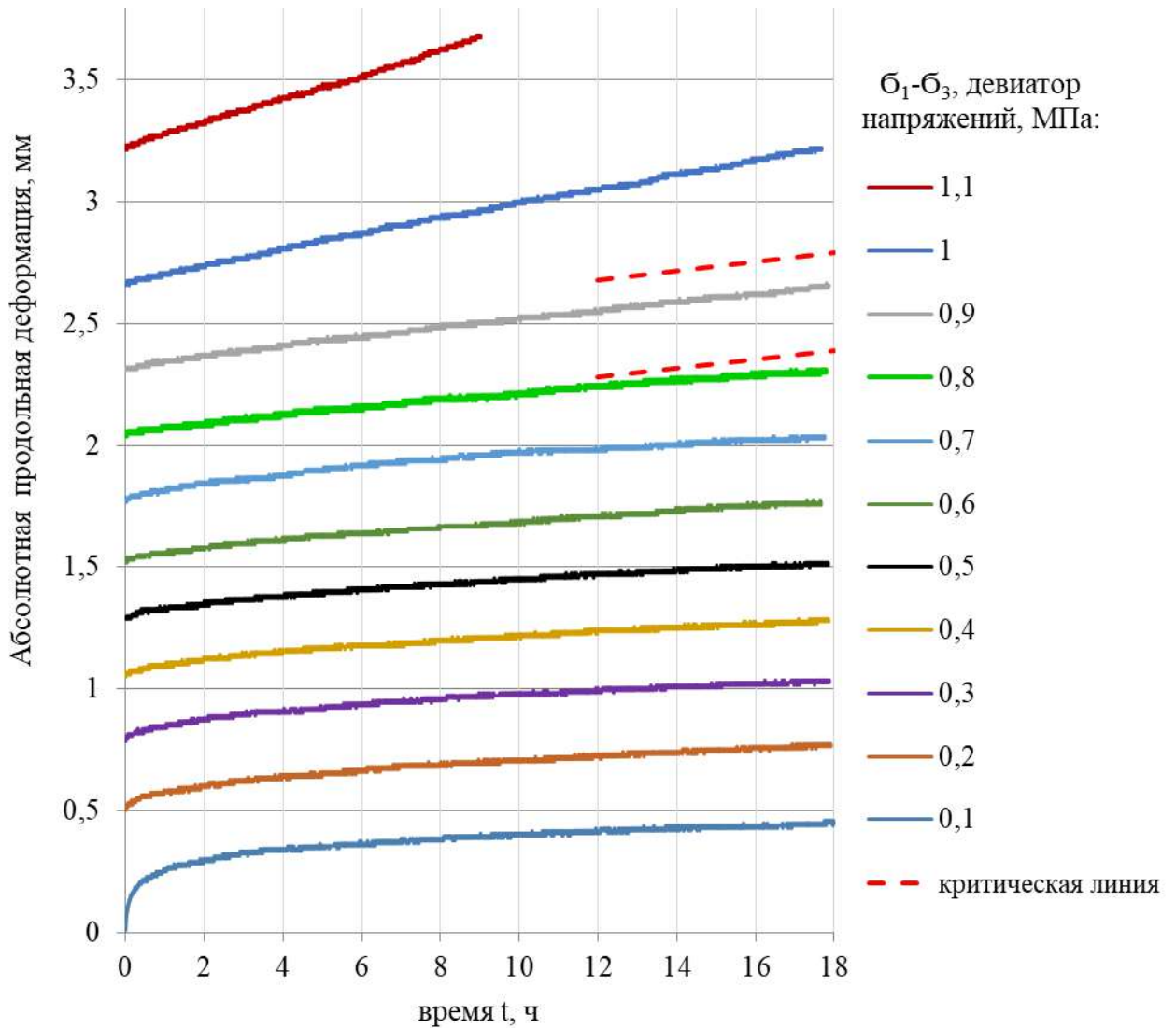


Рис. 98. Результаты испытания трехосного сжатия ледогрунта (образец № 19) при всестороннем давлении 0,1 МПа

Испытание ледогрунта при всестороннем давлении 0,3 МПа (образец № 16) показало, что до уровня девиатора напряжений 0,9 МПа скорость продольной деформации составляет менее 0,01 мм/ч. При девиаторе напряжений 1,05 и 1,2 МПа на 7-8 ступенях пластично-вязкое течение льда развивается со скоростью деформации 0,025-0,03 мм/ч. Условный предел длительной прочности ледогрунта установлен при девиаторе напряжений 0,9 МПа (рис. 99).

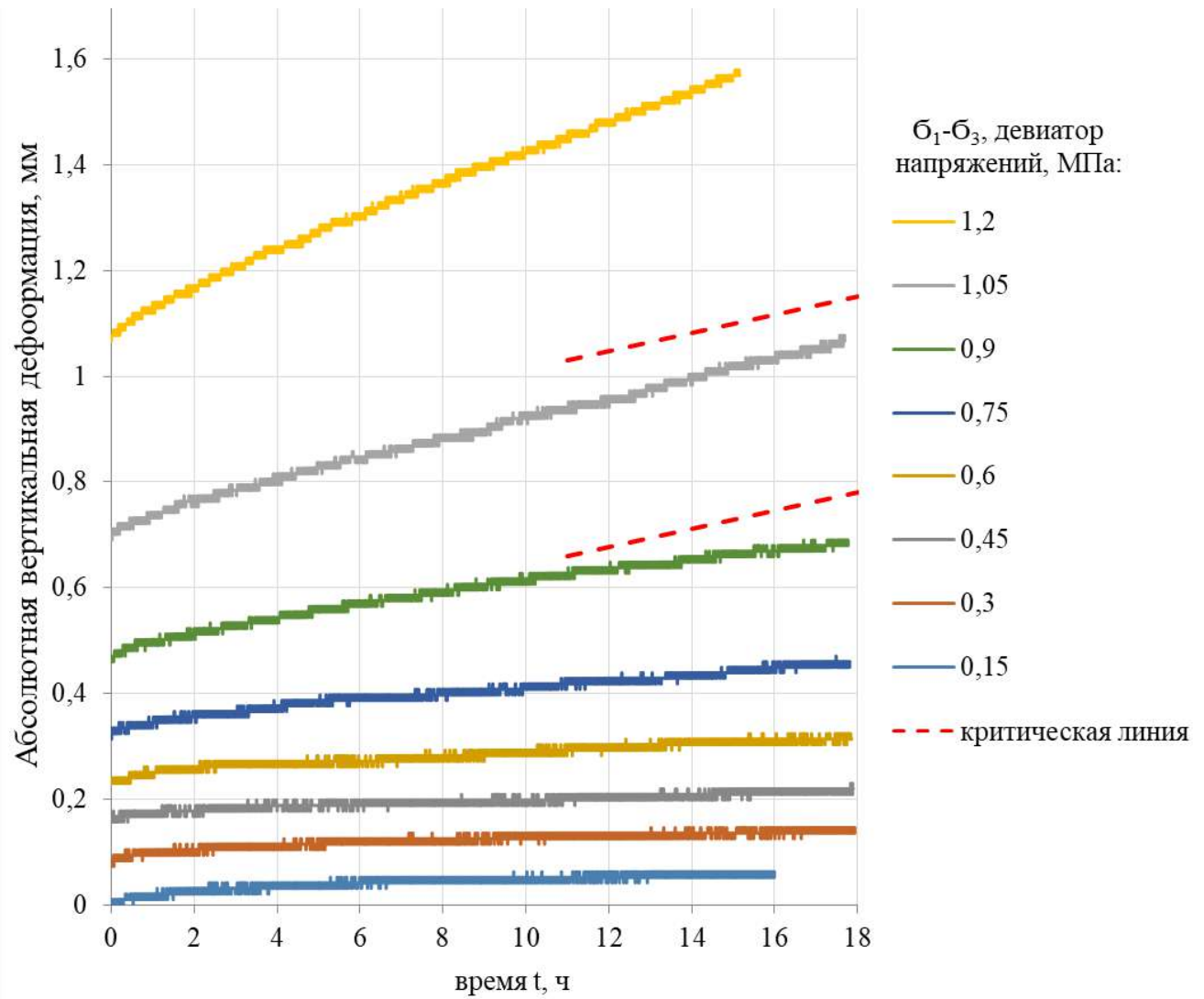


Рис. 99. Результаты испытания трехосного сжатия ледогрунта (образец № 16) при всестороннем давлении 0,3 МПа

Для определения показателей ползучести A , m , n ледогрунта проведена обработка экспериментальных данных испытания образца № 16 при всестороннем давлении 0,3 МПа (рис. 100). Получена зависимость эквивалентной деформации ползучести ϵ^{cr} и эквивалентной скорости деформации $\dot{\epsilon}^{cr}$ с течением времени при разных уровнях эквивалентного напряжения σ^{cr} . Обнаружено, что деформирование ледогрунта на каждой ступени нагрузки протекает с некоторым уменьшением скорости эквивалентной деформации ползучести. Этот процесс виден также по кривым ползучести, наклон которых с течением времени слегка выполаживается, что в меньшей степени отмечалось у ультрапресного чистого льда. По результатам аппроксимации параметр ползучести ледогрунта m составил $-0,38$. Для параметров ползучести A и n ледогрунта получены значения $5,5 \cdot 10^{-7}$ и $1,12$ соответственно.

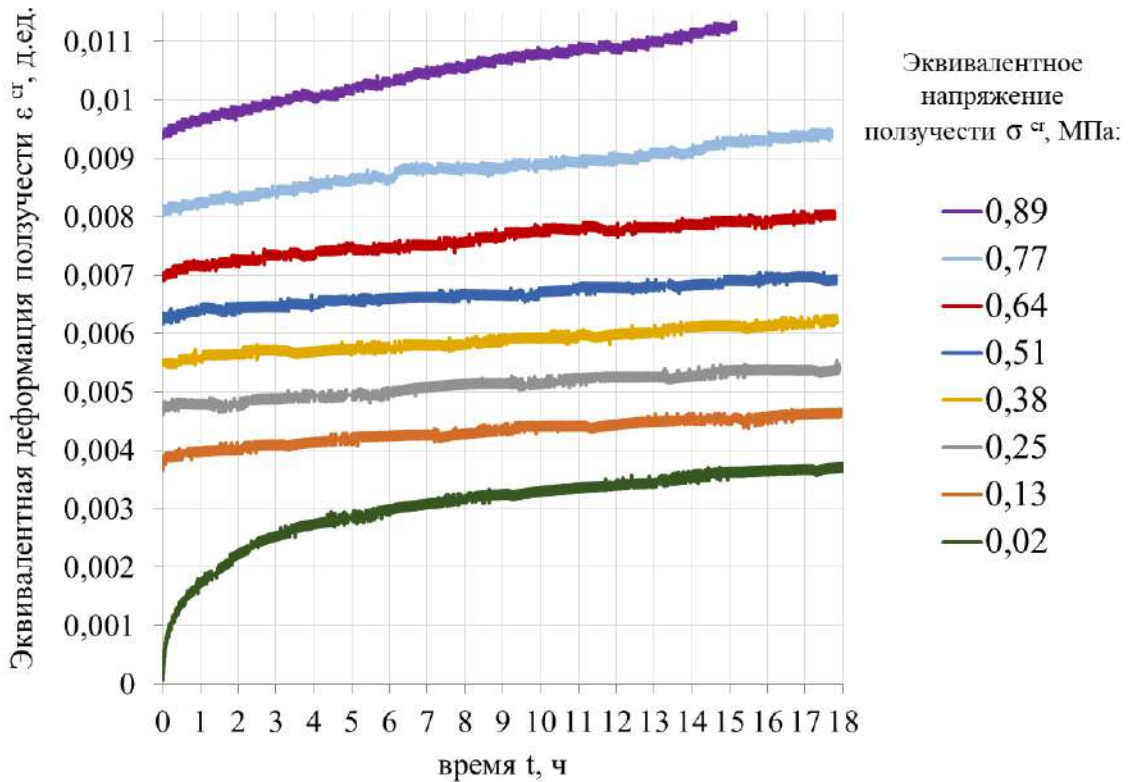


Рис. 100. Эквивалентная деформация ползучести ледогрунта (образец № 16) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,3 МПа

Испытания трехосного сжатия слабосоленого чистого льда были проведены в последнюю очередь. В связи с оставшимся достаточным запасом времени шаг ступеней нагрузки был снижен, так что их количество в эксперименте достигло в среднем 13 штук, а общая продолжительность одного испытания составила около 220 ч (примерно 10 дней).

Результаты испытания слабосоленого чистого льда при всестороннем давлении 0,5 МПа (образец № 23) приведены на рис. 101. Обнаружено, что установившееся течение льда со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч началось на 11 ступени при девиаторе напряжений 0,9 МПа. Дальнейшее увеличение девиатора напряжений до 1 МПа привело к течению льда со скоростью 0,01-0,02 мм/ч. Переход деформирования в стадию прогрессирующей ползучести не зафиксирован. Условный предел длительной прочности слабосоленого чистого льда при всестороннем давлении 0,5 МПа установлен при девиаторе напряжений 0,8 МПа.

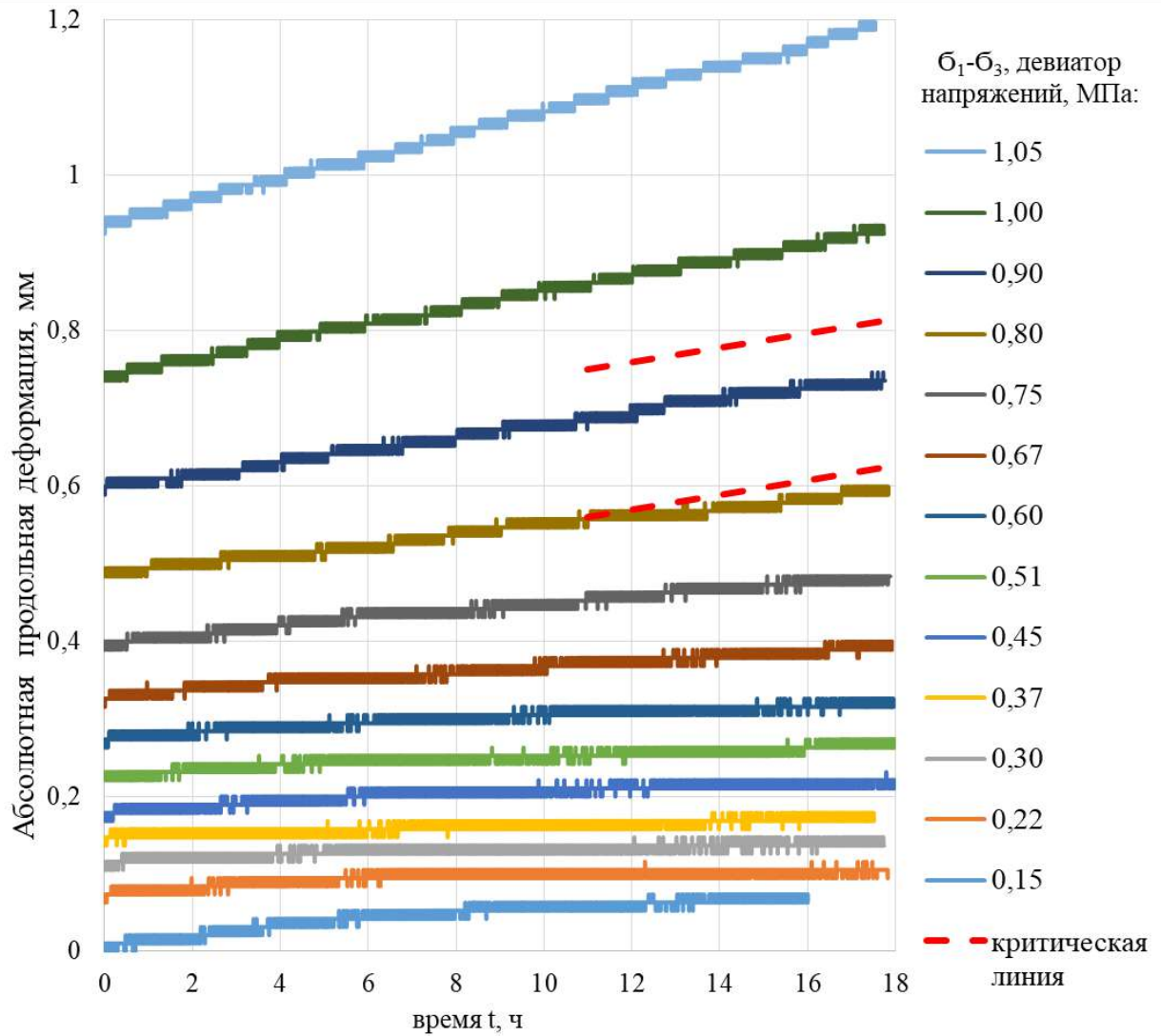


Рис. 101. Результаты испытания трехосного сжатия слабосоленого чистого льда (образец № 23) при всестороннем давлении 0,5 МПа

Испытание слабосоленого чистого льда при всестороннем давлении 0,1 МПа (образец № 33) показало, что течение льда со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч начинается при девиаторе напряжений 0,75 МПа (10 степень). Условный предел длительной прочности установлен при девиаторе напряжений 0,67 МПа. В ходе испытания образца № 33 не зафиксирован переход деформирования в стадию прогрессирующей ползучести (рис. 102).

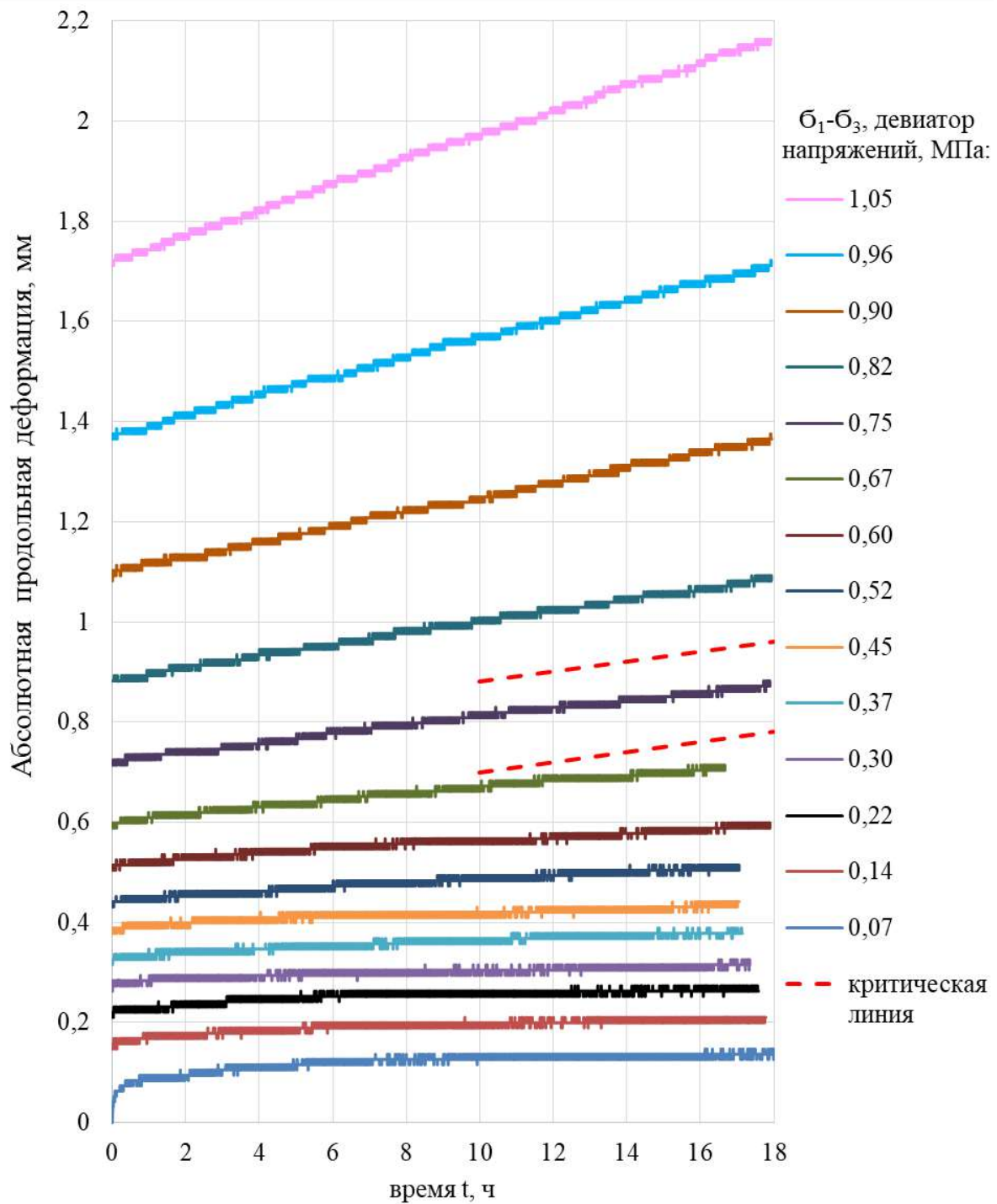


Рис. 102. Результаты испытания трехосного сжатия слабосоленого чистого льда (образец № 33) при всестороннем давлении 0,1 МПа

На рис. 103 представлены кривые ползучести слабосоленого чистого льда по результатам испытания при всестороннем давлении 0,3 МПа (образец № 35). Установлено, что переход к установившемуся течению со скоростью деформации 0,01 мм/ч произошел на 10 ступени при девиаторе напряжений 0,75 МПа. Условный предел длительной прочности слабосоленого чистого льда при всестороннем давлении 0,3 МПа установлен при девиаторе напряжений 0,67 МПа.

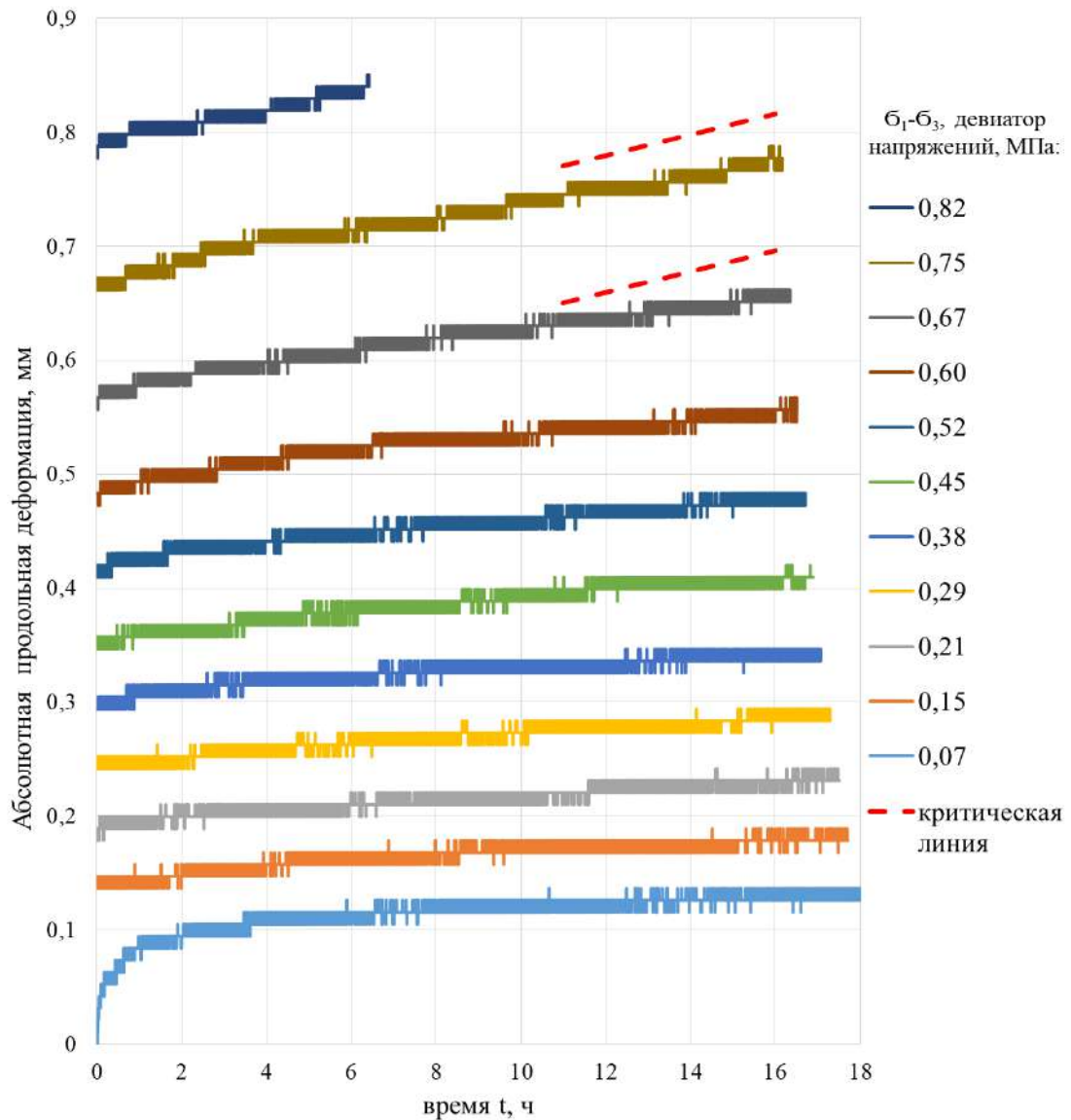


Рис. 103. Результаты испытания трехосного сжатия слабосоленого чистого льда (образец № 35) при всестороннем давлении 0,3 МПа

Изменение эквивалентной деформации ползучести слабосоленого чистого льда с течением времени по результатам испытания образца № 35 показано на рис. 104. Здесь, как и у ультрапресного чистого льда, зафиксирована малая зависимость эквивалентной скорости деформации ползучести от времени, что видно по незначительному изменению наклона кривых ползучести. По результатам аппроксимации распределения экспериментальных точек уравнением (4) получены следующие параметры ползучести: m составил $-0,28$, параметр A равен $2,3 \cdot 10^{-6}$, а $n - 1,18$.

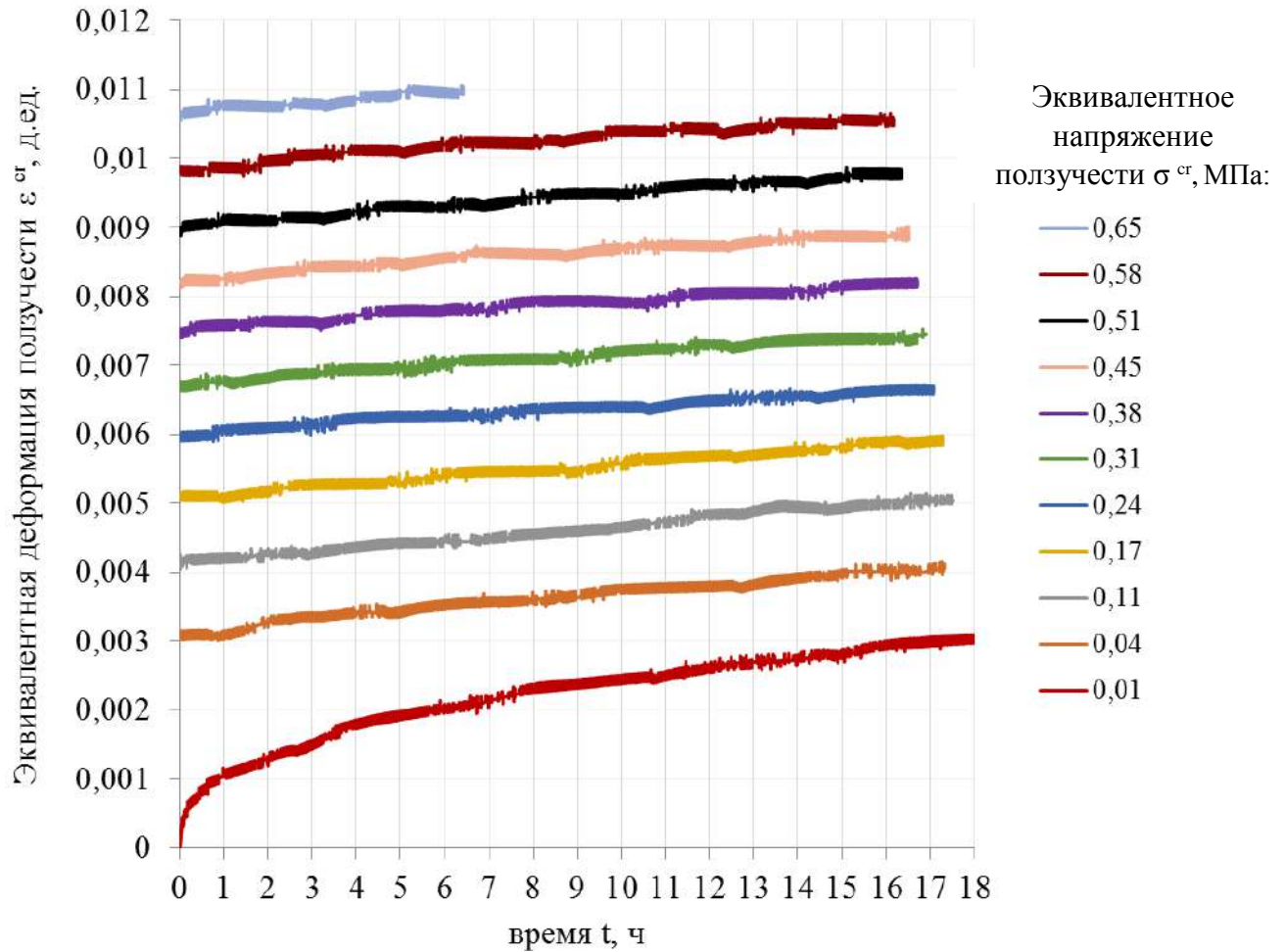


Рис. 104. Эквивалентная деформация ползучести слабосоленого чистого льда (образец № 35) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,3 МПа

По результатам длительных испытаний трех типов льда построены следы предельных поверхностей текучести в координатах p - q (рис. 105). Для ледогрунта получен максимальный угол Друкера-Прагера β равный 23° . Его значения для ультрапресного чистого льда и слабосоленого чистого льда оказались схожи и составили 19° и 17° соответственно (табл. 42).

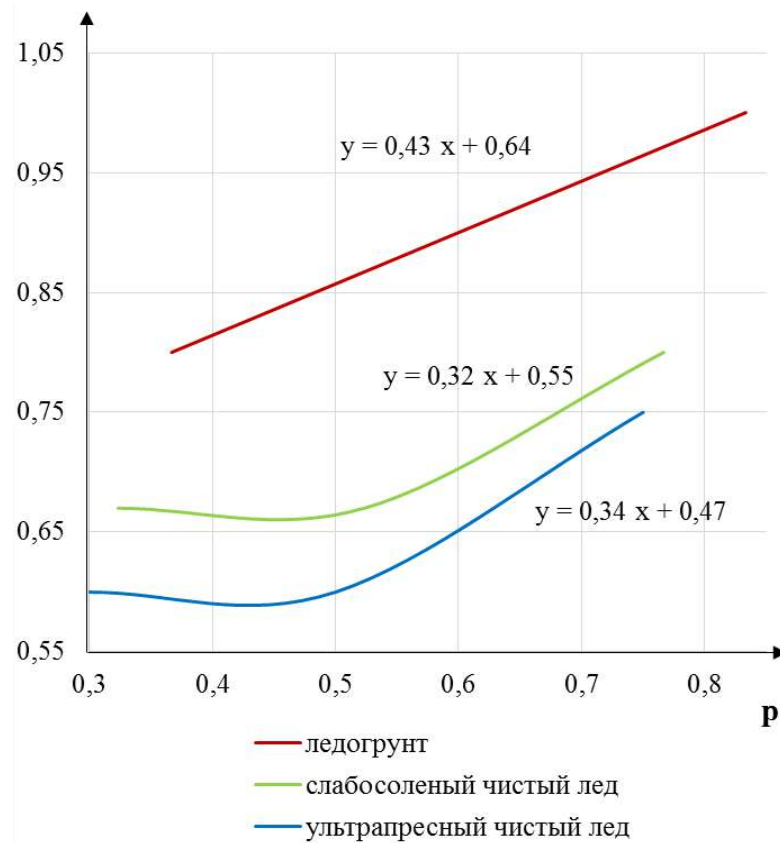
Рис. 105. Следы поверхностей текучести трех типов льда в координатах $q - p$

Таблица. 42. Результаты испытаний трехосного сжатия трех типов льда по длительной схеме нагружения

Номер образца	Тип льда	$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	σ_3	q , МПа	p , МПа	β , °	A	m	n	c_y , МПа	φ_y , °
4	ЧЛ	0,75	0,5	0,75	0,75	19	$2,70 \cdot 10^{-6}$	-0,26	1,14	0,22	9,4
13	ЧЛ	0,6	0,3	0,6	0,5						
15	ЧЛ	0,6	0,1	0,6	0,3						
12	ЛГ	1	0,5	1	0,8333	23	$5,5 \cdot 10^{-7}$	-0,38	1,12	0,3	11,3
16	ЛГ	0,9	0,3	0,9	0,6						
19	ЛГ	0,8	0,1	0,8	0,3667						
23	СЛ	0,8	0,5	0,8	0,7667	17	$2,3 \cdot 10^{-6}$	-0,28	1,18	0,26	8,3
35	СЛ	0,67	0,3	0,67	0,5233						
33	СЛ	0,67	0,1	0,67	0,3233						

Примечание 1: ЧЛ – ультрапресный чистый лед; ЛГ – ледогрунт; СЛ – слабосоленый чистый лед.

Примечание 2: $\sigma_1 - \sigma_3$ – условный предел длительной прочности; σ_3 – всестороннее давление; q – девиатор напряжений; p – среднее напряжение; β – угол Друкера-Прагера равный углу наклона поверхности текучести в расширенной модели Друкера-Прагера; A , m , n – параметры ползучести в расширенной модели Друкера-Прагера; c_y – условно длительное сцепление по условию прочности Мора-Кулона; φ_y – условно длительный угол внутреннего трения по условию прочности Мора-Кулона.

Примечание 3: данные по составу и строению образцов льда приведены в разделе 3.1.

Примечание 4: данные по схемам испытаний приведены в табл. 37.

При сравнении результатов длительных испытаний трех типов льда обнаруживаются следующие различия в их механическом поведении под нагрузкой.

1. Установившееся течение у ледогрунта со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч началось при девиаторе напряжений в среднем большим на 25-30%, чем у ультрапресного чистого льда и на 15-25% большим, чем у слабосоленого чистого льда (рис. 106).

2. В ходе длительных испытаний ультрапресного чистого льда и ледогрунта при всестороннем давлении 0,5 МПа (образцы № 4 и № 12) и схожем шаге увеличения вертикальной нагрузки (0,2 МПа и 0,25 МПа соответственно) только у первого из них произошел переход деформирования в прогрессирующее течение. Прогрессирующее течение ультрапресного чистого льда наступило спустя 108 ч после начала эксперимента при девиаторе напряжений 1,75 МПа и уровне продольной деформации 2,1 мм. Между тем ледогрунт при меньшем девиаторе напряжений 1,6 МПа спустя 126 ч после начала эксперимента и накопленной продольной деформации около 2 мм продолжал течь с постоянной скоростью деформации 0,07 мм/ч. И даже при большем девиаторе напряжений 1,8 МПа у ледогрунта продолжалось развитие установившейся ползучести. Если продлить кривую ползучести ультрапресного чистого льда в состоянии прогрессирующего течения (7 ступень, девиатор напряжений 1,75 МПа), то получится, что за один и тот же интервал времени величина накопленной деформации образца ультрапресного чистого льда окажется значительно выше, чем у образца ледогрунта при девиаторе напряжений 1,8 МПа (рис. 107).

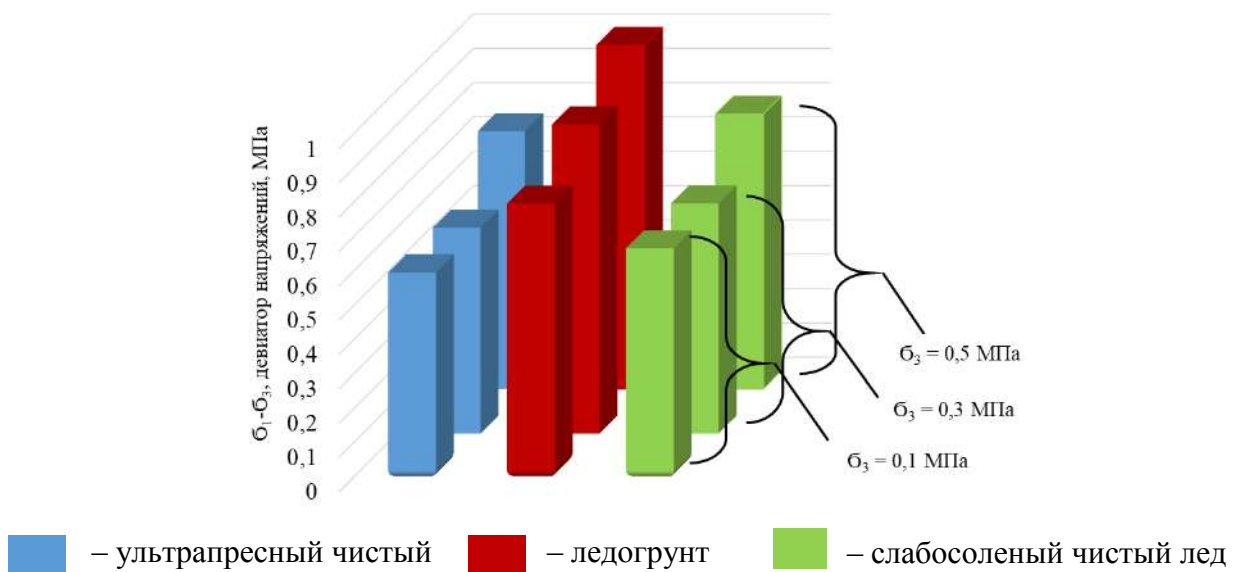


Рис. 106. Условный предел длительной прочности трех типов льда при разных всесторонних давлениях по результатам длительных испытаний методом трехосного сжатия

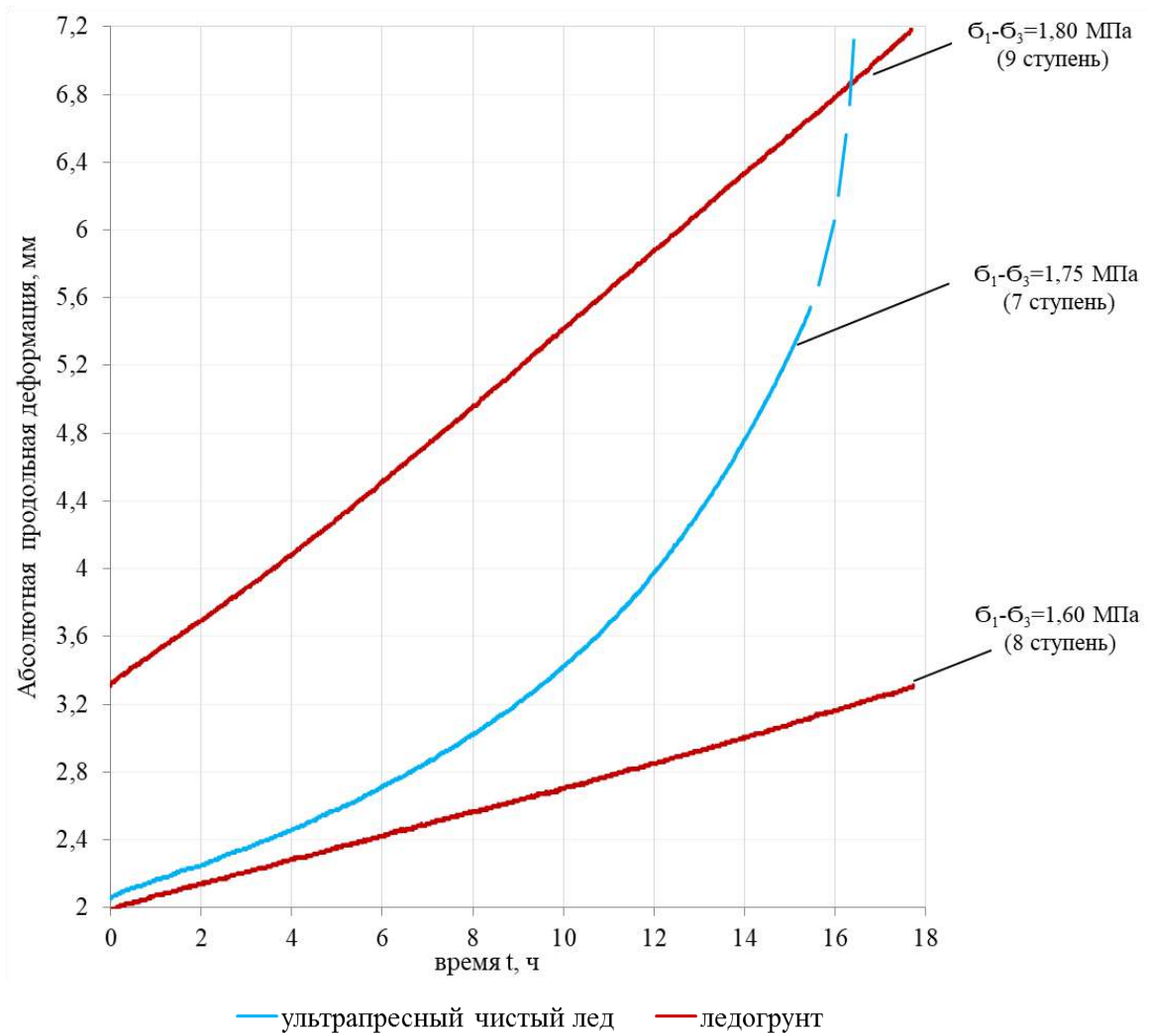


Рис. 107. Абсолютная продольная деформация ультрапресного чистого льда и ледогрунта (образцы № 4 и № 12) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,5 МПа

Приведенные выше результаты позволяют предположить, что добавление в чистый лед песчаных частиц снижает степень проявления реологических свойств. Подтверждение этого требует более детального анализа механического поведения льда с примесями и без. С этой целью рассмотрим результаты испытаний образцов № 4 и № 12 на более ранних ступенях деформирования. Нанесем их на один график, выбрав ступени со схожими значениями девиатора напряжений³. По углу наклона кривых ползучести видно, что при схожих значениях девиатора напряжений ультрапресный чистый лед деформируется с

³ В данных испытаниях шаг возрастания вертикальной нагрузки у ультрапресного чистого льда был на 0,05 МПа больше, чем у ледогрунта. В связи с этим выбранные ступени нагружения отличались по номеру и времени с начала проведения эксперимента. Например, выполнено сравнение кривой ползучести ультрапресного чистого льда 4 ступени нагрузки с девиатором напряжений 1 МПа, переход к которой произошел через 72 ч с начала эксперимента и кривой ползучести ледогрунта 5 ступени нагрузки с девиатором напряжений 1 МПа, начавшейся спустя 90 ч с начала эксперимента. С этим связан несколько больший уровень накопленной деформации у образца ледогрунта.

большой постоянной скоростью продольной деформации. Так, например, при значении девиатора напряжений 1 МПа у ледогрунта наблюдается течение со скоростью продольной деформации примерно 0,01 мм/ч, а ультрапресный чистый лед при том же уровне напряжений течет со скоростью уже порядка 0,02 мм/ч (рис. 108).

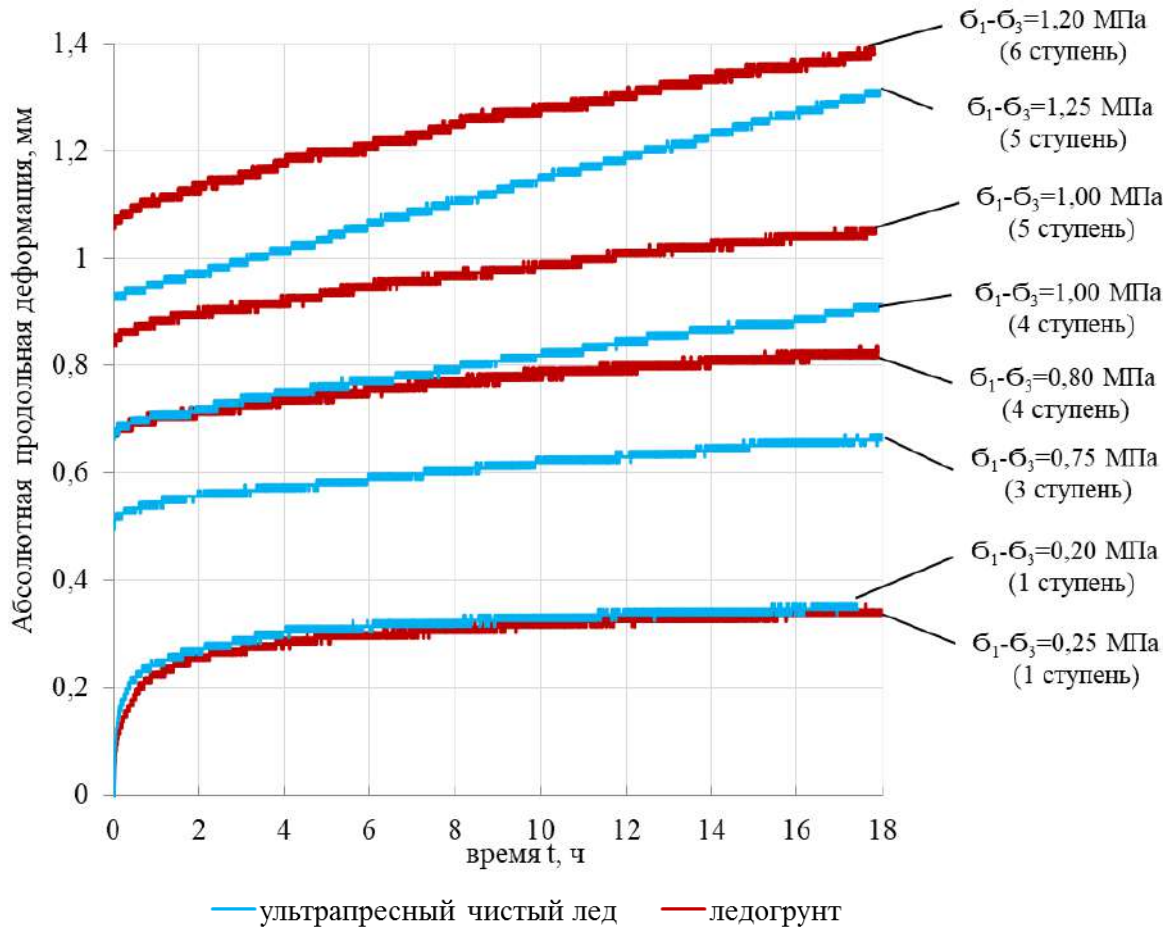


Рис. 108. Абсолютная продольная деформация ультрапресного чистого льда и ледогрунта (образцы № 4 и № 12) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,5 МПа

Сравнение результатов испытаний ультрапресного чистого льда и ледогрунта при всесторонних давлениях 0,1 МПа и 0,3 МПа в целом показало аналогичную закономерность. Испытания ультрапресного чистого льда и ледогрунта при всестороннем давлении 0,1 МПа (образцы № 15 и № 19) выполнены при одинаковом шаге увеличения вертикальной нагрузки – 0,1 МПа. По углу наклона кривых ползучести видно, что на первых ступенях нагрузки скорости продольной деформации двух типов льда практически совпадают. При этом у ледогрунта наблюдается значительно больший уровень накопленной деформации за счет большей скорости деформации в начале каждой ступени, которая, однако, спустя пару часов практически полностью затухает. На более высоких

ступенях нагрузки у ультрапресного чистого льда зафиксировано установившееся течение с большей скоростью продольной деформации, чем у ледогрунта (рис. 109).

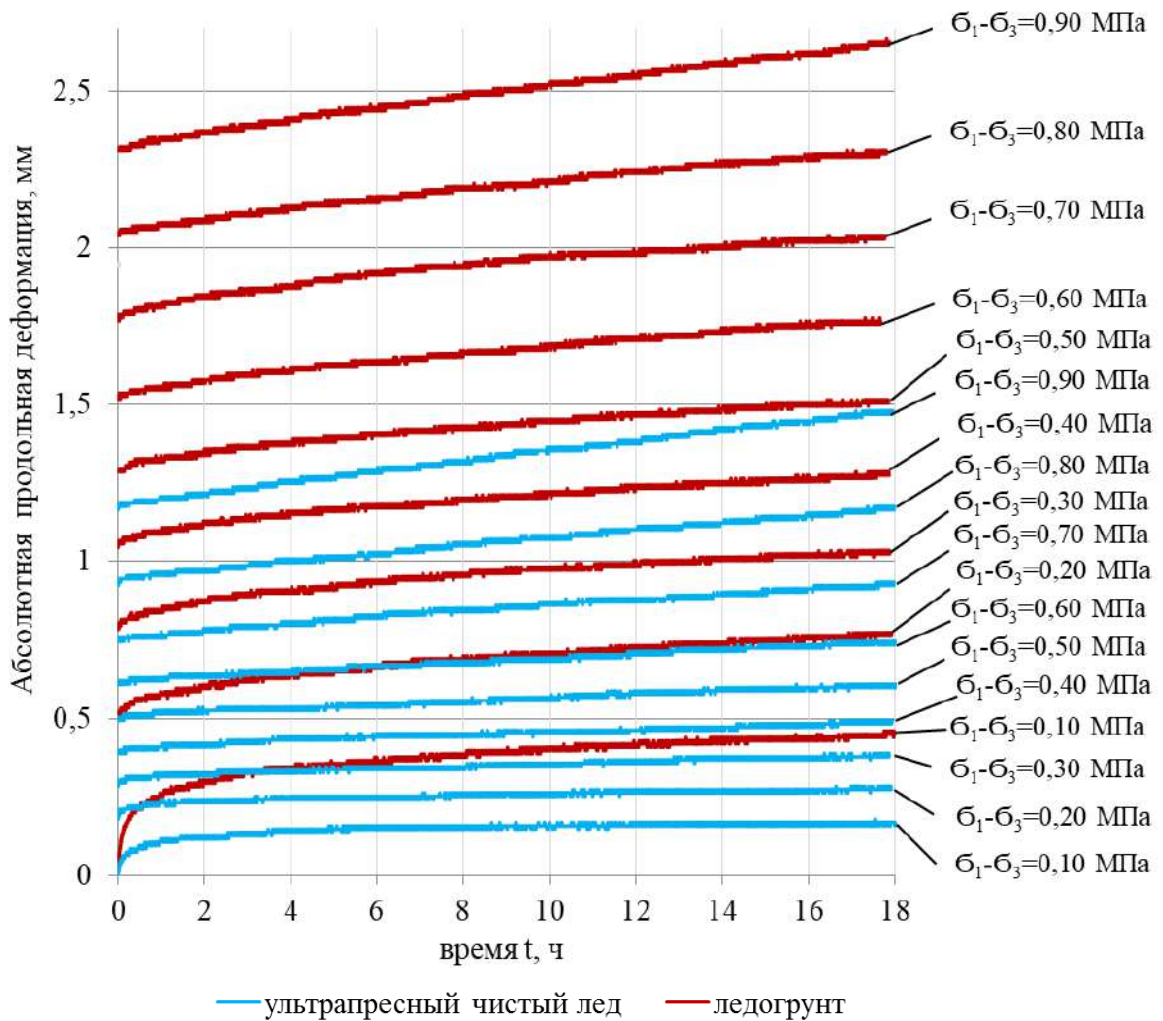


Рис. 109. Абсолютная продольная деформация ультрапресного чистого льда и ледогрунта (образцы № 15 и № 19) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,1 МПа

Испытания ультрапресного чистого льда и ледогрунта при всестороннем давлении 0,3 МПа (образцы № 13 и № 16) также выполнены с одинаковым шагом возрастания осевой нагрузки – 0,1 МПа. По кривым ползучести видно, что у ультрапресного чистого льда наблюдается больший уровень накопленных деформаций, значительный вклад в которые привнесло интенсивное нарастание деформаций в начале первой ступени нагрузки. Ультрапресный чистый лед на всех ступенях деформирования течет с большими скоростями продольных деформаций, что отчетливо видно по значительному наклону кривых ползучести. Особенно ярко это проявляется с 5 ступени нагружения (девиатор напряжений 0,75 МПа), на которой у ультрапресного чистого льда уже зафиксирована установившаяся ползучесть со скоростью 0,01 мм/ч, а у ледогрунта еще нет. На 6 ступени

при девиаторе напряжений 0,9 МПа разница становится еще более значительной, так что скорость продольной деформации у ультрапресного чистого льда оказывается в 2 раза выше, чем у ледогрунта (рис. 110).

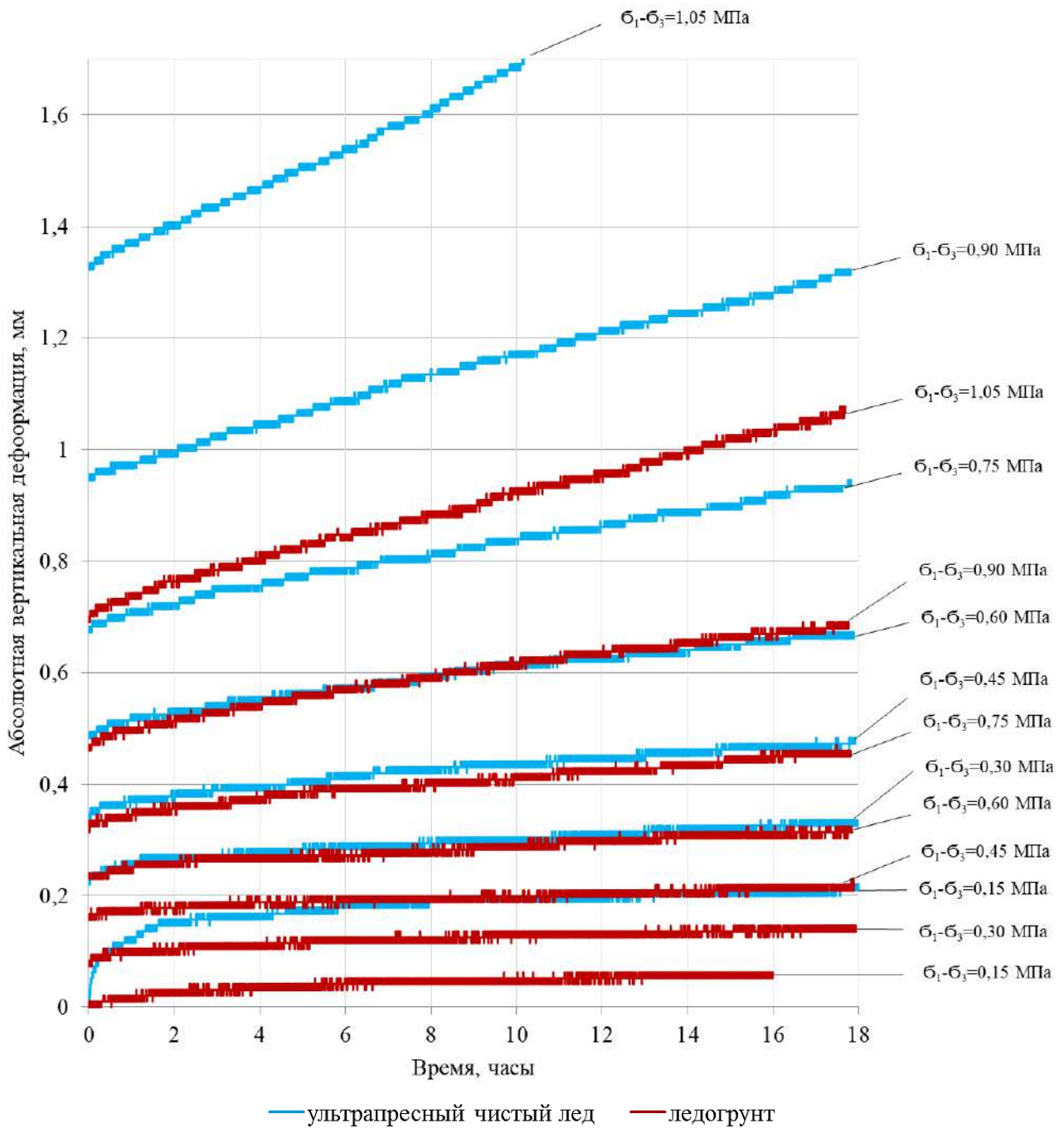


Рис. 110. Абсолютная продольная деформация ультрапресного чистого льда и ледогрунта (образцы № 13 и № 16) с течением времени по результатам испытаний методом трехосного сжатия при всестороннем давлении 0,3 МПа

Резюмируя проведенное сравнение результатов длительных испытаний трехосного сжатия ледогрунта и ультрапресного чистого льда, можно заключить, что первый из них оказался менее подвержен ползучести (данные по составу и строению образцов льда

приведены в разделе 3.1.). Во-первых, во всех экспериментах пластично-вязкое течение со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч у ледогрунта начиналось при девиаторе напряжений в среднем большем на 25-30%, чем у ультрапресного чистого льда. Во-вторых, при испытании одного из образцов ультрапресного чистого льда произошел переход деформирования в стадию прогрессирующей ползучести, в то время как у ледогрунта при том же и даже большем уровне напряжений была зафиксирована установившаяся ползучесть с постоянной и меньшей скоростью продольной деформации. В-третьих, по результатам наложения кривых ползучести ультрапресного чистого льда и ледогрунта при одинаковых (или схожих) уровнях девиатора напряжений во всех случаях у последнего из них наблюдалось течение с меньшими скоростями деформации. Отсюда можно сделать следующий важный вывод.

Научное положение № 3. Установившееся течение льдов с 20% минеральных примесей пылеватого песка, моделирующих пластовые льды, встречающиеся в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения, развивается с меньшими скоростями деформации при постоянном уровне девиатора напряжений, чем это наблюдается у пластовых льдов без примесей.

Интересно, что по результатам быстрых испытаний трехосного сжатия ледогрунта показатели его физико-механических свойств оказались ниже, чем у ультрапресного чистого льда (см. выше). Вероятно, при быстром воздействии нагрузки минеральные примеси и слоистое строение льда приводит к ослаблению сопротивления деформированию и разрушению за счет концентрации напряжений на контактах слоев. При длительном же воздействии нагрузки, наличие во льду минеральных частиц способствует развитию упрочняющего эффекта, возникающего, по-видимому, вследствие появления во льду трения. Последнее заметно по увеличению угла Друкера-Прагера ледогрунта (или условно длительного угла внутреннего трения по условию прочности Мора-Кулона) (см. рис. 105). Подобное ослабление реологических свойств при наличии во льдах грунтовых примесей может оказать значительное влияние на изменение НДС грунтовых толщ, содержащих ледогрунты, при сооружении в них подземных резервуаров и должно учитываться в его прогнозе.

Сравнение результатов длительных испытаний трехосного сжатия ультрапресного чистого льда и слабосоленого чистого льда выполнено только по итоговым показателям их физико-механических свойств. Наложение кривых ползучести не проводилось вследствие различия в шагах увеличения вертикальной нагрузки и продолжительности испытаний данных типов льдов. Обнаружено, что пластично-вязкое течение со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч у ультрапресного и слабосоленого чистых льдов начинается при

схожих значениях напряжений. У последнего оно развивается на 6-11% большем девиаторе напряжений. Небольшое отличие в показателях физико-механических свойств наблюдается и при сравнении параметров ползучести A , m , n . Первый из них на 15% выше у слабосоленого чистого льда, а последние два отличаются менее чем на 8% (табл. 42).

Такая незначительная разница в механическом поведении ультрапресного и слабосоленого чистых льдов оказалась неожиданной. Предполагалось, что последний при длительном воздействии нагрузки будет значительно более подвержен ползучести. Возможно, это связано с относительно невысоким уровнем минерализации слабосоленого чистого льда (820 мг/л), который в итоге незначительно повлиял на его реологические свойства, или же могли сказаться условия проведения испытания. Однако, по мнению автора настоящей работы, на механическое поведение слабосоленого чистого льда в большей мере оказали влияние его структурно-текстурные особенности (см. раздел. 3.4). По результатам исследований, представленным в следующей главе, выявлено, что размер кристаллов слабосоленого чистого льда значительно меньше, чем у ультрапресного чистого льда. Вероятно, повышенная концентрация рассола при формировании образцов привела к снижению зернистости льда. Это и оказало влияние на прочность и деформируемость слабосоленого чистого льда при длительном воздействии нагрузки. Известно, что при снижении размеров кристаллов прочность на сжатие льда увеличивается (получено Е.П. Шушериной и А.Е. Гуликовым [17, 36, 72] при изучении влияния размеров кристаллов на прочность льда на одноосное сжатие). Отсюда следует, что уменьшение длительного сопротивления деформированию и разрушению слабосоленого чистого льда за счет повышенной солености, вероятно, было скомпенсировано некоторым упрочнением за счет меньшего размера его кристаллов. В связи с тем, что слабосоленый чистый лед достаточно редко встречается в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения, и предположения о его значительно более низких показателях физико-механических свойств, прежде всего реологических, не оправдались, принято решение не учитывать его в дальнейших численных расчетах изменения НДС грунтовых толщ при сооружении в них подземных резервуаров.

3.4. Исследования структурно-текстурных особенностей льда

Лед является кристаллическим телом, свойства которого зависят от геометрии пространственной решетки и характера меж- и внутрикристаллических связей. Структуру льда можно представить в виде параллельных слоев, между которыми находятся плоскости ослабления, скольжение по которым наблюдается при деформировании льда. Параллельные слои с густонаселенными молекулами называют базисными плоскостями, а

направление, перпендикулярное им – оптической осью кристалла. В кристаллах льда присутствуют микроскопические дефекты в виде включений примесей, воздушных пузырьков, а также несовершенства, заключающиеся в вакансиях в узлах решетки, лишние атомы в межузловых точках (точечные дефекты) и протяженные линейные нарушения регулярности решетки (дислокации). Дефекты зачастую располагаются по базисным плоскостям, что дополнительно способствует деформированию кристалла льда в этом направлении [14, 17, 37, 74].

Указанные особенности характерны как для монокристаллов льда, так и для кристаллов в поликристаллическом льду. Однако в последнем случае на механическое поведение льда под нагрузкой также существенно повлияют: размер кристаллов, их форма и ориентировка в пространстве. Они определяются историей существования льда и, главным образом, условиями его образования. В связи с этим для полного понимания поведения льда под нагрузкой необходимо было исследовать структурно-текстурные особенности образцов льда, подготовленных послойным намораживанием до испытаний методом трехосного сжатия.

Кроме этого, в ходе настоящей работы возникла идея изучить изменение микростроения льда после испытания методом трехосного сжатия по быстрой и длительной схемам нагружения (см. раздел 3.3).

Исследования структурно-текстурных особенностей льда проводили в лаборатории кафедры Криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Для этого из образцов трех типов льда с помощью ленточной пилы были изготовлены тонкие продольные и поперечные срезы (рис. 111). Затем толщина каждого из них была доведена до около 1 мм путем шлифовки на нагретой металлической пластине. Готовые срезы льда примораживали на стеклянное основание. Шлифы были изучены в отраженном свете и проходящем свете с помощью поляризационной установки без увеличения и поляризационных микроскопов МБС-9, Биомед при 2-х и 4-х кратном увеличении соответственно (рис. 112).



Рис. 111. Пример подготовки образцов для исследования структурно-текстурных особенностей льда

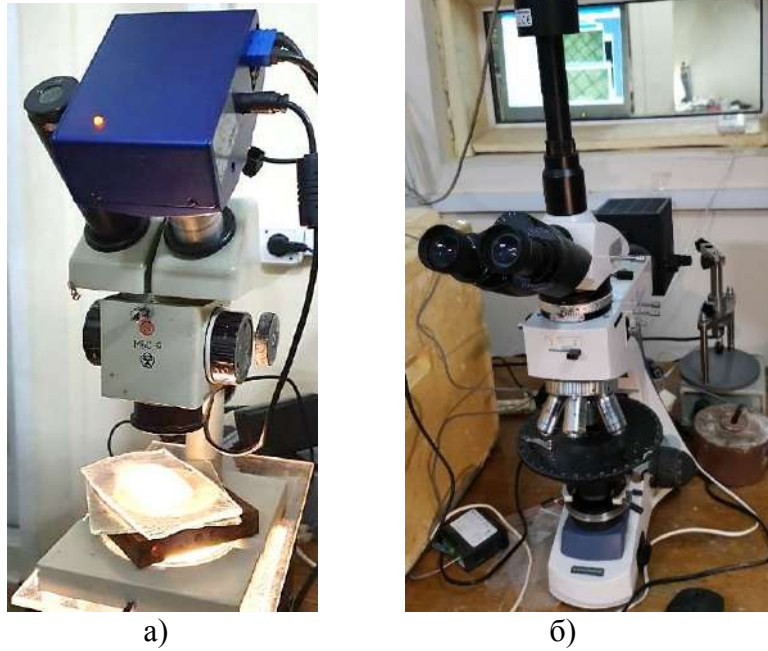


Рис. 112. Исследование структуры льда в поляризационных микроскопах:

а) МБС-9; б) Биомед

В отраженном свете видно, что ультрапресный чистый лед до проведения испытаний обладает горизонтально-слоистой текстурой с толщиной единичных слоев в среднем от 1 до 3 мм, реже более. При приближении к боковой поверхности образца слои местами приобретают больший уклон. Лед монолитный, прозрачный с замутненностью на некоторых контактах слоев. Без увеличения в нем тяжело определить распределение воздушных включений (рис. 113).

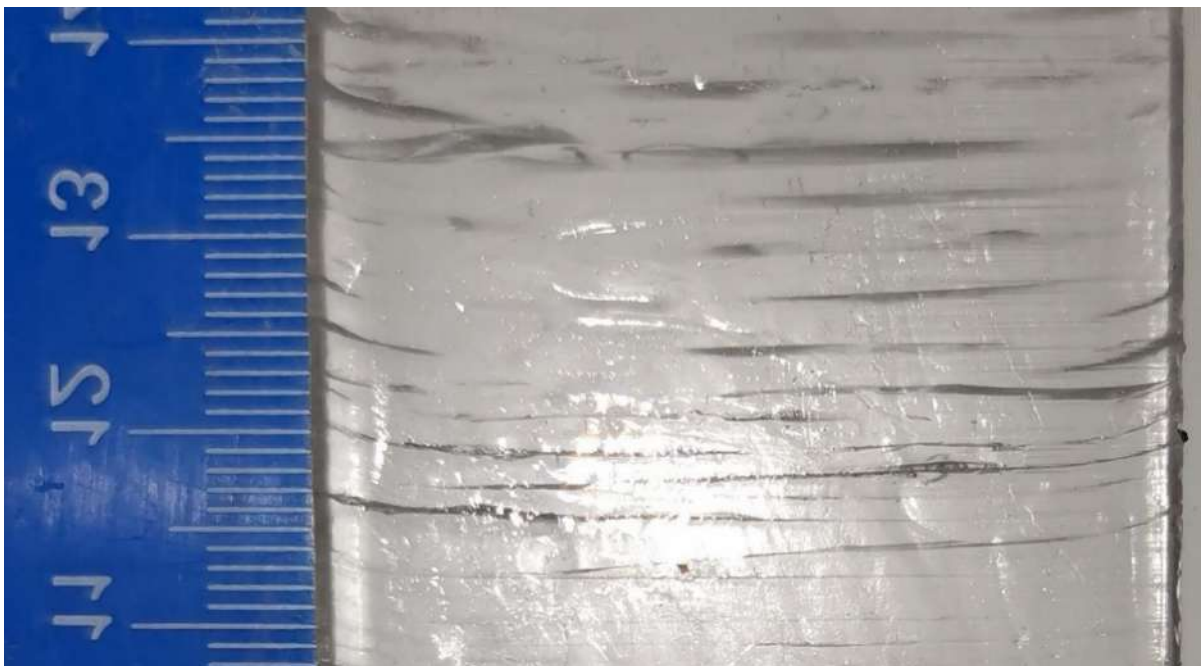


Рис. 113. Фрагмент продольного среза образца ультрапресного чистого льда до испытаний методом трехосного сжатия

Для исключения элемента случайности в поляризованном свете было изучено два образца ультрапресного чистого льда до проведения испытаний – № 36, № 37 (рис. 114). В обоих случаях в продольном срезе преобладает аллотриаморфнозернистая структура. Исследования показали, что при данном способе подготовки образцов кристаллы льда продолжали свой рост при добавке новых порций воды, и их границы не совпадали с границами слоев. Длина кристаллов оказалась значительна и составила от 0,5-1 см до 5-6 см, а ширина – от 0,2 до 1 см. Границы кристаллов четкие, иногда с неровными краями (рис. 114, а, г).

Анализ поперечного среза образцов № 36 и № 37 показал, что в осевой части размер кристаллов значительно больше, чем у их боковой поверхности. Здесь, по оси образца размер кристаллов составляет в среднем 1-2 см, а при приближении к краю снижается до первых миллиметров. Вероятно, при добавлении в намораживаемый образец порции воды кристаллы льда предыдущего слоя в центре образца продолжали развиваться в продольном направлении из слоя в слой, при этом рост происходил с малой скоростью, за счет чего они достигли значительных размеров. У самого же края образца замерзание шло практически мгновенно, в результате чего кристаллы не успели вырасти.

Воздушные включения в ультрапресном чистом льде хорошо зафиксированы только в поляризованных микроскопах (рис. 114, в; 115; 116). Они преимущественно располагаются на контакте двух намороженных слоев и обладают шарообразной правильной формой. Диаметр пузырьков здесь варьирует от десятых до сотых долей миллиметра. В пределах одного единичного слоя они встречаются достаточно локально и имеют шарообразную и вытянутую вкрест слоистости форму.

При увеличении в поляризационных микроскопах в продольных срезах образцов № 36 и № 37 хорошо виден характер прорастания и форма удлинённых кристаллов с четкими границами без угловатых граней. Местами их окружают более мелкие кристаллы длиной около 2-3 мм с плавными границами. И только локально встречаются кристаллы длиной 1-3 мм, рост которых заканчивался в пределах одного намораживаемого слоя (рис. 115; 116, а). В поперечном срезе при увеличении хорошо фиксируются мелкие кристаллы с более угловатыми, четкими границами размером около 2 мм, окружающие кристаллы значительной величины (рис. 116, б).

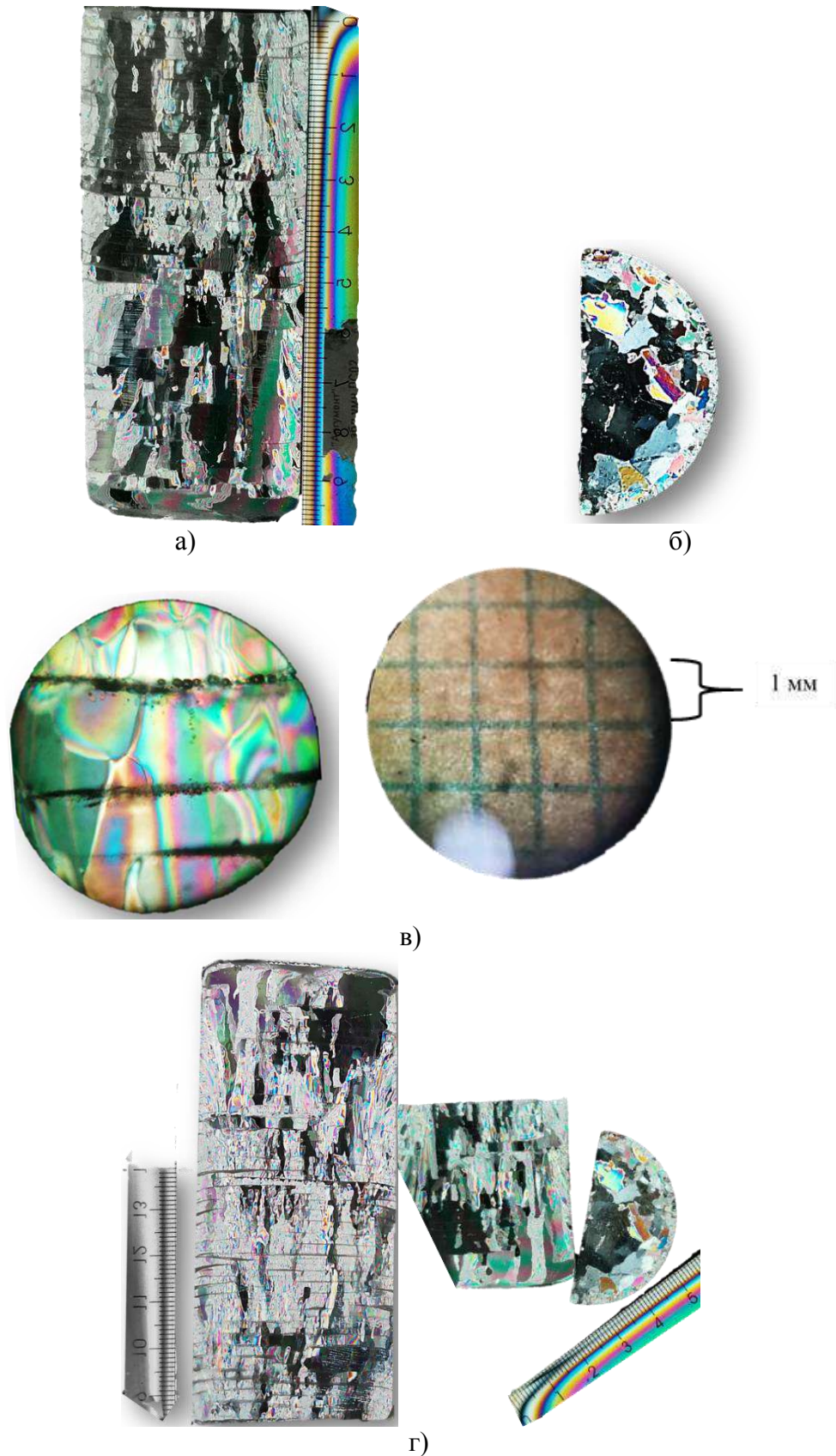


Рис. 114. Ультрапресный чистый лед в поляризованном свете до испытаний методом трехосного сжатия: а) продольный и б) поперечный срезы образца № 36 без увеличения, в) продольный срез образца № 36 в микроскопе Биомед, г) продольные и поперечные срезы образца № 37 без увеличения

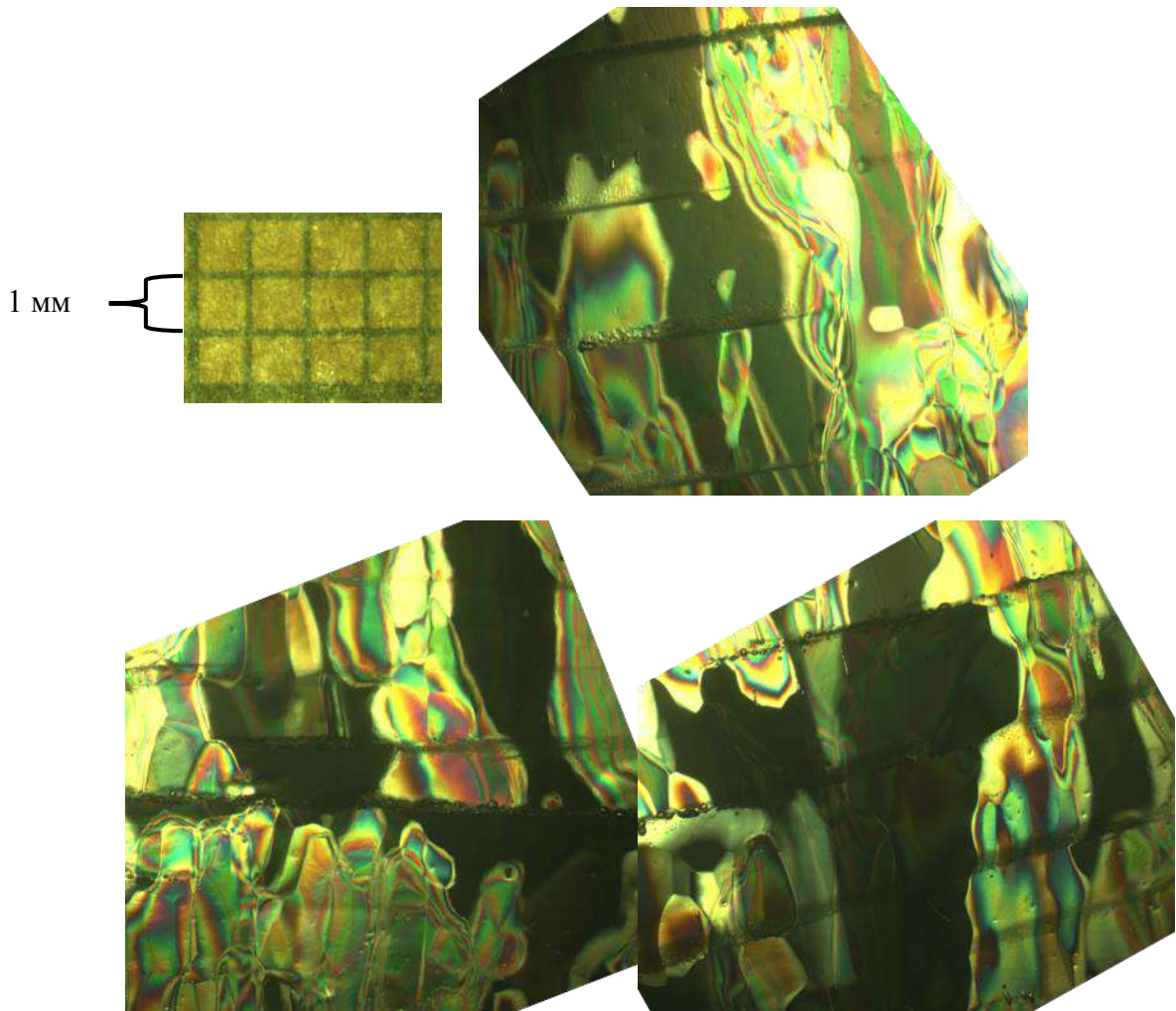


Рис. 115. Продольный срез образца № 36 ультрачистого льда до испытаний методом трехосного сжатия в поляризованном свете микроскопа МБС-9

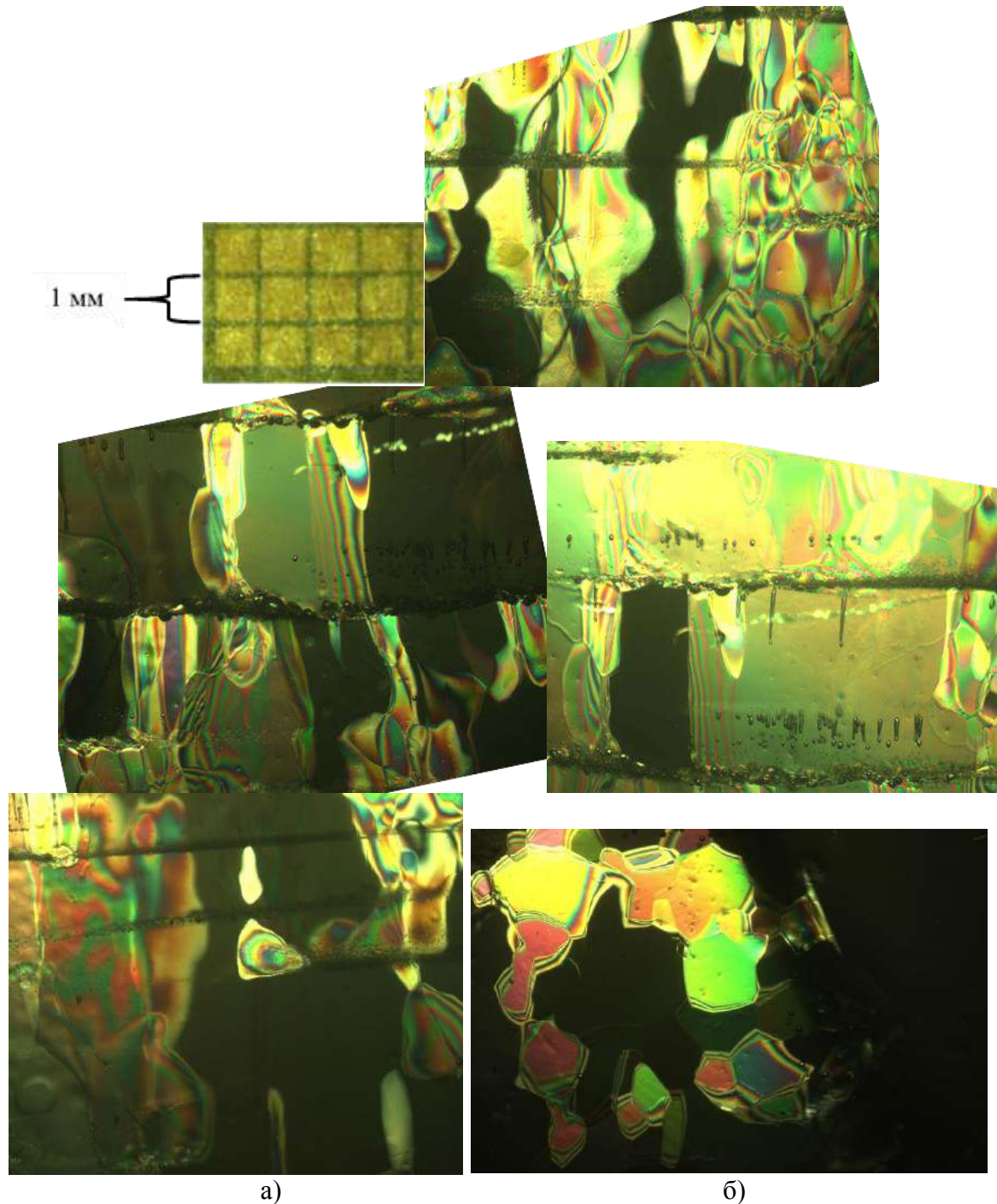


Рис. 116. Продольный (а) и поперечный (б) срезы образца № 37 ультрапресного чистого льда до испытаний методом трехосного сжатия в поляризованном свете микроскопа МБС-9

Исследования структурно-текстурных особенностей ледогрунта до проведения испытаний методом трехосного сжатия не удалось выполнить ввиду отсутствия необходимого количества образцов.

Анализ образца № 38 слабосоленого чистого льда в отраженном свете до испытаний методом трехосного сжатия показал аналогичную с ультрапресным льдом горизонтально-слоистую текстуру. Однако, в отличие от последнего, слабосоленый чистый

лед оказался мутным и непрозрачным с большим количеством воздушных включений (рис. 117).

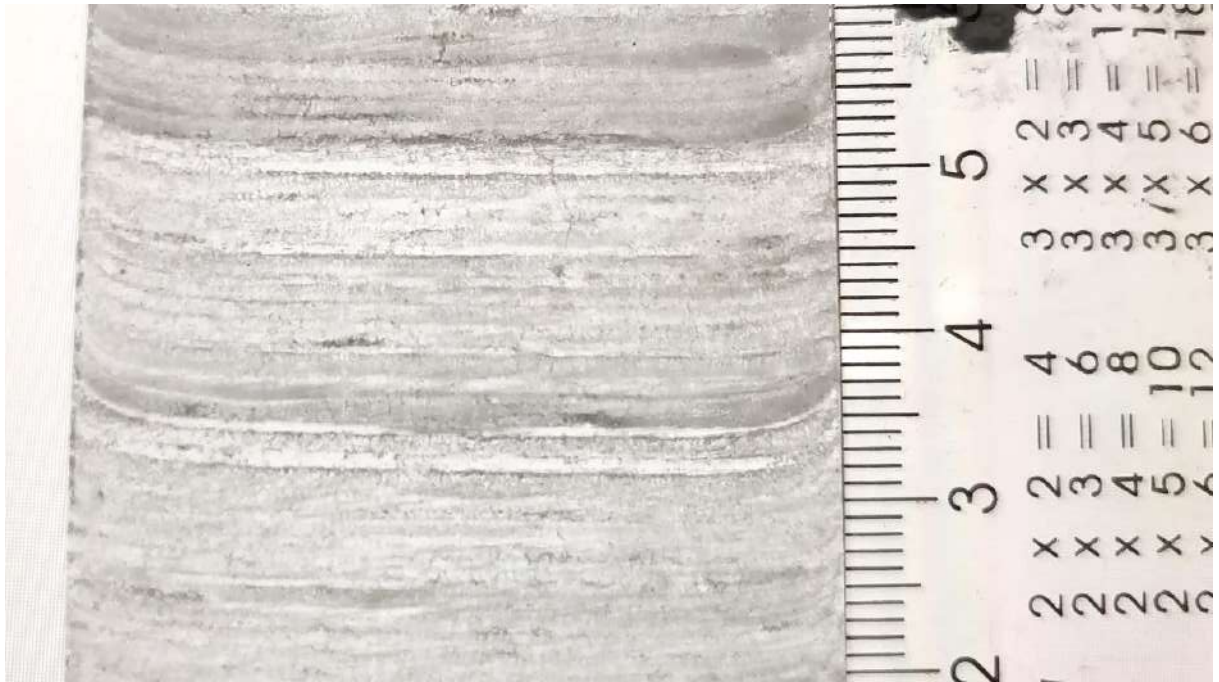


Рис. 117. Фрагмент продольного среза образца № 38 слабосоленого чистого льда до испытаний методом трехосного сжатия

В поляризованном свете без увеличения отмечено, что слабосоленый чистый лед в основном содержит мелкие кристаллы округлой формы с размерами в поперечнике в среднем 1-3 мм, по границе намороженных слоев присутствуют протяженные кристаллы длиной 10-20 мм и толщиной около 1 мм. При сравнении с ультрапресным чистым льдом ярко видны различия в микростроении. Во-первых, слабосоленый чистый лед обладает более мелкозернистой структурой. Во-вторых, в нем отсутствуют удлиненные перпендикулярно слоистости льда кристаллы, местами встречаются горизонтально-вытянутые кристаллы. Эти два фактора, по-видимому, могли привести к некоторому увеличению сопротивления деформированию и разрушению на фоне повышенной солености льда в длительных испытаниях методом трехосного сжатия (см. раздел 3.3), (рис. 118).

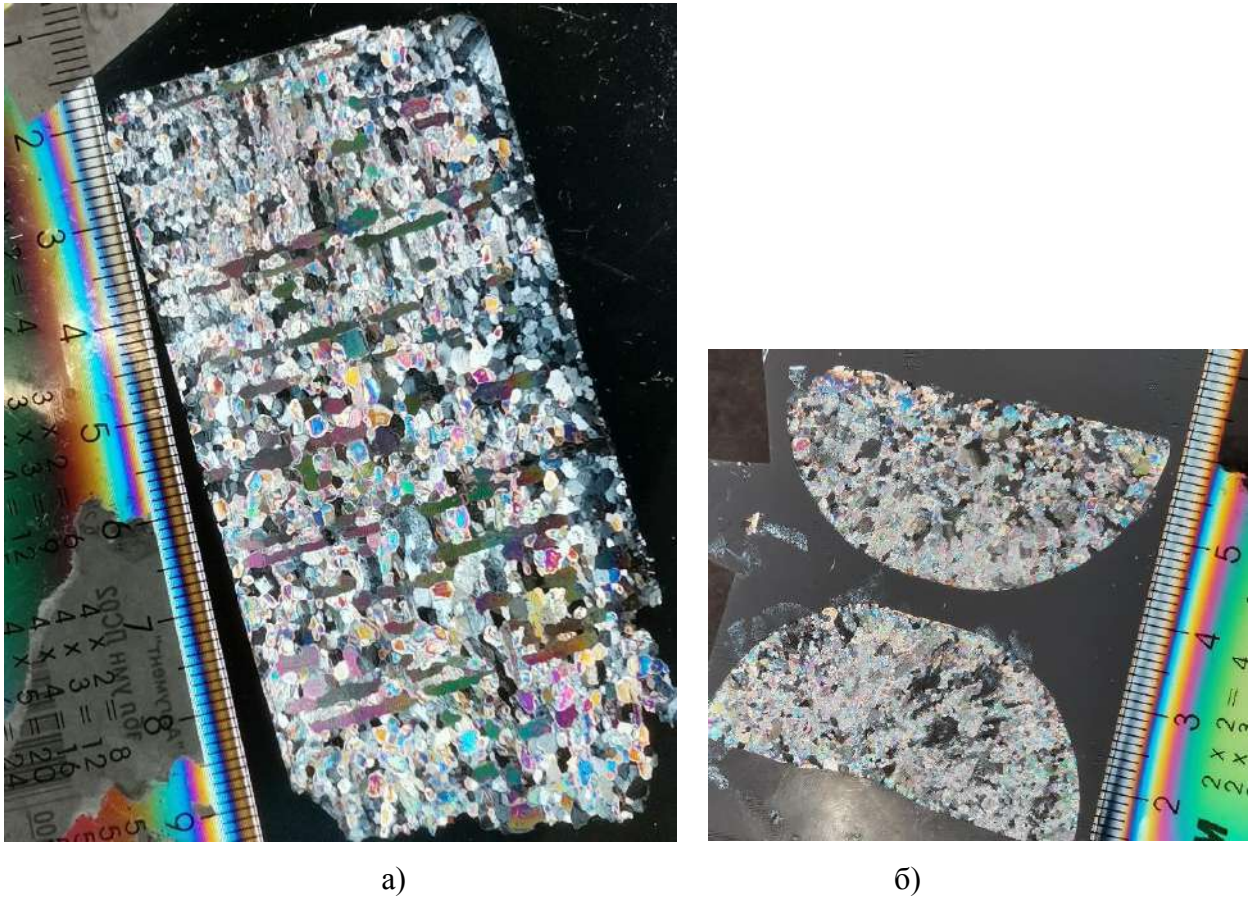


Рис. 118. Продольный (а) и поперечный (б) срезы образца № 38 слабосоленого чистого льда в поляризованном свете без увеличения до испытаний методом трехосного сжатия

При анализе структуры слабосоленого чистого льда в поляризационном микроскопе видно, что размер кристаллов в среднем составляет 1-3 мм. Реже встречаются кристаллы до 4 мм и более. Форма кристаллов по большей части приближена к правильной, границы кристаллов четкие и угловатые. Весь слабосоленый чистый лед содержит большое количество воздушных пузырьков, которые сосредоточены как на границах намораживаемых слоев, так и в их пределах. Воздушные включения в основном являются сферическими, но местами встречаются вытянутые, цилиндрические формы. Их размер в основном доходит до десятков долей миллиметра (рис. 119, 120).

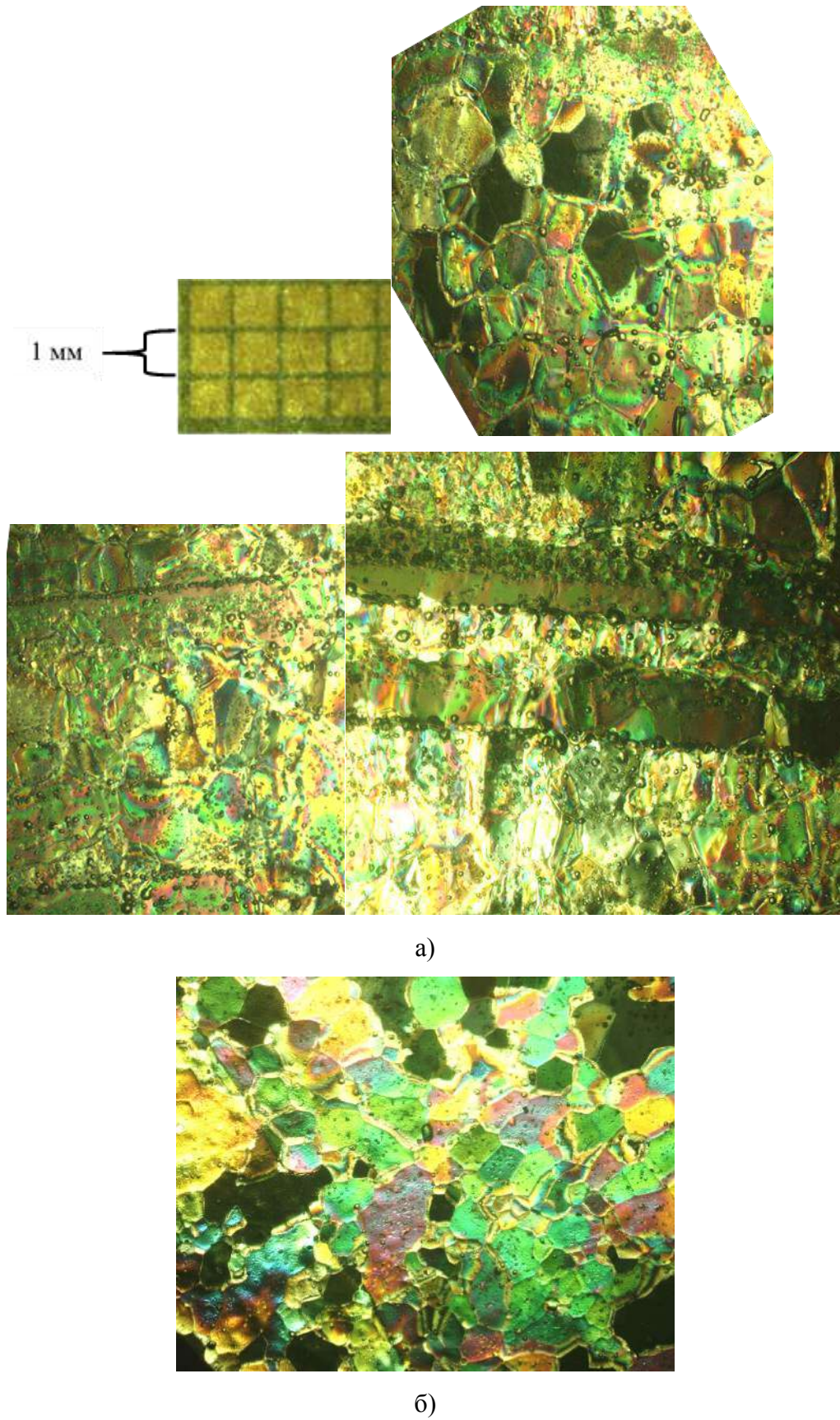


Рис. 119. Продольный (а) и поперечный (б) срезы образца № 38 слабосоленого чистого льда в поляризованном свете микроскопа МБС-9 до испытаний методом трехосного сжатия

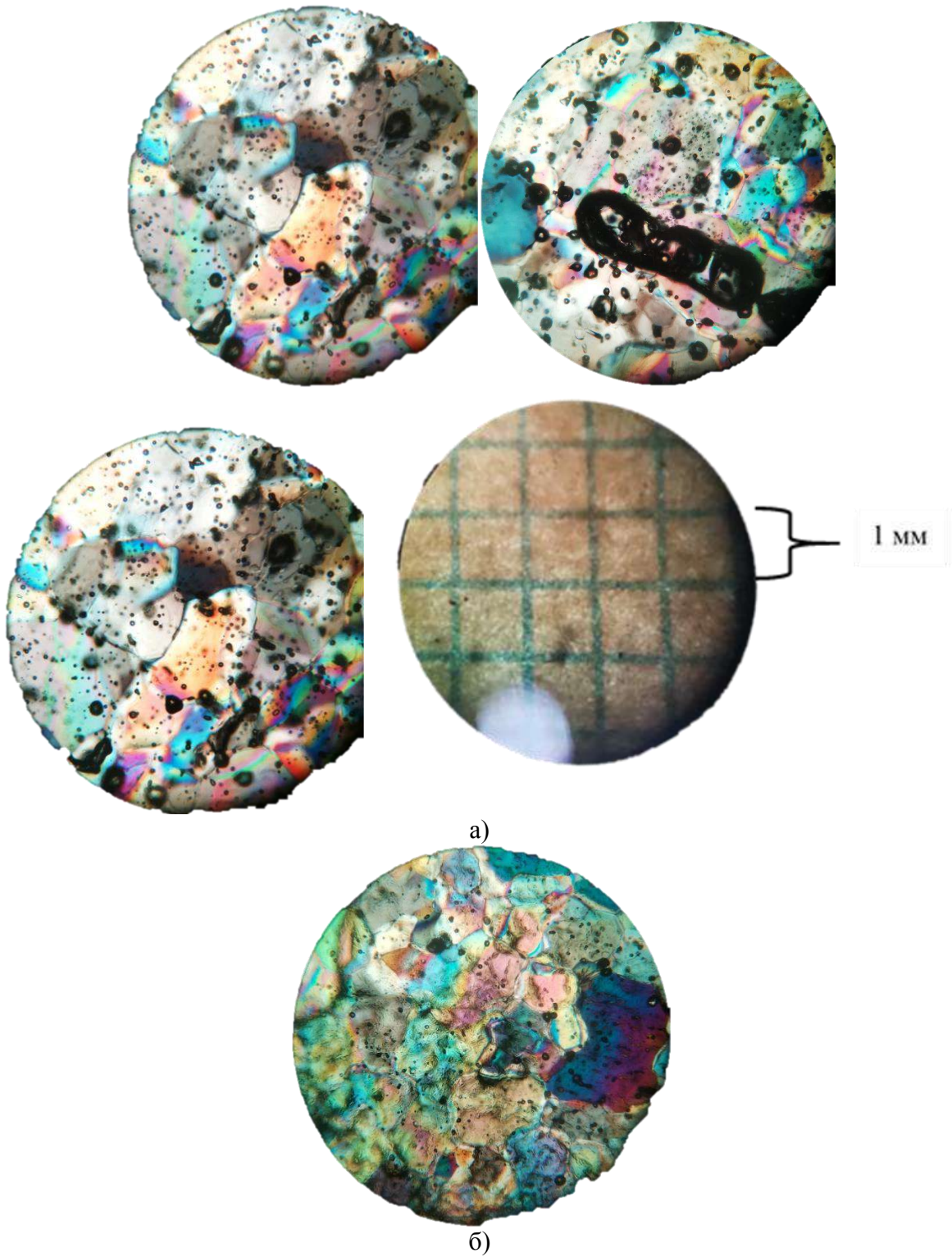


Рис. 120. Продольный (а) и поперечный (б) срезы образца № 38 слабосоленого чистого льда в поляризованном свете микроскопа Биомед до испытаний методом трехосного сжатия

Рассмотрим теперь результаты исследования изменений в микростроении льда после проведения испытаний методом трехосного сжатия по быстрой и длительной схемам нагружения.

Влияние быстрых кинематических испытаний методом трехосного сжатия на структурно-текстурные особенности льда изучено на примере образца № 31 ультрапресного чистого льда, испытанного со скоростью деформирования 0,1 мм/мин. Его продольный срез после проведения испытания представлен на рис. 80, а (раздел 3.3). В центре образца № 31 присутствует трещиноватая зона с высокой степенью непрозрачности, а на его торцевых частях текстура практически не изменена. При анализе продольного среза образца в поляризованном свете без увеличения обнаружено, что в его средней части кристаллы льда раздробились на такие мелкие части, что невозможно определить границы осколков. Их размер удастся отследить только в поляризационном микроскопе с увеличением 4х. Определено, что измельченные части кристаллов составляют первые миллиметры и разделены между собой сетью непросвечивающихся трещин. В верхней и нижней частях образца (у оснований) зафиксированы кристаллы льда длиной до 1-2 см, очевидно, не подвергшиеся изменениям (рис. 121).

При испытании со скоростью деформирования 0,1 мм/мин прежде крупные, удлиненные перпендикулярно слоистости кристаллы локально измельчились в центральной части образца, сняв тем самым нарастающее напряжение, за счет чего кристаллы в торцевых частях остались значительных размеров. При более высоких скоростях деформирования практически все кристаллы подвергнутся дроблению и скалыванию, как это зафиксировано в трещиноватой зоне образца № 31.

Исследование влияния длительного статического нагружения на микростроение льда проведено на примере двух образцов ультрапресного чистого льда № 4, № 1б и одного образца ледогрунта № 12.

Изменение структурно-текстурных особенностей ультрапресного чистого льда (образец № 4) после длительного испытания методом трехосного сжатия (см. раздел 3.3) представлено на рис. 122. Его 7-ми ступенчатое нагружение длилось около 124 ч, а на последней ступени нагрузки при девиаторе напряжений 1,75 МПа произошел переход в стадию прогрессирующего течения (рис. 88-90). В продольном срезе образца № 4 в отраженном свете видно отсутствие трещин с сохранением сплошности и высокой степени прозрачности. Субгоризонтальная слоистость наблюдается по большей части образца, и лишь на одном из его торцов плоскости слоев практически перестали фиксироваться. Кроме этого, форма образца № 4 подверглась существенным изменениям со значительным увеличением поперечного сечения в средней части.

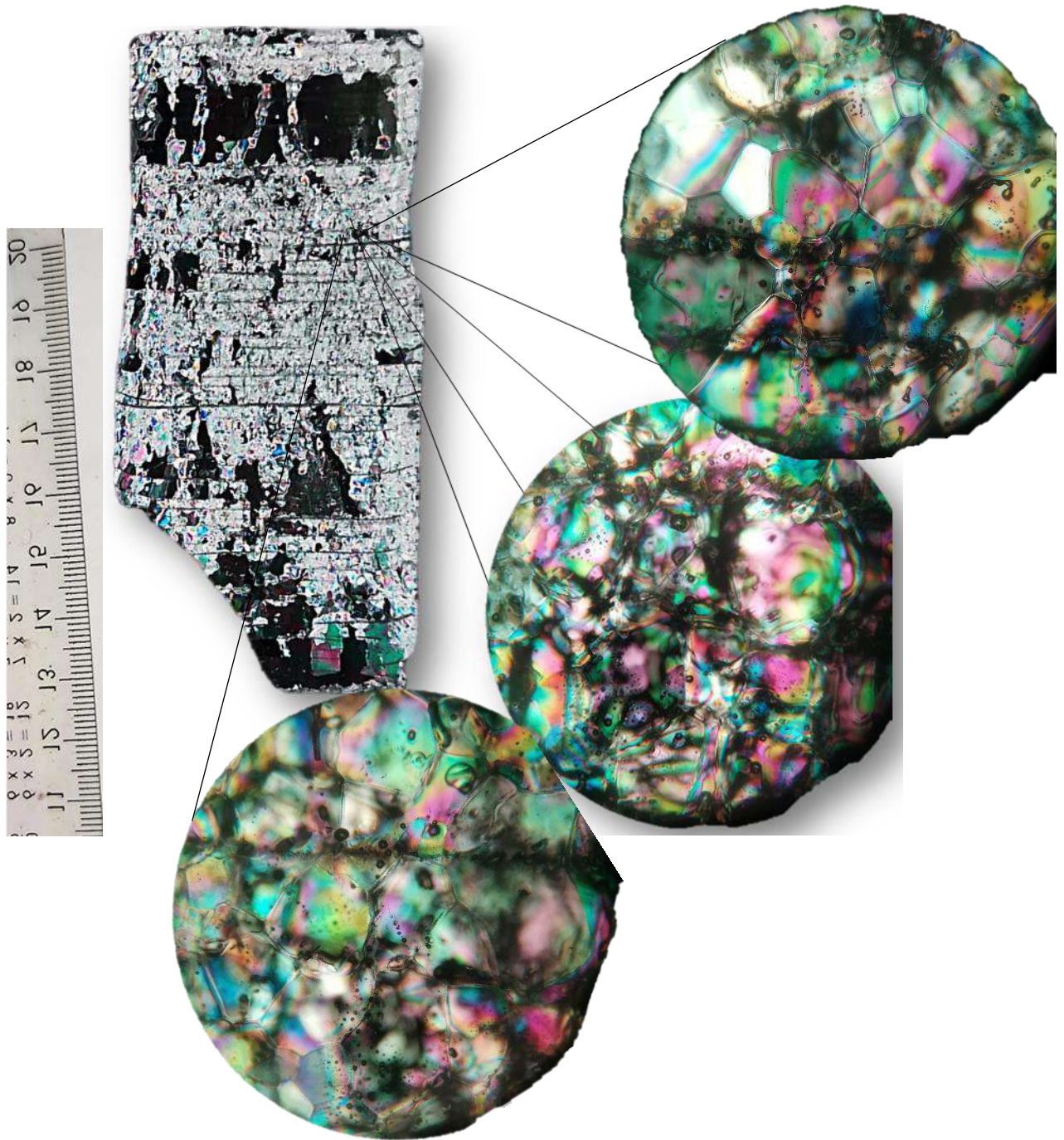


Рис. 121. Продольные срезы образца № 31 ультрачистого льда в поляризованном свете без увеличения и с увеличением зоны дробления (без масштаба) после быстрого испытания с постоянной скоростью деформирования 0,1 мм/мин в условиях трехосного сжатия

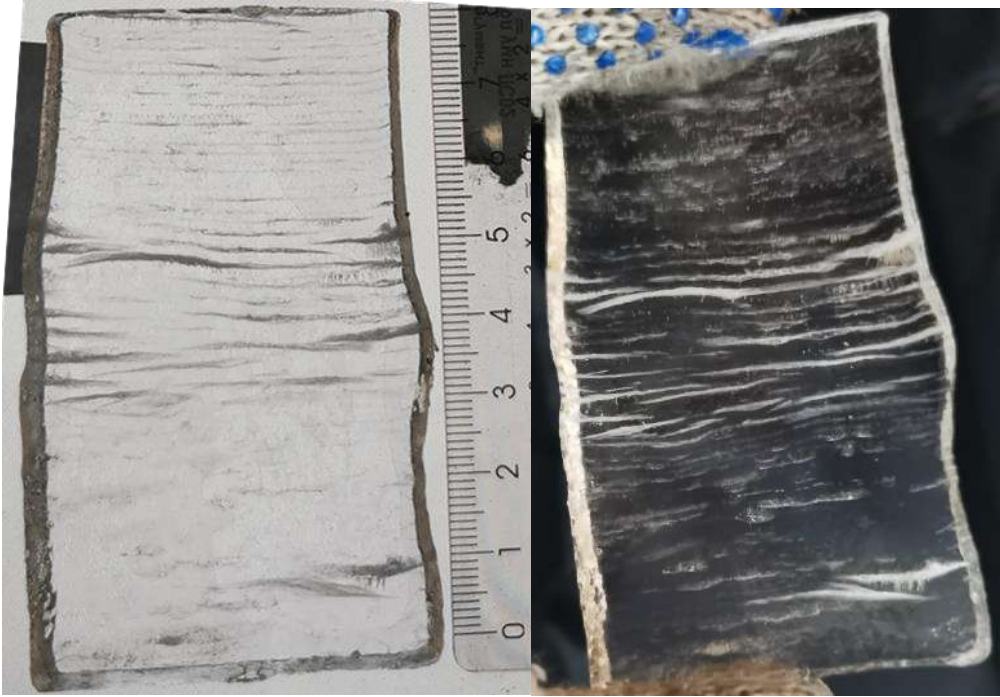


Рис. 122. Продольный срез образца № 4 ультрачистого чистого льда после длительного статического испытания методом трехосного сжатия

При анализе шлифов образца № 4 в поляризованном свете без увеличения обнаружено значительное изменение микростроения льда в результате длительного воздействия постоянной нагрузки (рис. 123). Так, ультрачистый чистый лед подвергся значительной первичной рекристаллизации, в ходе которой образовались новые кристаллы, выросшие за счет поглощения других зерен. В результате возросло общее количество кристаллов и снизились их размеры, форма кристаллов преобразовалась от удлиненной вкрест слоистости до округлой с более четкими, угловатыми границами.

Изменение микростроения ультрачистого чистого льда после длительных испытаний особенно хорошо видно в продольных сечениях образца № 4. Так, в его средней части зафиксирован наиболее мелкозернистый лед с большим количеством кристаллов размером в среднем 1-2 мм и менее. Вероятно, здесь находилась основная плоскость сдвига, по которой течение льда развивалось наиболее интенсивно. Именно в этой зоне произошло наибольшее изменение формы образца (рис. 123). В торцевых частях образца № 4 размер кристаллов варьирует от первых миллиметров до 10 мм. При этом в его верхней части фиксируются кристаллы наибольшего размера от 3 мм до 10 мм, а у нижнего торца это значение изменяется от 1-2 мм до 6-8 мм.

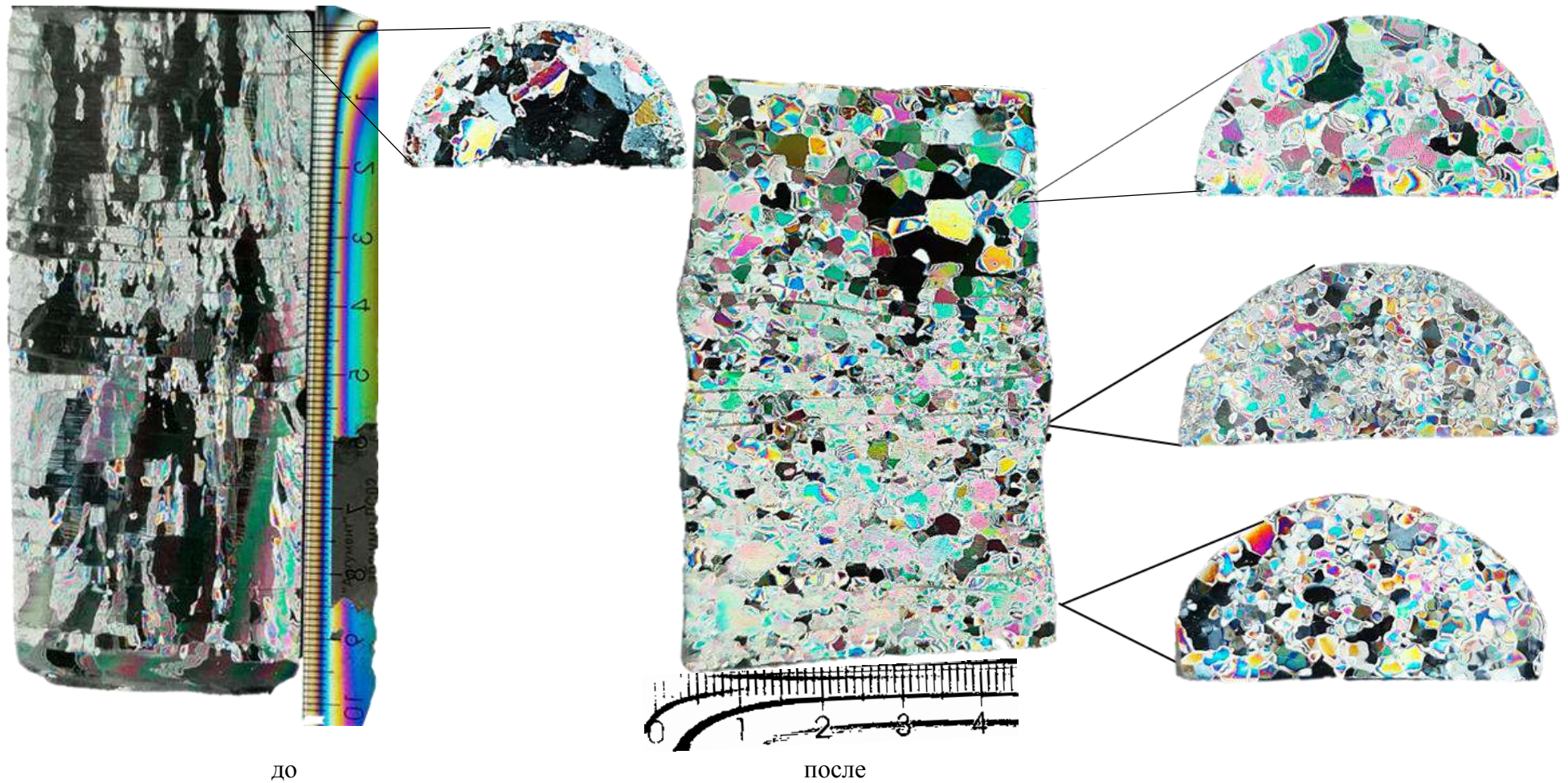


Рис. 123. Продольные и поперечные срезы образцов ультрапресного чистого льда в поляризованном свете без увеличения до (образец № 36) и после (образец № 4) длительного статического испытания методом трехосного сжатия

Изучение влияния длительного нагружения на микростроение ультрапресного чистого льда проведено также на втором образце № 1 б (см. раздел 3.2). Его испытание длилось в течение более 135 ч (8 ступеней) при всестороннем давлении 0,3 МПа до девиатора напряжений 1,6 МПа. В ходе нагружения стадия установившегося течения наступила при девиаторе напряжений 0,75 МПа, перехода к прогрессирующему течению не наблюдалось. Результаты анализа образца № 1 б в поляризованном свете без увеличения показывают сходное с образцом № 4 изменение структуры льда. Так, прежде удлиненные кристаллы уменьшились в 5-50 раз и обрели симметричную форму с четкими гранями. В центральной части образца зафиксирован минимальный размер кристаллов – менее 1-2 мм, на торцах кристаллы достигают 10-20 мм. В целом при сравнении образцов № 4 и № 1б последний из них является более крупнозернистым и однородным по распределению кристаллов разного размера (рис. 124).

В продольных срезах образца № 1б при увеличении 2х, 4х видны четкие границы кристаллов льда, их форма в большинстве случаев соответствует неправильным многоугольникам с острыми углами. Эту структуру можно отнести к гипидиоморфнозернистой. Здесь же отмечена сохранившаяся субгоризонтальная слоистость льда с концентрацией на контактах слоев воздушных пузырьков преимущественно сферической формы. Их диаметр варьирует от нескольких миллиметров до сотых долей миллиметра (рис. 125, 126).



Рис. 124. Продольные и поперечные срезы образца № 1 б ультрапресного чистого льда в поляризованном свете без увеличения после длительного статического испытания методом трехосного сжатия

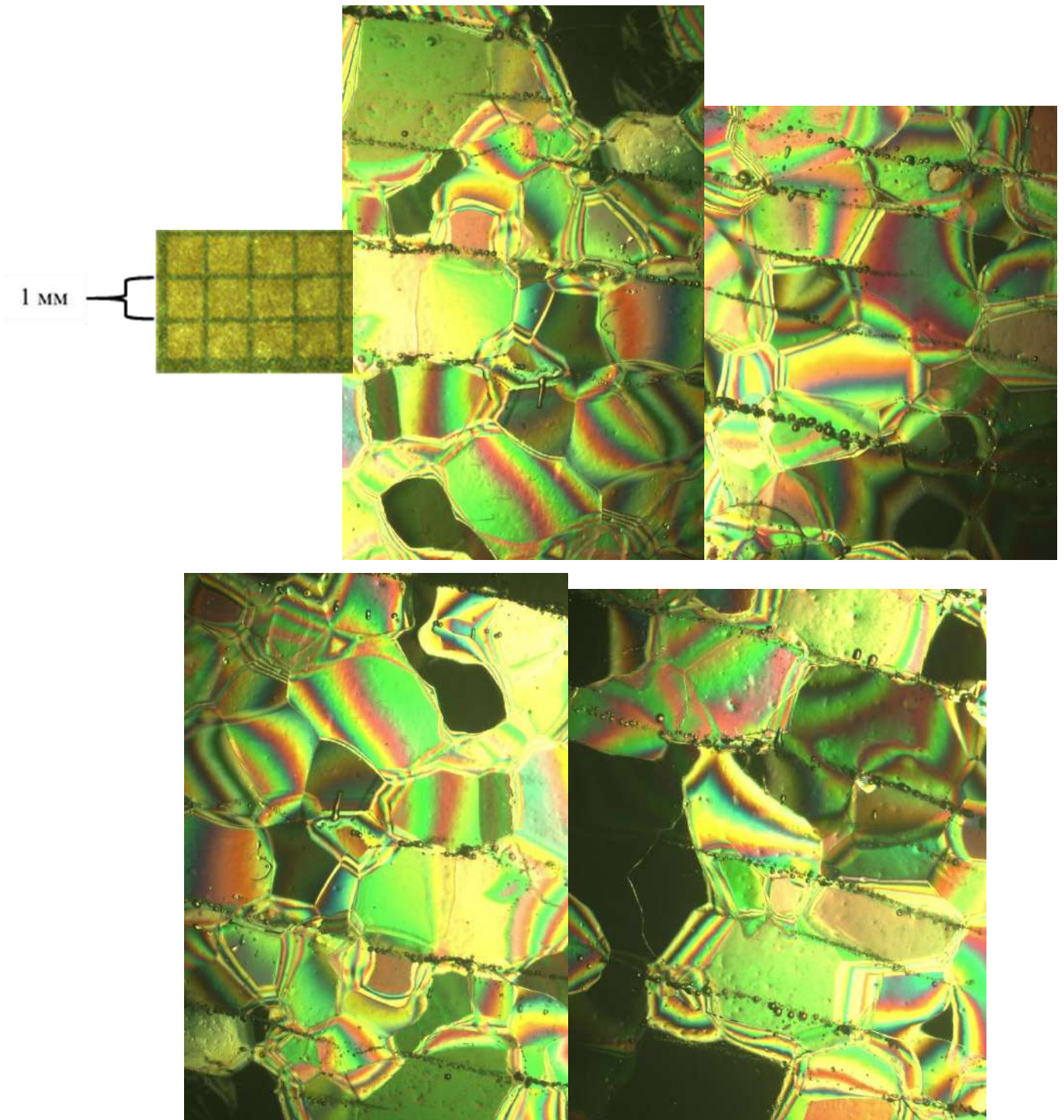


Рис. 125. Продольный срез образца № 1 б ультрачистого льда в поляризованном свете микроскопа МБС-9 после длительного статического испытания методом трехосного сжатия

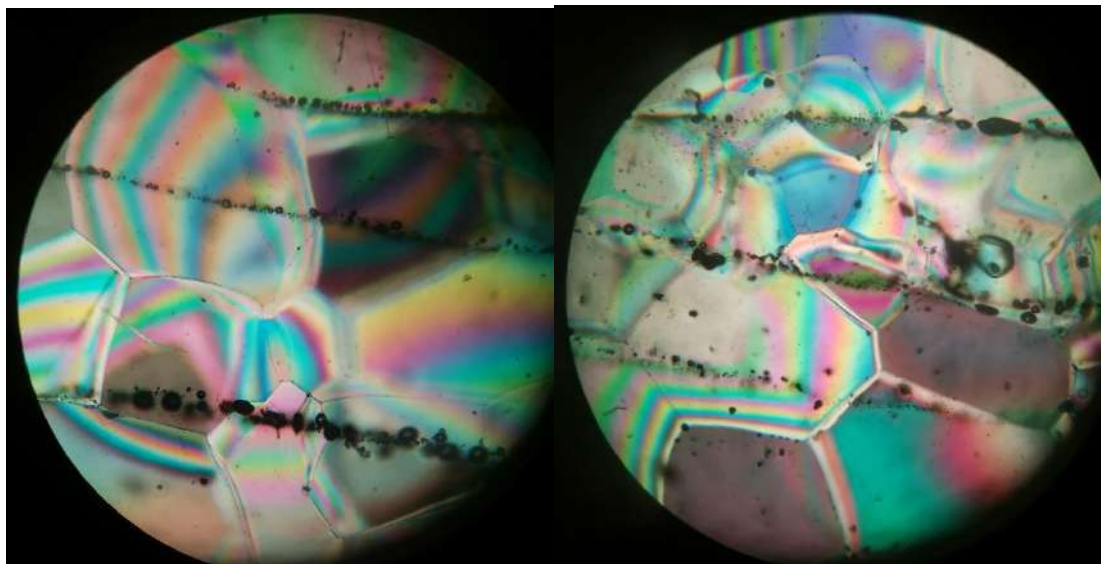


Рис. 126. Продольный срез образца № 1 б ультрачистого льда в поляризованном свете микроскопа Биомед после длительного статического испытания методом трехосного сжатия

Структурные исследования ледогрунта в поляризованном свете было затруднено по двум причинам. Во-первых, возникли проблемы с изготовлением шлифов – при шлифовке о металлическую поверхность в местах контакта песчаных слоев и чистого льда происходило разрушение образца. В связи с этим не удалось достичь желаемой толщины срезов, и она оказалась несколько выше, чем в случае с чистым льдом. Во-вторых, слои с пылеватым песком не просветлялись в поляризованном свете, что сделало их анализ невозможным. В результате удалось получить удовлетворительный продольный срез только образца № 12. Его испытание длилось более 180 ч (10 ступеней) до девиатора напряжений 2 МПа, при котором была достигнута практически 20% деформация образца, перехода в стадию прогрессирующей ползучести не реализовалось. Продольный срез образца ледогрунта № 12 в поляризованном свете без увеличения показан на рис. 127. После длительных испытаний в нем сохранилась субгоризонтальная слоистость с увеличением угла наклона слоев к краю образца. В слоях чистого льда видны кристаллы по конфигурации и размерам, схожие с кристаллами ультрачистого льда образцов № 4 и № 1б. Они имеют форму неправильных многоугольников с размерами около 1-3 мм. Границы кристаллов четкие, углы в большинстве случаев острые. В слоях с примесями пылеватого песка кристаллы льда просвечиваются слабо – так, что невозможно установить их границы и форму. Воздушные включения зафиксированы только при увеличении в микроскопе МБС-9 – они распределены локально на контактах слоев и имеют преимущественно шарообразную форму (рис. 128).



Рис. 127. Продольный срез образца № 12 ледогрунта в поляризованном свете без увеличения после длительного статического испытания в условиях трехосного сжатия

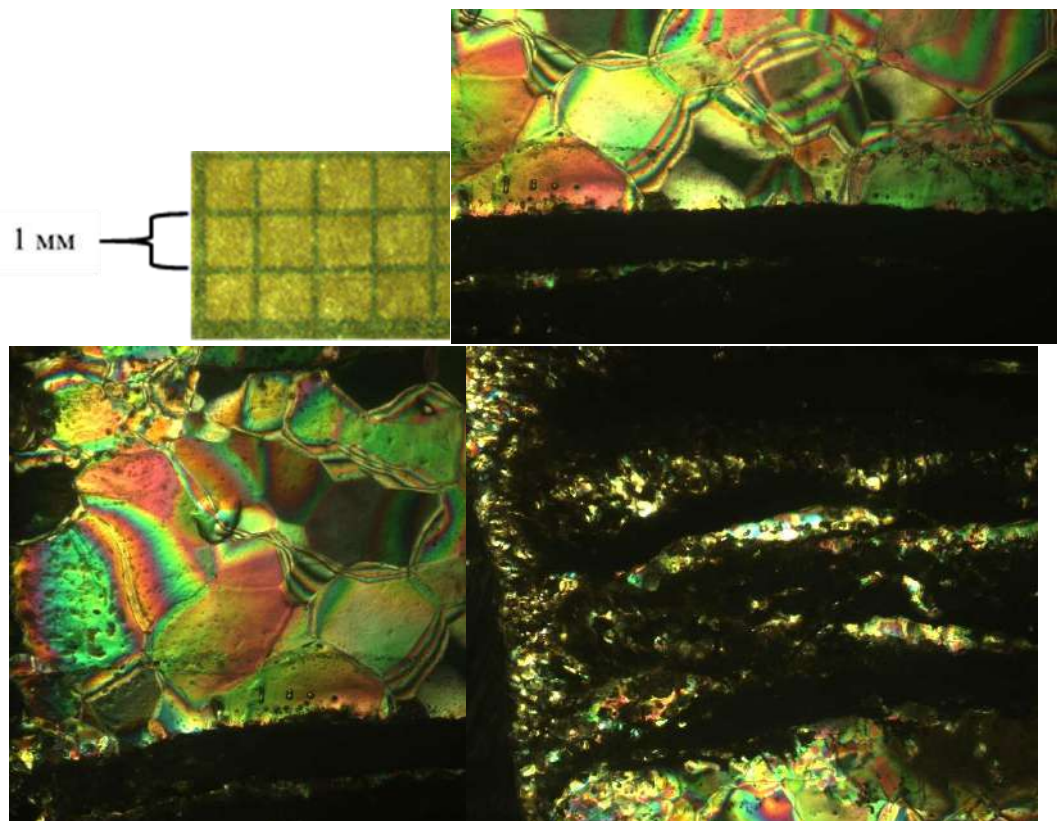


Рис. 128. Продольный срез образца № 12 ледогрунта в поляризованном свете микроскопа МБС-9 после длительного статического испытания в условиях трехосного сжатия

Таким образом, по результатам исследований структурно-текстурных особенностей льда можно сделать несколько выводов. Ультрапресный чистый лед до испытаний обладает аллотриаморфнозернистой структурой с преимущественно удлиненными перпендикулярно слоистости кристаллами длиной до 6 см и шириной до 2 см, с четкими и плавными границами, без острых углов и воздушными включениями сферической формы, расположенными в основном на границе слоев. Слабосоленый чистый лед до испытаний имеет более мелкозернистую структуру с преимущественно округлыми кристаллами размером до 3 мм с большим количеством воздушных включений на границе и в пределах слоев, обладающих сферической и вытянутой формами. Ультрапресный и слабосоленый чистые льды до испытаний обладают горизонтально-слоистой текстурой. Испытания методом трехосного сжатия привели к значительным изменениям микростроения трех типов льда. В результате быстрого кинематического нагружения ультрапресного чистого льда прежде удлиненные перпендикулярно слоистости кристаллы раздробились на мелкие осколки размером менее 1 мм. Длительные испытания привели к сильной первичной рекристаллизации ультрапресного чистого льда и ледогрунта. Структура льда изменилась до гипидиоморфнозернистой, текстура осталась горизонтально-слоистой. В результате длительного воздействия нагрузки кристаллы льда приобрели форму неправильных многоугольников с острыми углами, а их размер снизился до 1-5 мм.

Резюмируя результаты исследований, приведенные в главе 3, можно сделать следующие основные **выводы**:

1. Мерзлые суглинки второй, третьей морских террас и салехардской свиты обладают достаточно низкой условно-мгновенной сдвиговой прочностью и высокой способностью к деформированию. Мерзлые пески казанцевской свиты имеют высокую условно-мгновенную сдвиговую прочность, мало зависящую от степени их засоленности. Последняя в большей мере оказывает влияние на сдвиговую и линейную жесткость мерзлого песка, показатели которой при увеличении степени засоленности от 0,08% до 0,18% в среднем снижаются на 45%. Увеличение степени засоленности сказывается на всех показателях реологических свойств мерзлого песка. Так, например, переход в стадию незатухающей ползучести у средnezасоленных песчаных грунтов (при $D_{sal} = 0,22$ и $0,24\%$) происходит при девиаторе напряжений в среднем меньшем на 20-25%, чем это наблюдается у слабозасоленных разностей (при $D_{sal} = 0,09$ и $0,12\%$). В связи с этим влияние степени засоленности мерзлых песчаных грунтов на показатели их физико-механических свойств необходимо учитывать при прогнозе изменения НДС грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров.

2. Исследование поведения льда под нагрузкой проводили на искусственных образцах трех типов льда, изготовленных методом послойного намораживания с учетом особенностей состава и строения пластовых льдов Харасавэйского месторождения. К ним отнесли: ультрапресный чистый лед, ледогрунт и слабосоленый чистый лед. По результатам быстрых кинематических испытаний методом трехосного сжатия получен высокий уровень сдвиговой прочности и жесткости трех типов льда. При этом все показатели физико-механических свойств льда оказались в высокой зависимости от скорости деформирования. При ее снижении наблюдалось падение сдвиговой прочности, модулей сдвига и общей деформации, снижался предел текучести и увеличивалась доля пластических деформаций. Выявленную закономерность необходимо учитывать при прогнозе изменения НДС грунтовых толщ. В случае если требуется оценить преимущественно упругое поведение мерзлого массива, то следует проводить испытания льда при максимально возможной скорости деформирования.

3. По результатам быстрых испытаний методом трехосного сжатия слабосоленый чистый лед оказался менее прочным и более деформируемым, чем ультрапресный чистый лед. При этом разница в их сдвиговой прочности и жесткости зависела от скорости деформирования. Наименьшее отличие в их механическом поведении наблюдалось при скорости деформирования 1 мм/мин – расхождение в сдвиговой прочности составило 4%, а в модуле сдвига – 30%. Однако при сравнении результатов длительных испытаний трехосного сжатия было обнаружено, что показатели физико-механических свойств слабосоленого чистого льда практически во всех экспериментах отличались не более чем на 6-15% от ультрапресного чистого льда. В связи с тем, что слабосоленый чистый лед достаточно редко встречается в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения, и его реологическое поведение оказалось схоже с ультрапресным чистым льдом, принято решение не учитывать его в дальнейших численных расчетах изменения НДС грунтовых толщ при сооружении в них подземных резервуаров.

4. Результаты испытаний трехосного сжатия ультрапресного чистого льда и ледогрунта показали существенную разницу в их механическом поведении под нагрузкой. По результатам быстрых кинематических испытаний наиболее прочным оказался ультрапресный чистый лед, его сдвиговая прочность в среднем была выше на 20-25%, чем у ледогрунта. По результатам длительных испытаний, напротив, ледогрунт оказался менее подвержен ползучести, чем ультрапресный чистый лед. Так, при всех исследуемых уровнях напряжений пластично-вязкое течение первого развивалось с меньшей скоростью продольной деформации. Кроме этого, условно длительная прочность ультрапресного чистого льда оказалась в среднем на 25-30% ниже, чем у ледогрунта. Подобное ослабление

реологических свойств при наличии во льдах грунтовых примесей может оказать значительное влияние на изменение НДС грунтовых толщ, содержащих ледогрунты, при сооружении в них подземных резервуаров и должно учитываться в его прогнозе.

5. Проведены исследования структурно-текстурных особенностей образцов льда до и после проведения испытаний методом трехосного сжатия. Ультрапресный чистый лед до испытаний обладает аллотриаморфнозернистой структурой с преимущественно удлиненными до 6 см перпендикулярно слоистости кристаллами льда. Слабосоленый чистый лед до испытаний имеет более мелкозернистую структуру с округлыми кристаллами до 3 мм с большим количеством воздушных включений. Ультрапресный и слабосоленый чистые льды до испытаний обладают горизонтально-слоистой текстурой. Выявлено, что в результате быстрого кинематического нагружения кристаллы льда дробятся на мелкие осколки размером менее 1 мм. Длительное статическое нагружение приводит к сильной первичной рекристаллизации льда, в результате которой его кристаллы приобретают форму неправильных многоугольников размером 1-5 мм, а структура изменяется до гипидиоморфнозернистой. После длительного воздействия нагрузки зафиксировано сохранение горизонтально-слоистой текстуры льда.

Глава 4

Прогноз изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения

4.1. Технология строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения

Строительство подземных резервуаров для захоронения отходов бурения ведут в мерзлых песчаных грунтах. С поверхности осуществляют бурение технологической скважины с обсадкой и цементацией затрубного пространства. Затем монтируют скважинный снаряд (6), служащий для подачи воды, сжатого воздуха и подъема пульпы (водогрунтовой смеси). Теплоноситель в виде воды и /или пара (4) подают по межтрубному пространству в толщу мерзлых песчаных грунтов [53]. Под его действием ледоцементные связи в мерзлых грунтах разрушаются, грунт переходит в талое состояние и опускается на дно образующейся емкости. По колонне труб происходит отведение образовавшейся пульпы.

Подъем смеси производят эрлифтным способом – для работы эрлифта по затрубю подают воздух от компрессора (5). Поднятая пульпа отводится в гидроотвал. Вода стекает в зумпф, откуда насосом оборотной воды (7) в дальнейшем ее направляют на строительство следующих резервуаров (рис. 129). Рассмотренная схема отражает процесс строительства в общем, в зависимости от конкретных геологических условий конструкция скважинного снаряда и состав используемого оборудования может изменяться (см. ниже) [3].

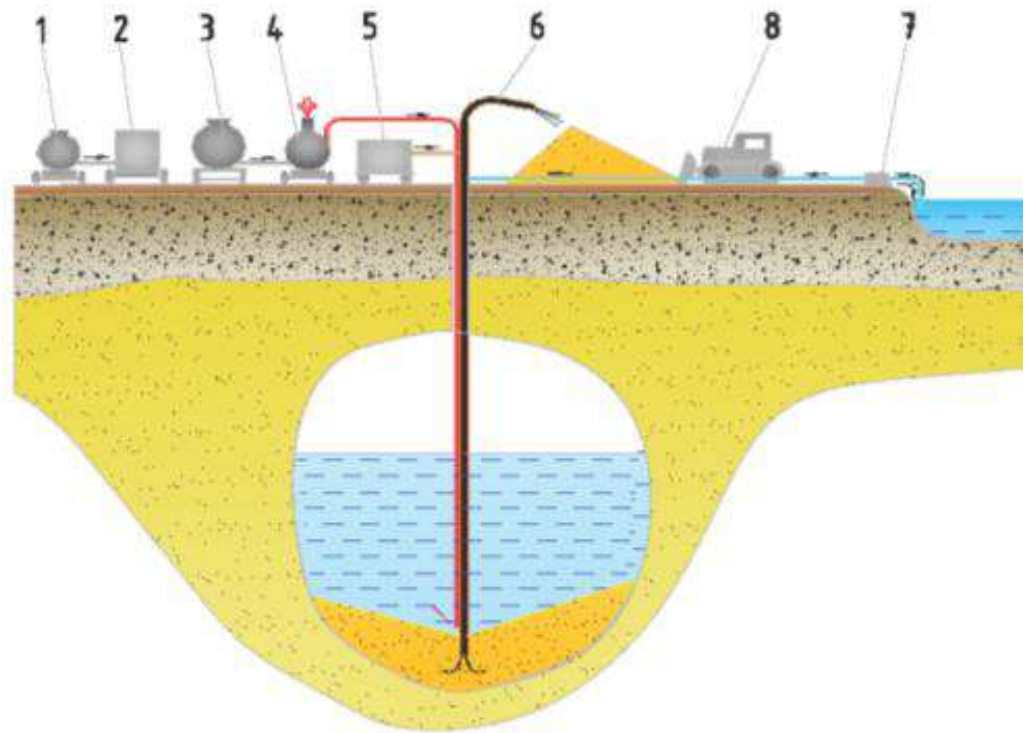


Рис. 129. Принципиальная технологическая схема строительства скважинного подземного резервуара в многолетнемерзлых породах: 1 – емкость дизтоплива; 2 – дизельная электростанция; 3 – емкость для воды; 4 – парогенераторная установка; 5 – компрессор; 6 – скважинный снаряд; 7 – насос обратной воды; 8 – бульдозер [40]

Рассмотрим фрагмент наземной части одной из площадок строительства подземных резервуаров на территории Харасавэйского месторождения (рис. 130). Для фиксации и подъема/спуска пульпоотборной колонны, скважинного снаряда и др. в скважину (2) используют мачту (1). Из пульпоотборной колонны водогрунтовая смесь направляется в пульпоотводную трубу (3), откуда выходит (4) в гидроотвал (5). Для работы эрлифта используют компрессор (6), для подачи воды – насос (7). В составе наземного комплекса в последнее время стали применять теплообменник (8), состоящий из двух вложенных друг в друга труб. При низкой среднесуточной температуре воздуха для подогрева воды используют котельную (9), от нее теплая вода по замкнутому контуру поступает во внутреннюю трубу теплообменника (8), которая за счет передачи тепла нагревает воду, идущую по внешней трубе от насоса в подземный резервуар. При благоприятных погодных условиях вода в гидроотвале подогревается солнечным излучением до оптимальной для строительства температуры (в среднем она составляет 6-8 °С). Параметры строительства, такие как: температура воды на входе и на выходе, расход подаваемой воды и др., – отображаются на щитке управления (10), что позволяет контролировать процесс строительства в режиме реального времени.



Рис. 130. Фрагмент площадки строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения (фото автора): 1 – мачта, 2 – скважина, 3 – пульпопроводная труба, 4 – пульпа, 5 – гидроотвал (карта намыва), 6 – компрессор, 7– насос, 8 – теплообменник, 9 – котельная, 10 – щиток управления (пояснения см. в тексте).

Управление строительством и формообразованием подземных резервуаров ведут с помощью регулирования уровня раздела «вода-воздух», который повышают или понижают ступенями. Определение технологических параметров строительства, таких как: направление, количество и продолжительность ступеней, расход подачи воды и др., – производят в зависимости от геологического строения. Их расчет выполняют перед сооружением каждого подземного резервуара по результатам исследования кернового материала скважины.

После окончания строительства подземные резервуары обследуют с помощью звуколокационных исследований [87]. Это позволяет получить фактическую форму и объем каждой емкости в трехмерной проекции с точными значениями их радиусов на различных глубинах. Готовый подземный резервуар в общем случае имеет конусовидную форму (рис. 131).

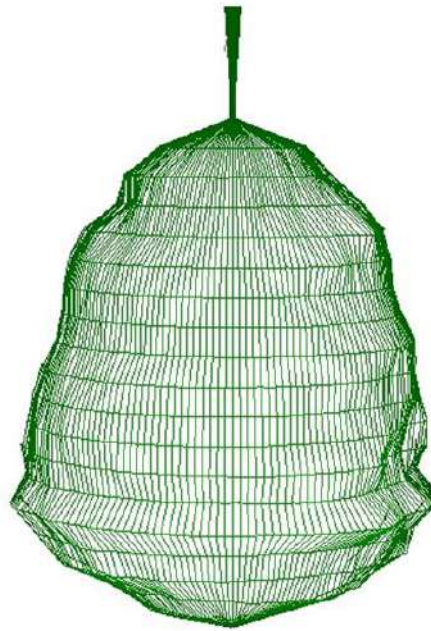


Рис. 131. Изображение одного из готовых подземных резервуаров на территории Харасавэйского месторождения в трехмерной проекции по результатам звуколокационной съемки

После завершения строительства и обследования подземного резервуара из него откачивают воду и проводят консервацию. Для предотвращения попадания осадков в емкость, на оголовок ее эксплуатационной скважины устанавливают крышку с резиновым уплотнителем (рис. 132).



Рис. 132. Консервация подземного резервуара для захоронения отходов бурения
1 – крышка для предотвращения попадания осадков в подземный резервуар

Готовые подземные резервуары используют для конечного размещения отходов бурения, образующихся при освоении Харасавэйского месторождения. Наибольшая их часть (более 90%) состоит из отходов бурения эксплуатационных газовых скважин месторождения. Они, в свою очередь, включают буровой шлам, отработанный буровой раствор и буровые сточные воды. Суммарный средний объем отработанного бурового раствора на Харасавэйском месторождении составляет 66 тысяч м³, объем бурового шлама – 39 тысяч м³, объем буровых сточных вод – 131 тысяча м³. Для бурения скважин на исследуемой территории применяются пресные полимер-глинистые суспензии на водной основе. Плотность растворов варьирует от 1060 до 1320 кг/м³. Температура замерзания в среднем составляет -1,5÷-2 °С. Состав отходов бурения газовых и газоконденсатных скважин, подлежащих захоронению на территории Харасавэйского месторождения, приведен в приложении 7 [87].

Остальная часть захораниваемых в подземные резервуары отходов (менее 9% от общего объема) приходится на отходы бурения объектов обустройства месторождения, образующихся при бурении поглощающих скважин, скважин глубинного заземления и глубинного анодного заземления; буровые отходы от бурения технологических и наблюдательных скважин для подземных резервуаров, а также техническую воду от размыва подземных резервуаров. Среди них около 3 тысяч м³ относится к твердой фазе и около 18 тысяч м³ к жидкой.

Все отходы бурения относятся к четвертому и/или пятому классу опасности. Объем, планируемый к захоронению в подземные резервуары на территории Харасавэйского месторождения, составляет около 238 400 м³ [87].

Образование отходов бурения происходит неравномерно, что связано с различными этапами проходки эксплуатационных газовых скважин. Так, в начальный момент времени при бурении направления значительного диаметра образуется большое количество бурового шлама, объем которого доходит до около 40 м³ за 12 ч работы. В дальнейшем его суточный объем не превышает 10 м³, и большая часть отходов относится уже к жидкой составляющей.

Накопление отходов бурения и их вывоз с территории кустовой газовой площадки осуществляют автотранспортом (рис. 133). В пределах полигона подземных резервуаров выгрузку отходов производят в специальный приемный бункер, оборудованный шламовым насосом для перекачки отходов бурения непосредственно в подземный резервуар. Отходы жидкой консистенции сразу закачивают в подземный резервуар. Если отходы бурения состоят из твердого бурового шлама, то их предварительно перемешивают и измельчают с применением специальных установок (рис. 134).



Рис. 133. Накопление отходов бурения на одной из кустовых газовых площадок территории Харасавэйского месторождения (фото автора): 1 – автотранспорт для накопления и транспортировки отходов бурения, 2 – подача отходов бурения от бурения эксплуатационной скважины, 3 – бурение эксплуатационной скважины



а)

б)

Рис. 134. Приемные бункеры на площадке подземных резервуаров Харасавэйского месторождения (фото автора):

а) для твердых отходов бурения: 1 – приемный бункер, 2 – установка для перемешивания, 3 – шламмовый насос;

б) для жидких отходов бурения: 4 – приемный бункер, 5 – шламмовый насос

Заполнение подземного резервуара выполняют таким образом, чтобы верхний уровень отходов бурения был на 1-2 м ниже башмака обсадной колонны скважины. Таким образом, в своде подземного резервуара остается свободное воздушное пространство, которое компенсирует возможное расширение отходов бурения при их замерзании. С течением времени за счет температурного взаимодействия с вмещающими мерзлыми грунтами отходы бурения промерзают (см. главу 2). После заполнения подземного резервуара в обсадной колонне скважины устанавливают цементный мост, а ее устье срезают ниже поверхности земли и засыпают грунтом – проводится ликвидация подземного резервуара.

4.2. Методика составления прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения

Заполнение готовых подземных резервуаров проводят по мере образования отходов бурения. Этот процесс может длиться несколько лет, пока не будет завершено бурение всех скважин, и месторождение не будет готово к запуску. Ожидая ввода в эксплуатацию, подземные резервуары находятся в незаполненном состоянии. В течение этого времени их свод и стенки остаются в незакрепленном состоянии, что приводит к изменению их формы и объема за счет деформирования и, в некоторых случаях, разрушения мерзлых грунтов. Для предотвращения аварийных ситуаций и значительного снижения эксплуатационной пригодности подземных резервуаров необходимо выполнение прогноза изменения НДС вмещающих их грунтовых толщ.

Прогноз изменения НДС грунтовых толщ осуществляют численными методами в специализированных программных комплексах. Для описания механического поведения используют нелинейные математические модели, позволяющие учесть ползучесть мерзлых грунтов. По результатам численных расчетов полученные количественные показатели НДС сравнивают с установленными предельными значениями – критериями. Это позволяет оценить функциональную пригодность подземного резервуара в данной грунтовой толще с заданными параметрами в течение требуемого срока, в целом называемую *устойчивостью подземного резервуара*. Затем каждому подземному резервуару присваивают категорию состояния, которая показывает, какой режим дальнейшей эксплуатации позволит минимизировать влияние негативных геомеханических процессов.

Применяемая методика прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары, представлена в СП 123.13330.2012 «Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки» [58]

и в работе [21]. Однако ее применение не позволяет спрогнозировать возможность разрушения подземного резервуара и учесть снижение его объема с течением времени и др. Рассмотрим ее подробнее [49].

По методике [58] прогноз устойчивости подземных резервуаров проводят путем анализа изменения показателей НДС вмещающей его грунтовой толщи по трем критериям:

- размер области чрезмерных деформаций в своде выработки,
- размер области растягивающих нормальных напряжений на контуре выработки,
- значение оседания земной поверхности в районе устья скважины.

- Критерий № 1: размер области чрезмерных деформаций в своде выработки.

По результатам численного расчета НДС оценивают размер зоны чрезмерных деформаций грунта (при наличии) и сравнивают с предельным значением Ω (табл. 43). В данном случае чрезмерная деформация – это упругая, пластическая деформация и деформация ползучести, превосходящая 20%. К сожалению, точная количественная оценка величины пластической составляющей деформации численными методами затруднена. При численном моделировании для дисперсных грунтов используются упруго-пластические модели с неассоциированным законом пластического течения. Вследствие этого величина пластических деформаций определяется выбранной функцией пластического потенциала и историей нагружения. Достаточно точно воспроизвести историю нагружения при моделировании невозможно, кроме того, результат расчета зависит от конкретной используемой модели. В связи с этим достоверность расчетных пластических деформаций не доказана, а использование их конкретной величины в качестве критерия представляется необоснованным. Значительно более однозначным является определение размера областей предельного равновесия, в которых сформировалось напряженное состояние, вызывающее пластическое течение материала – пластических зон.

- Критерий № 2: размер области растягивающих нормальных напряжений на контуре выработки.

По результатам численного расчета из полученного распределения напряжений в грунте выделяют только зону растягивающих нормальных напряжений, по размеру которой резервуару присваивают одну из категорий устойчивости (табл. 43). Однако оценка размера зоны нормальных растягивающих напряжений в массиве без учета их величины не дает представления о возможности разрушения подземного резервуара [68]. Для того, чтобы определить, достигается ли разрушение резервуара, необходима оценка касательных напряжений в грунте. Это справедливо, так как причиной разрушения дисперсного грунта является сдвиг, который вызывается касательными напряжениями, а не осевое сжатие-

растяжение. Отсутствие в критерии анализа величины пластических зон не позволяет в полной мере оценить возможность разрушения подземных резервуаров в многолетнемерзлых грунтах [49] (рис. 135).

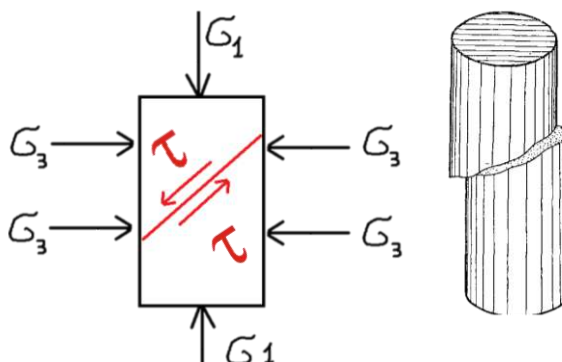


Рис. 135. Образование поверхности скольжения под действием касательных напряжений.

(σ_1 , σ_3 – соответственно, максимальное и минимальное главные напряжения,
 τ – касательное напряжение на опасной площадке)

- Критерий № 3: значение оседания земной поверхности в районе устья скважины.

Расчетное прогнозируемое оседание земной поверхности сравнивают с допустимыми величинами. При расчете оседания земной поверхности применяют численный и аналитический методы, регламентируемые действующей нормативно-технической документацией. По результатам расчета НДС определяют значение прогиба свода резервуара. Далее полученное значение подставляют в формулу и получают максимальное оседание земной поверхности:

$$\eta_{\max} = q_0 m \sqrt{n_1 n_2}, \quad (8)$$

где m – значение прогиба свода выработки-емкости;

q_0 – коэффициент, учитывающий характер затухания сдвижений от выработки к земной поверхности, принимается равным максимальному – 0,9;

n_1 и n_2 – коэффициенты подработанности, рассчитываемые исходя из геометрических характеристик выработки.

Формула (8) приведена в ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [27].

Применение аналитического расчета в данном случае является необоснованным, так как с его помощью невозможно учесть развитие ползучести мерзлых грунтов, которые, как уже было показано, обладают ярко-выраженными реологическими свойствами. В связи с этим значение как прогиба свода подземного резервуара, так и оседания земной поверхности над ним нужно определять численными методами.

- Способ дальнейшей эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения.

Исходя из проведенного прогноза НДС грунтовых толщ по максимальному полученному оценочному критерию, определяют категорию устойчивости подземного резервуара и сценарий его дальнейшей эксплуатации. Указанные ниже методы эксплуатации приведены в научно-исследовательских работах ООО «Газпром геотехнологии», но не встречаются ни в одном из действующих нормативных документов.

Если резервуар отнесен к I категории устойчивости, то возможно его нахождение в незаполненном состоянии до одного года. При присвоении II категории устойчивости резервуар необходимо заполнить водой для снижения уровня напряжений в массиве. Если подземный резервуар отнесен к III категории устойчивости, то необходима закачка продуктов высокой плотности сразу после окончания строительства, при этом следует избегать нахождения резервуара в пустом состоянии (табл. 43)

Однако в существующей методике отсутствуют рекомендации о последовательности заполнения подземных резервуаров. В связи с тем, что ввод в эксплуатацию производится поочередно, применение такого управляющего решения позволило бы сократить влияние негативных геомеханических процессов.

Таблица 43. Категория устойчивости подземного резервуара [58]

Категория устойчивости	Оценочные критерии		
	Максимальное оседание поверхности, η_{\max} , м	Размер области чрезмерных деформаций >20%, м	Размер области растягивающих напряжений, м
I – устойчивый	$\eta_{\max} < 0,025h$	= 0	= 0
II – условно устойчивый	$0,025h \leq \eta_{\max} \leq 0,05h$	< n < Ω	< n < Ω
III – неустойчивый	$0,05h < \eta_{\max}$	$\geq n$ $\geq \Omega$	$\geq n$ $\geq \Omega$

Примечание: параметр n – расстояние от свода подземного резервуара до вышележащего геологического слоя. Параметр Ω является обобщающим для геометрических размеров подземного резервуара: $\Omega = 0,04 * H/R * h$, где H – высота выработки, м; R – максимальный полупролет выработки (радиус), м; h – глубина заложения выработки, м.

Предлагаемая методика прогноза изменения НДС грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения

Согласно ГОСТ 27751-2014 [26] оценка надежности строительных объектов ведется по трем группам предельных состояний: (1) первая группа – состояния объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций и возникновению аварийной ситуации; (2) вторая группа предельных состояний – состояния объектов, превышение которых ведет к нарушению их нормальной эксплуатации, исчерпывается ресурс долговечности и др.; (3) особые предельные состояния – такие состояния, которые возникают при особых воздействиях и превышение которых приводит к разрушению строительных объектов с катастрофическими последствиями.

Прогноз устойчивости подземных резервуаров, сооружаемых в грунтовых толщах, целесообразно вести по первой и второй группам предельных состояний. Расчет по первой группе предельных состояний позволит оценить возможность наступления аварийной ситуации в результате разрушения подземного резервуара, второй – его эксплуатационную пригодность для захоронения отходов бурения. Ввиду отсутствия на объектах подземного хранения на территории Харасавэйского месторождения каких-либо специфических воздействий, расчет по третьей группе предельных можно не осуществлять.

1. Первое предельное состояние, а именно общая потеря устойчивости в своде резервуара фиксируется по развитию пластических зон. Определение их наличия или отсутствия должно проводиться не в один конкретный момент времени (например, непосредственно после сооружения или строго через несколько лет), а с определенной периодичностью от момента сооружения резервуара до ввода его в эксплуатацию. Это объясняется тем, что в численных расчетах не всегда учитывается изменение геометрического строения модели вследствие отсоединения зон предельного равновесия. Несмотря на нулевую жесткость при дальнейшем расчете, пластические зоны продолжают передавать нагрузку от собственного веса на прилегающий массив в допредельном состоянии. В реальном подземном резервуаре данные участки массива отсоединяются и вызывают подъем дна. В связи с этим при длительных численных расчетах в моделях возможно перераспределение НДС грунтовой толщи как с увеличением, так и со снижением размера пластических зон. Таким образом, оценку развития пластических зон по результатам расчетов рекомендуется проводить непосредственно сразу после сооружения подземного резервуара и с течением времени – через месяц, полгода, год и т.д.

Установление предельного размера пластических зон требует дополнительных исследований, однако с уверенностью можно сказать, что критическим является их

развитие до земной поверхности и выше глубины минимально возможного расположения свода подземного резервуара, которая на территории Харасавэйского месторождения должна составлять 10 метров. Выход пластических зон за пределы последнего из указанных интервалов приведет к влиянию сезонных колебаний температуры воздуха земной поверхности на процесс промерзания отходов бурения, что является недопустимым событием согласно проектной документации. Кроме этого, фиксация области с нарушением прочности грунта по оси свода подземного резервуара говорит об образовании надобсадной колонной объема, недоступного для захоронения отходов бурения. Если это значение велико, особенно в первый месяц после строительства, то подземный резервуар также признается аварийным.

Способ эксплуатации аварийного подземного резервуара определяется моментом времени, при котором в ходе расчета зафиксировано достижение предельного размера пластических зон. Основной целью в данном случае является недопущение развития прогнозируемого предельного состояния. Так, если по результатам прогноза критические области предельного равновесия фиксируются практически сразу после сооружения подземного резервуара, то необходим его скорейший ввод в эксплуатацию с закачкой твердых продуктов и ликвидация. При этом запрещается нахождение емкости в пустом состоянии, удаление из нее воды производят одновременно с заполнением отходами бурения. Если критические пластические зоны фиксируются спустя длительный промежуток времени, то ввод подземного резервуара в эксплуатацию необходим до прогнозируемого времени его перехода в аварийное состояние.

Оценка подземных резервуаров **по второй группе предельных состояний** будет проводиться по двум критериям. Первый из них – перемещение свода подземного резервуара и осадка земной поверхности над ним. По результатам численного расчета необходимо анализировать динамику их развития, так как в зависимости от геологического строения, формы и объема подземного резервуара эти процессы будут протекать различным образом. Так, в первые месяцы после сооружения подземного резервуара развитие перемещения его свода и оседание земной поверхности над ним может идти достаточно активно, с течением же времени будет наблюдаться практически полное их затухание. В других случаях возможно постепенное накопление значительных перемещений без снижения их интенсивности. Прогноз развития этих процессов в динамике позволяет оценить вклад мгновенных и длительных перемещений в общее их значение и принять эффективные меры по их снижению.

Второй оценочный критерий – уменьшение полезного объема подземного резервуара с течением времени вследствие деформирования мерзлых грунтов. Потеря

объема резервуара определяется величиной запывания выработки – конвергенцией в результате ползучести мерзлого грунта (табл. 44).

Если подземный резервуар по второй группе состояний имеет незначительные перемещения и конвергенцию, то его заполнение можно производить отходами бурения низкой плотности в любой момент времени. При прогнозе немалых: осадки земной поверхности, перемещении свода и конвергенции необходимо установить интенсивность протекания этих процессов для всех подземных резервуаров и в зависимости от этого определить очередность их заполнения. Подземные резервуары с прогнозируемыми значительными перемещениями свода и оседанием земной поверхности, в особенности если не наблюдается (или слабо наблюдается) их затухание с течением времени, должны быть введены в эксплуатацию в первую очередь. Абсолютные предельные значения критериев следует устанавливать по результатам натурных наблюдений и расчетов устойчивости построенных подземных резервуаров.

Таблица. 44. Оценочные критерии изменения НДС грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары

Группы предельных состояний	Оценочные критерии
Первая группа	размер пластических зон
Вторая группа	перемещение свода подземного резервуара и оседание земной поверхности
	уменьшение полезного объема подземного резервуара

Таким образом, с помощью предлагаемой методики можно спрогнозировать изменение НДС грунтовых толщ в результате строительства подземных резервуаров, провести их сравнение и установить схемы дальнейшей эксплуатации резервуаров, которые позволят снизить (или в некоторых случаях предотвратить) развитие негативных геомеханических процессов.

4.3. Постановка задачи численного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения

Прогноз изменения НДС семи выделенных благоприятных грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары (см. главу 2), выполнен методом конечных элементов в программном комплексе Simulia Abaqus/Standart. Расчет проводился в нелинейной постановке с неявной схемой интегрирования. Для описания механического поведения грунтовых толщ использовалась модель материала Extended Drucker-Prager (расширенная

упруго-вязко-пластическая модель Друкера-Прагера), отражающая упруго-вязкопластические свойства мерзлых грунтов (см. главу 2 и 3).

Решение задачи проводилось в осесимметричной постановке. Это упрощение было возможно, так как форма модельного подземного резервуара являлась фигурой вращения и обладала осевой симметрией. При значительном отличии в радиусах выработки в вертикальных сечениях необходимо проводить расчет по максимальному из них (по худшему случаю), либо в пространственной постановке.

Расчетная модель представляла собой слоистый массив мерзлых грунтов размером 70x70 м. Верхняя горизонтальная граница расчетной области соответствовала земной поверхности, нижняя горизонтальная граница располагалась на глубине 70 м, ширина области равнялась 70 м.

В каждый слоистый массив был вписан модельный подземный резервуар оптимальной формы с соотношением высоты к его максимальному радиусу равному 2,38 и объемом 2123 м³. На рис. 136 представлены значения радиусов данного резервуара по глубине с шагом равным 1 м. Равенство формы и объема модельного подземного резервуара строго соблюдалось во всех расчетных схемах (рис. 136). Следует отметить, что намеренно была выбрана наиболее благоприятная форма резервуара с точки зрения его устойчивости [50]. Это было необходимо для избежания высокого влияния на результаты прогноза особенностей конфигурации подземного резервуара

В качестве начального напряженного состояния в массиве задавалось геостатическое поле напряжений, вызванное гравитационными объемными силами. По краям расчетной области задавались следующие граничные условия: запрещалось перемещение грани массива параллельно оси Y (в направлении оси X), запрещались перемещения нижней границы массива параллельно оси X (в направлении Y). Расчет проведен без учета противодействия. Пример расчетной модели одной из грунтовых толщ с указанием граничных условий и размерами приведен на рис. 137.

Расчетные модели грунтовых толщ были разбиты сеткой с треугольными, трехузловыми элементами типа CAX3 с техникой построения free meshing. Для увеличения точности расчетов в окрестности подземного резервуара шаг сетки учащался. Общее количество элементов варьировало в зависимости от типа грунтовой толщи и доходило до 12-15 тысячи элементов. Пример расчетной сетки одной и грунтовых толщ представлен на рис. 137.

Решение задачи проводили в четыре шага: (1) Initial; (2) Geostatic; (3) Static, General; (4) Visco. На шаге (2) рассчитывалось геостатическое поле напряжений, на (3) выполнялось отсечение области массива грунтов с подземным резервуаром и вычислялись мгновенные

распределения напряжений и деформаций, на (4) получали изменение НДС грунтовой толщи с течением времени, которое в данной задаче было принято равным 3 годам.

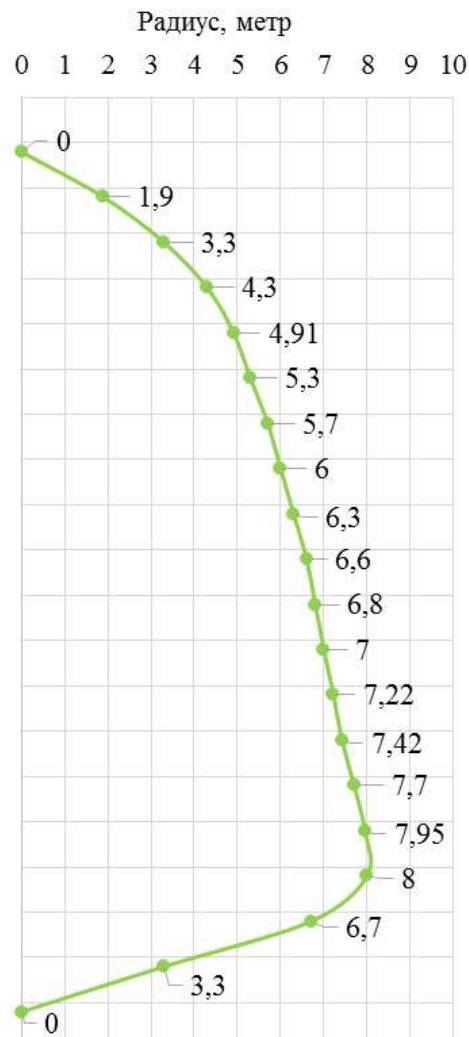


Рис. 136. Форма модельного подземного резервуара с указанием его радиусов по глубине с шагом в 1 м

В связи с тем, что благоприятные грунтовые толщи несколько отличались по мощности от слагающих их отложений, невозможно было расположить подземный резервуар на одинаковых глубинах. Для снижения влияния глубины заложения подземного резервуара на результаты прогноза его свод во всех случаях установлен на глубине 0,5 м от кровли первого пригодного для строительства слоя грунтов.

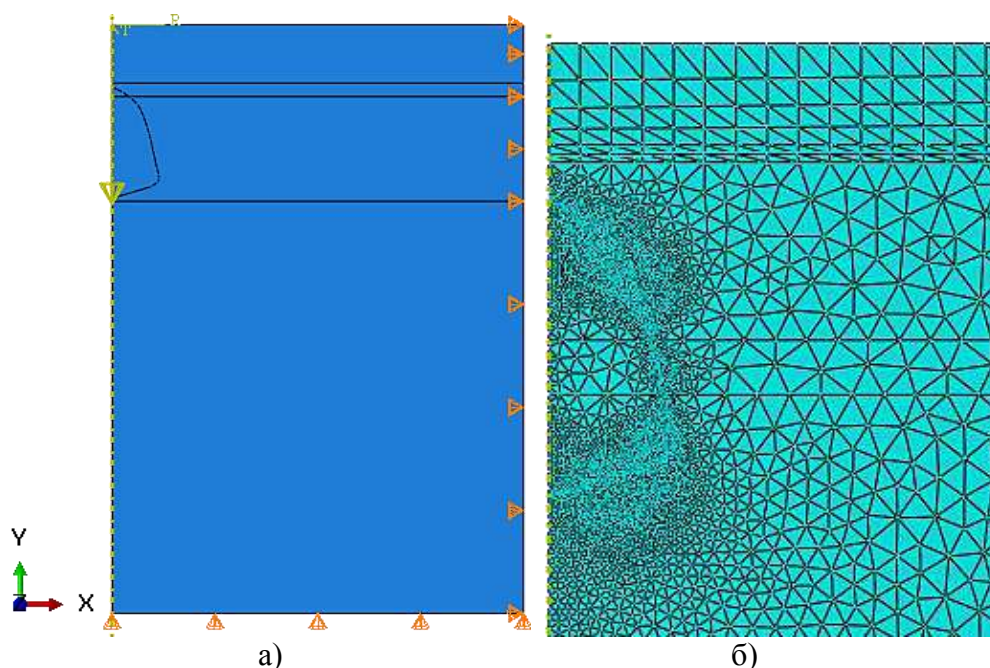


Рис. 137. Пример расчетной модели одной из грунтовых толщ с модельным подземным резервуаром в программном комплексе Simulia Abaqus/Standart: а) граничные условия, б) конечно-элементная сетка

Прогноз изменения НДС семи благоприятных грунтовых толщ проведен по данным восьми скважин, которые отражают наиболее характерные свойства слагающих их грунтов:

- ГТ № 13 – скважина № с-9;
- ГТ № 14 – скважина № 11;
- ГТ № 16 – скважина № 19;
- ГТ № 17 – скважина № 5;
- ГТ № 17 – скважина № 79;
- ГТ № 18 – скважина № ю-6;
- ГТ № 19 – скважина № с-7;
- ГТ № 20 – скважина № ю-2;

Прогноз изменения НДС грунтовой толщи № 17 был проведен по данным двух скважин – 5 и 79 в связи с наличием в них пластовых льдов разного состава. В первой из них лед более чем на 80% представлен ледогрунтом, а во второй – чистым льдом с малым количеством минеральных примесей (рис. 138).

Данные о составе, строении и состоянии грунтовых толщ по указанным скважинам приведены в приложениях 2 и 4. По этим данным каждая грунтовая толща была подразделена на ИГЭ. ИГЭ отражало однородные в генетико-возрастном и литолого-петрографическом отношении наиболее часто встречающиеся грунты, выделенные в главе 3, в пределах которых изменение показателей состава, строения и свойств носили случайный характер. На рис. 138 приведены расчетные схемы 7 благоприятных грунтовых толщ с указанием глубин каждого ИГЭ и заложения подземного резервуара. Показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов и льда каждого ИГЭ, принятые в численных расчетах изменения НДС грунтовых толщ, приведены в табл 45. Прогноз изменения НДС грунтовых толщ проведен по откорректированной методике, представленной в разделе 4.2.

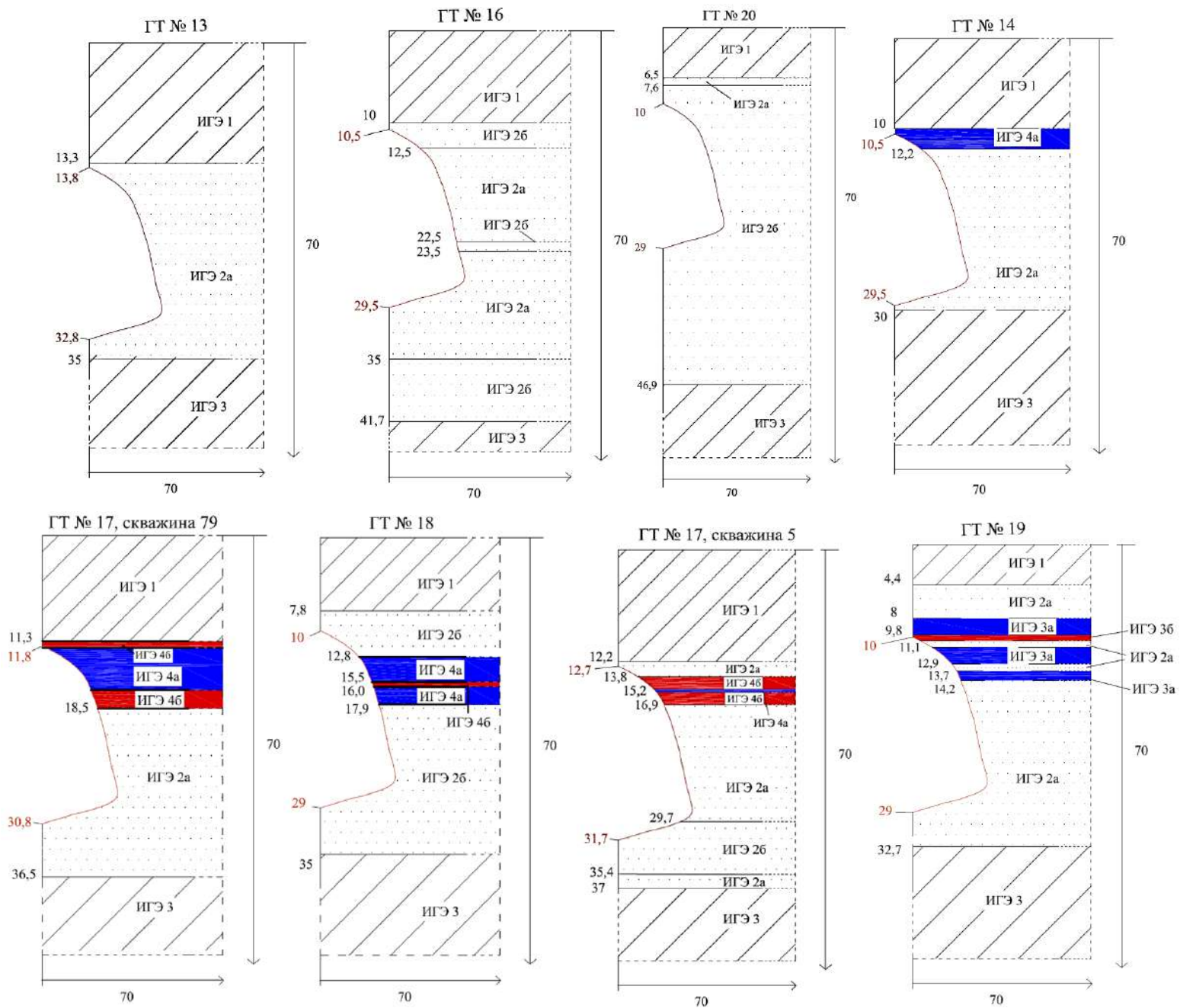


Рис. 138. Расчетные схемы благоприятных грунтовых толщ № 13, 14, 16, 18, 19, 20 с размещением в них модельного подземного резервуара (описание и показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов каждого ИГЭ приведены в табл. 45)

Таблица 45. Показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов, используемые в качестве входных параметров для расширенной модели Друкера-Прагера при численном моделировании изменения НДС грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров для захоронения отходов бурения

Наименование мерзлого грунта	№ ИГЭ	E ₀ , МПа	ν	ψ, °	Предел текучести		Предел прочности		ρ, г/см ³	Угол Друкера-Прагера β, °	A	m	n
					q, МПа	γ, д.ед.	q, МПа	γ, д.ед.					
суглинок средnezасоленный слабо- и льдистый	1	24	0,42	0	0,25	0	1,9	0,13	1,7	39	4,15*10 ⁻⁹	-0,56	1,15
суглинок песчанистый сильнозасоленный нельдистый	3	18,5	0,43	0	0,1	0	1,48	0,13	1,9	50	5,59*10 ⁻⁹	-0,74	1,03
песок пылеватый слабозасоленный слабо- и льдистый	2а	193	0,29	0	1,82	0	4,75	0,03	1,9	41,4	1,09*10 ⁻¹¹	-0,91	1,00
песок пылеватый средnezасоленный слабо- и льдистый	2б	108	0,27	0	1,45	0	4,6	0,06	1,87	45	1,60*10 ⁻¹⁰	-0,5	1,05
ультрапресный чистый лед	4а	402	0,35	0	5,08	0	5,76	0,005	0,9	19	2,70*10 ⁻⁶	-0,26	1,14
ледогрунт	4б	230	0,37	0	3,38	0	4,2	0,0055	1,07	23	5,5*10 ⁻⁷	-0,38	1,12

Примечание: E₀ – модуль общей деформации; ν – коэффициент относительного поперечного расширения; ψ – угол дилатансии; q – девиатор напряжений; γ – деформация сдвига; ρ – плотность мерзлого грунта; угол Друкера-Прагера β – угол наклона поверхности текучести в расширенной модели Друкера-Прагера; A, m, n – параметры ползучести в расширенной модели Друкера-Прагера.

4.4. Результаты прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары для захоронения отходов бурения

Для оценки результатов численного моделирования благоприятные грунтовые толщи были разбиты на две группы. К первой из них отнесены грунтовые толщи № 13, 16, 20, подземный резервуар в которых расположен в слабозасоленных и средnezасоленных мерзлых песчаных грунтах. Ко второй группе отнесены грунтовые толщи № 14, 17, 18, 19, подземный резервуар в которых частично находится в мерзлых песках, частично в пластовых льдах, мощность, глубина и состав которых варьируют от толщи к толще.

Прогноз изменения НДС грунтовых толщ № 13, 16 и 20 в результате сооружения в них подземных резервуаров

В грунтовой толще № 13 модельный подземный резервуар находится в однородных мерзлых песчаных слабозасоленных грунтах. В грунтовых толщах № 16 и 20 мерзлые пески имеют большую засоленность. Так, в первой из них 2 м свода емкости и ее средняя часть расположены в средnezасоленных песчаных грунтах. В грунтовой толще № 20 подземный резервуар полностью размещен в средnezасоленных мерзлых песчаных разностях (см. рис. 138).

Результаты численных расчетов показали, что сооружение подземных резервуаров в грунтовых толщах № 13, 16, 20 не спровоцирует развитие пластических зон. Вывалы в своде и стенках емкости будут отсутствовать как непосредственно сразу после окончания строительства, спустя несколько месяцев, так и с течением времени в весь период ее консервации. Даже в случае сооружения подземного резервуара полностью в средnezасоленных мерзлых песках грунтовой толщи № 20 не прогнозируется возникновение зон предельного равновесия (рис. 139).

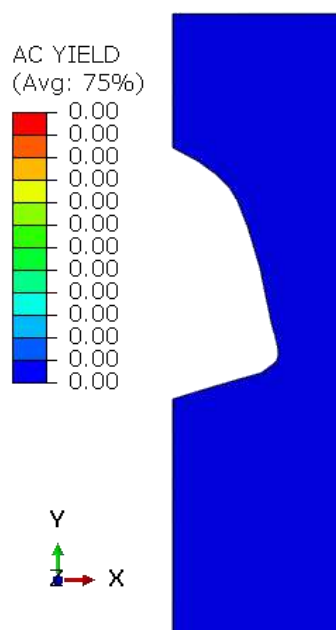


Рис. 139. Нулевые расчетные значения деформаций пластического течения в одной из грунтовых толщ первой группы спустя три года после строительства подземного резервуара

В грунтовых толщах № 13, 16 и № 20 не прогнозируются значительные перемещения сводов сооруженных подземных резервуаров. Они варьируют в узком диапазоне от 1 см для первой из них и до около 3 см для последних двух, включающих среднесоленные мерзлые песчаные грунты. При этом в грунтовых толщах № 13 и № 16 активное развитие перемещений сводов подземных резервуаров прогнозируется в первый месяц после окончания строительства, затем будет наблюдаться практически полное их затухание – за 2,9 года увеличение составит не более чем на десятые доли миллиметра. В грунтовой толще № 20 перемещение свода подземного резервуара будет развиваться с меньшим затуханием, однако с течением времени процесс перейдет в стадию течения с пренебрежимо малой скоростью. Так, за последние полтора года перемещение свода подземного резервуара, расположенного в грунтовой толще № 20, составит около 1 мм (рис. 140, 141). В целом по результатам численного моделирования установлено, что форма модельного подземного резервуара в грунтовых толщах № 13, 16 и № 20 с течением времени практически не изменится. Это видно при сравнении конфигурации емкостей до их нахождения в пустом состоянии в течение трех лет и после (рис. 142).

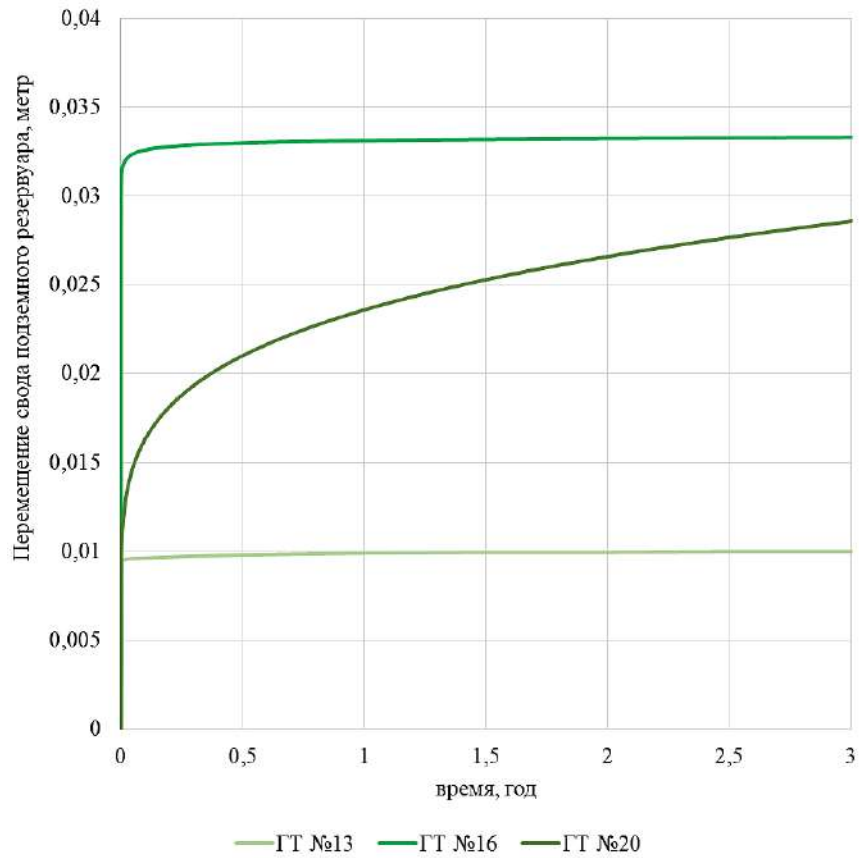


Рис. 140. Прогноз перемещения свода модельного подземного резервуара, сооруженного в грунтовых толщах первой группы

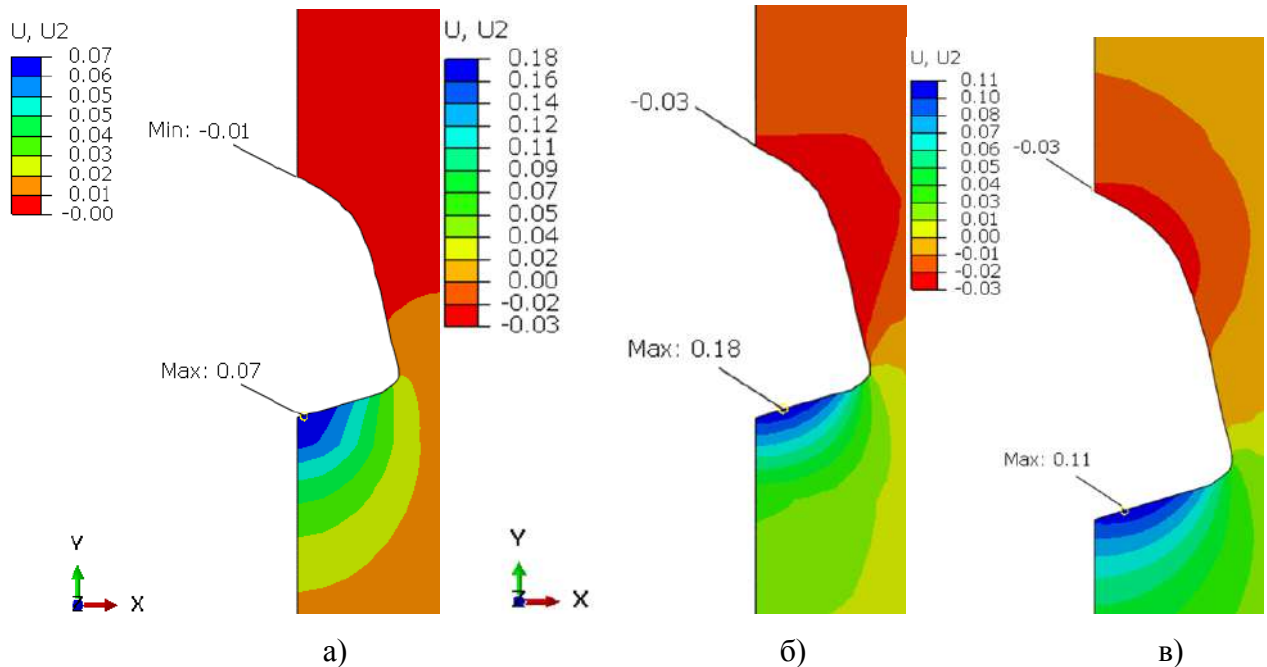


Рис. 141. Изополя максимальных перемещений грунтовых толщ первой группы при сооружении в них модельного подземного резервуара спустя три года нахождения в пустом состоянии: а) грунтовая толща № 13, б) грунтовая толща № 16 в) грунтовая толща № 20

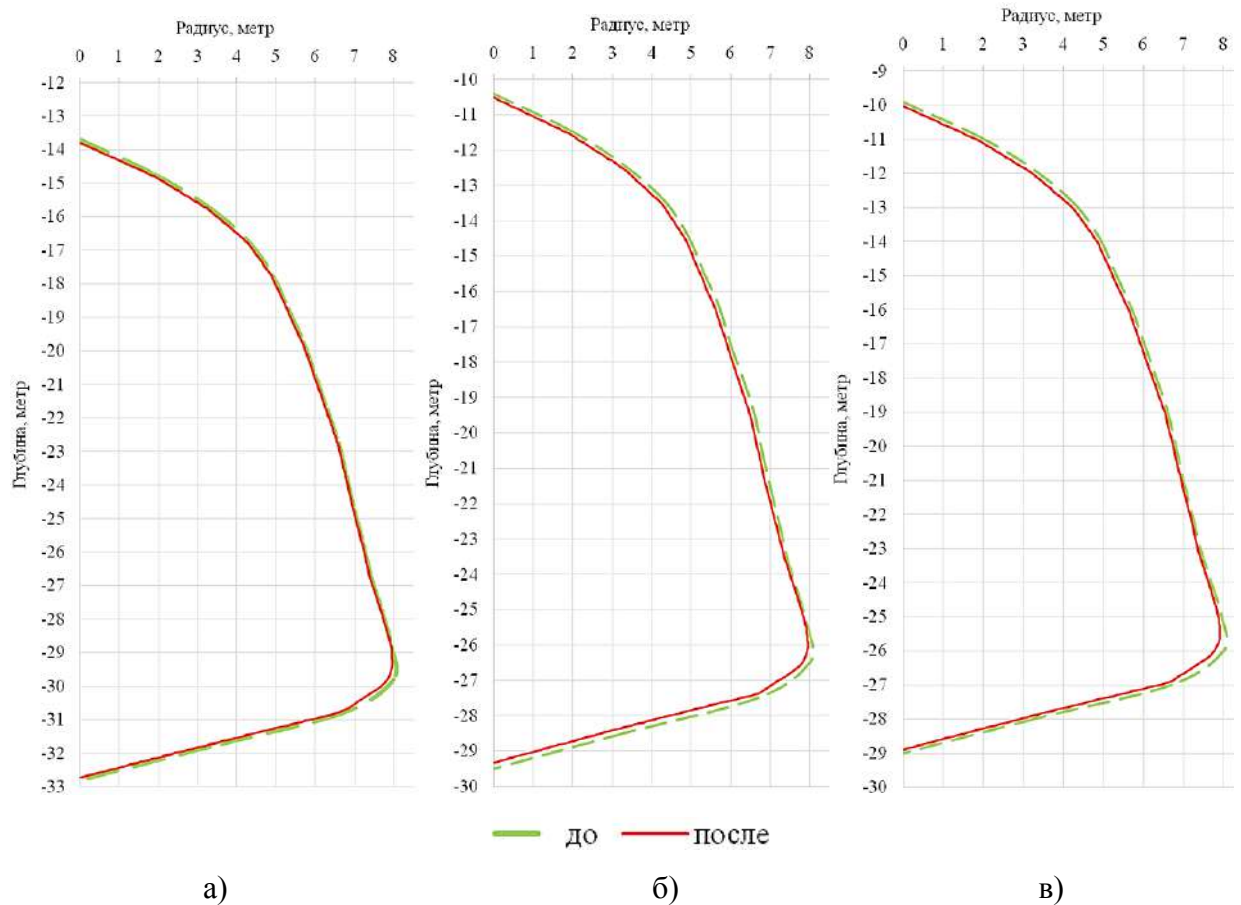


Рис. 142. Форма модельного подземного резервуара сразу после сооружения и спустя три года нахождения в пустом состоянии в грунтовых толщах: а) № 13, б) № 16
в) № 20 по результатам численного моделирования

По результатам прогноза оседание земной поверхности над подземными резервуарами в грунтовых толщах № 13, 16 и № 20 оказалось ничтожно мало. Его максимальное значение за три года составит 1 мм в случае размещения емкости в грунтовых толщах № 16 и № 20. При строительстве подземного резервуара в грунтовой толще № 13 оседание земной поверхности над ним вовсе будет отсутствовать (табл. 46).

При строительстве модельного подземного резервуара в грунтовых толщах первой группы снижение его объема будет зависеть от засоленности вмещающих песчаных грунтов. Сооружение емкости в слабозасоленных мерзлых песках грунтовой толщи № 13 приведет к падению ее объема за три года лишь на 15 м^3 (менее 1%). При размещении резервуара в средnezасоленных песчаных грунтах грунтовых толщ № 20 и № 16 суммарное падение объема увеличится уже до 68 м^3 и 54 м^3 (около 3%) соответственно (рис. 143).

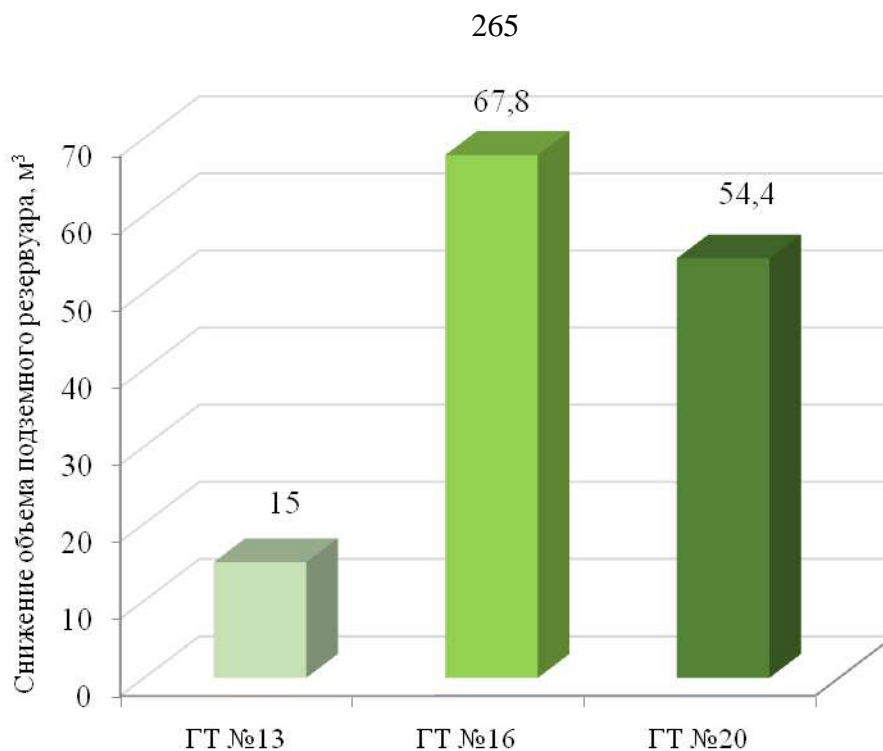


Рис. 143. Результаты прогноза снижения объема модельного подземного резервуара, сооруженного в грунтовых толщах № 13,16 и № 20 спустя три года нахождения в пустом состоянии

Прогноз изменения НДС грунтовых толщ № 14, 17, 18 и 19 в результате сооружения в них подземных резервуаров

В грунтовых толщах второй группы № 14, 17, 18, 19 строение мерзлых песчаных грунтов осложняется залеганием в них пластовых льдов разного состава, мощности и расположения в разрезе (рис. 138). В грунтовых толщах № 14 и № 17 (скважина 79) свод подземного резервуара на 1,7 м и 6,7 м соответственно находится в пластовом льде с малым количеством минеральных примесей, остальная его часть расположена в слабозасоленных мерзлых песках. Свод и дно подземного резервуара в грунтовой толще № 18 размещены в средnezасоленных песчаных отложениях, а около 5 м его средней части находится в чистом пластовом льде. Грунтовые толщи № 17 (скважина 5) и 19 отличаются повышенным содержанием минеральных примесей в пластовых льдах. В первой из них – лед более чем на 80% представлен ледогрунтом мощностью около 3 м, который залегает в верхней части резервуара под слоем слабозасоленного мерзлого песка. В грунтовой толще № 19 около 4,2 м свода емкости расположено в слоистом льду с прослоями мерзлого песка и ледогрунта (рис. 138).

Результаты численных расчетов показали, что при размещении модельного подземного резервуара в грунтовых толщах второй группы не прогнозируется развитие пластических зон. В любой момент времени от первых дней после окончания строительства

и до трех лет нахождения в незакрепленном состоянии не возникнет зон предельного равновесия. Отсутствие вывалов из свода и стенок емкостей в местах контакта пластового льда и мерзлого песка оказалось неожиданным, ведь именно в этих зонах могли концентрироваться напряжения, приводящие к нарушению прочности. Если непосредственно после сооружения это представляется логичным, ввиду относительно высокой мгновенной прочности льда и мерзлого песка, то с течением времени в результате ее снижения ожидалось образование областей разрушения. Вероятно, на возникновение зон предельного равновесия с пластическим течением грунта и льда в большей мере оказывает влияние форма подземного резервуара, которая в данном случае была выбрана наиболее правильной с точки зрения сохранения устойчивости. Это позволяет предположить, что даже в случае залегания в грунтовой толще мощных слоев льда, которые оказываются в своде и стенках подземного резервуара, нарушение прочности вокруг него можно избежать путем формирования емкости правильной формы.

По результатам численных расчетов определено, что перемещение свода модельного подземного резервуара в грунтовых толщах второй группы будет изменяться в широком пределе – от 14 см до 157 см. Наибольшее изменение формы подземного резервуара прогнозируется при его сооружении в грунтовых толщах № 14, № 17 (скважина 79) и № 18, включающих слои чистого льда с малым количеством минеральных примесей. Среди них максимальное значение перемещения свода емкости – около 1,6 м прогнозируется в грунтовой толще № 17 (скважина 79), где наблюдается наибольшая мощность чистого льда в верхней части подземного резервуара (около 6,2 м). Здесь же зафиксировано наименьшее затухание перемещений с течением времени и максимальное среди всех оседание земной поверхности – 16 см (рис. 144, 146).

Пластовый лед в грунтовой толще № 18 практически полностью состоит из чистого льда без минеральных примесей. Его мощность составляет около 5 м, что схоже с мощностью льда в грунтовой толще № 17 (скважина 79). Однако по результатам прогноза перемещение свода подземного резервуара в грунтовой толще № 18 оказалось значительно ниже и составило около полуметра за три года. То же наблюдается и с оседанием земной поверхности, которое за три года не превысит 10 см. Более низкие значения перемещений можно объяснить влиянием залегания льда относительно свода подземного резервуара. В грунтовой толще № 18 он расположен в средней части емкости, а ее верхняя часть на около 3,5 м находится в средnezасоленных песчаных грунтах (рис. 144, 146).

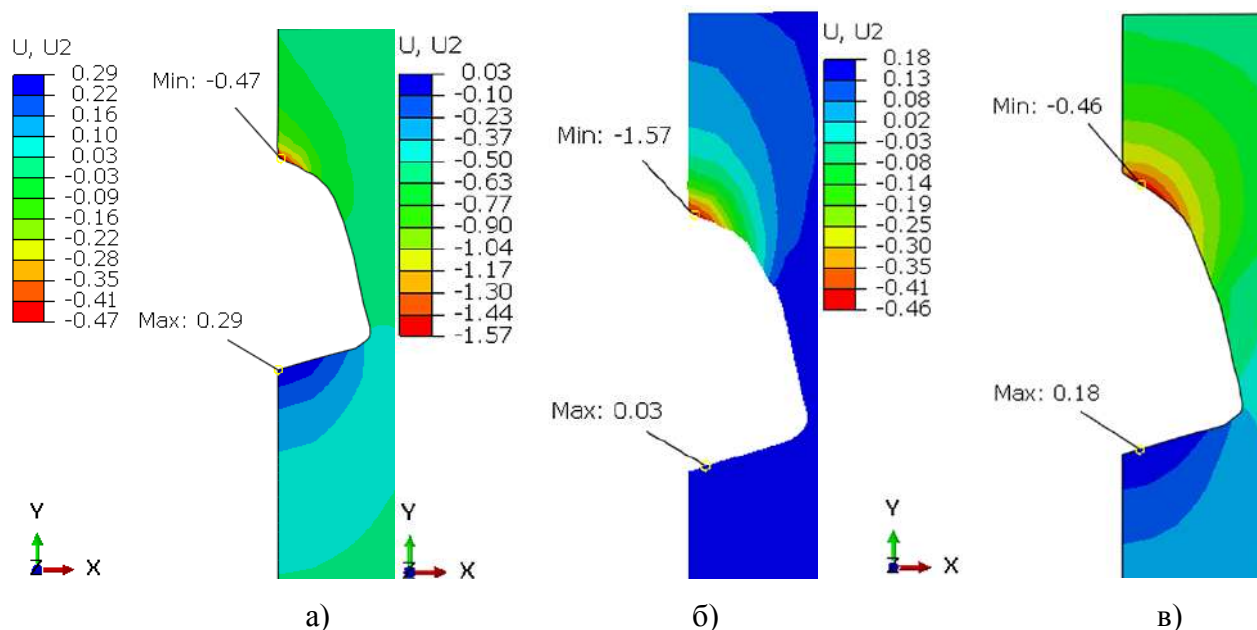


Рис. 144. Изополя максимальных перемещений грунтовых толщ второй группы при сооружении в них модельного подземного резервуара спустя три года нахождения в пустом состоянии: а) грунтовая толща № 14, б) грунтовая толща № 17 (скважина 79), в) грунтовая толща № 18

При строительстве подземного резервуара в грунтовых толщах, содержащих пластовые льды со значительным количеством минеральных примесей, прогнозируется минимальное изменение формы емкости, а также оседание земной поверхности над ней среди грунтовых толщ второй группы. Так, в грунтовой толще № 17 (скважина 5) перемещение свода емкости будет интенсивно затухать с течением времени и составит 26 см за три года, а оседание земной поверхности окажется менее 5 см. Достаточно низкие значения перемещений в грунтовой толще № 17 (скважина 5) объясняются, во-первых, залеганием в своде емкости слоя слабозасоленного мерзлого песка, во-вторых, наличием пластового льда, который более чем на 90% сложен ледогрунтом. Среди всех грунтовых толщ с пластовыми льдами минимальные перемещения прогнозируются при сооружении подземного резервуара в грунтовой толще № 19, включающей слоистый лед с чередованиями ледогрунта, чистого льда и мерзлого песка. Здесь прогнозируется интенсивное затухание перемещения свода резервуара, которое за три года достигнет 14 см, а оседание земной поверхности не превысит 5 см (рис. 145, 146).

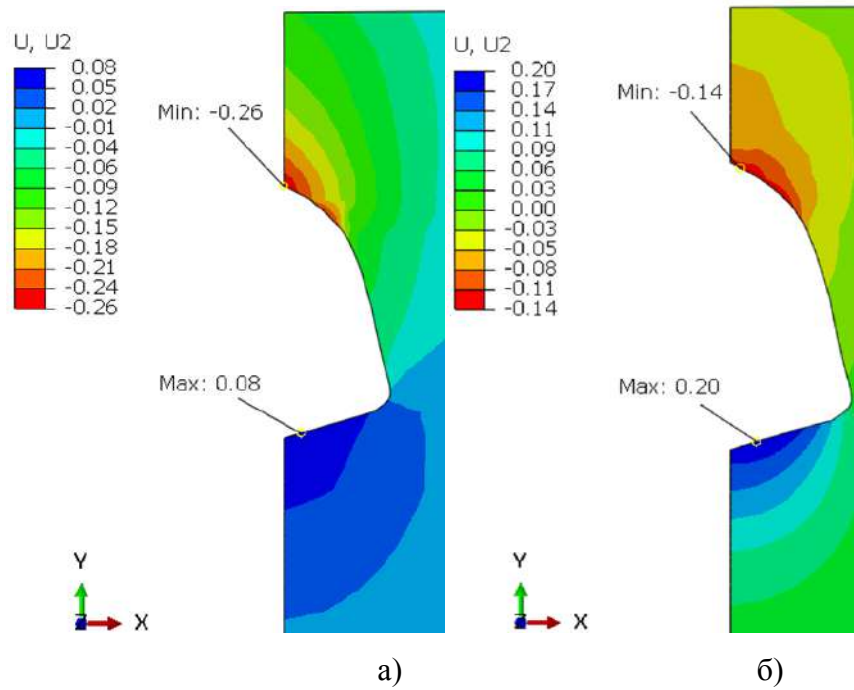


Рис. 145. Изополя максимальных перемещений грунтовых толщ второй группы при сооружении в них модельного подземного резервуара спустя три года нахождения в пустом состоянии: а) грунтовая толща № 19, б) грунтовая толща № 17 (скважина 5)

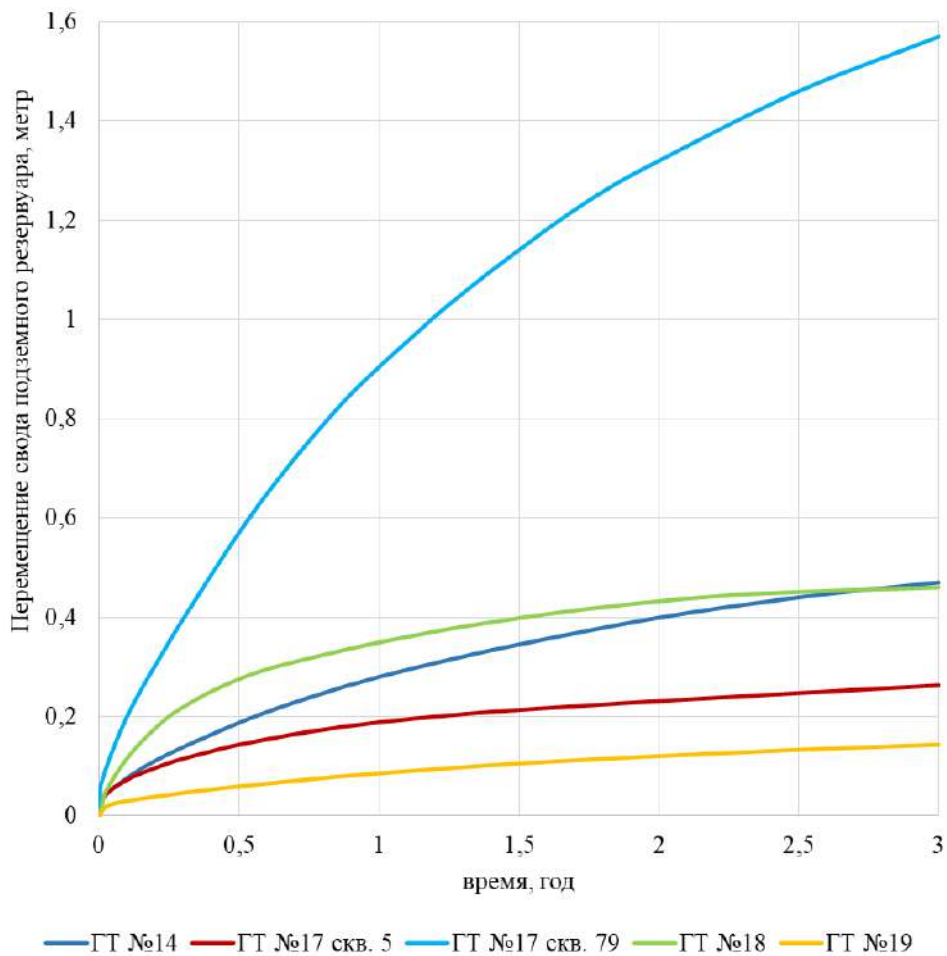


Рис. 146. Прогноз перемещения свода модельного подземного резервуара, сооруженного в грунтовых толщах второй группы

Размещение подземных резервуаров в грунтовых толщах второй группы приведет к большому снижению их объемов с течением времени по сравнению с толщами первой группы. Так, за три года оно во всех случаях окажется выше 100 м^3 (рис. 148).

Максимальное снижение объема модельного подземного резервуара прогнозируется при его сооружении в грунтовых толщах № 17 (скважина 79) и № 18, включающих мощные залежи чистого льда с малым количеством минеральных примесей. В грунтовой толще № 17 (скважина 79) падение вместимости емкости будет развиваться в основном благодаря значительному перемещению ее свода в области залегания чистого льда. Остальная часть подземного резервуара, находящаяся в слабозасоленных песчаных грунтах, внесет незначительный вклад в общее снижение объема. Суммарно подземный резервуар в грунтовой толще № 17 (скважина 79) за три года потеряет в объеме около 136 м^3 (6,4%).

Сооружение модельного подземного резервуара в грунтовой толще № 18 приведет к максимальному падению его объема за три года на 183 м^3 (около 9%). При этом уменьшение объема емкости здесь будет протекать уже вследствие относительно равномерного сближения ее стенок без значительного изменения формы. Причиной такой значительной конвергенции является сочетание в грунтовой толще средnezасоленного мерзлого песчаного грунта с мощным слоем чистого льда с малым количеством минеральных примесей (рис. 147, 148).

Снижение объема подземного резервуара в грунтовой толще № 14 будет протекать по аналогичному грунтовой толще № 17 (скважина 79) механизму. Здесь оно произойдет главным образом за счет перемещения свода емкости в области залегания чистого льда и составит за три года 113 м^3 (около 5%) (рис. 147, 148).

При сооружении модельного подземного резервуара в грунтовых толщах № 17 (скважина 5) и № 19, включающих слоистый лед и ледогрунт, прогнозируется минимальное снижение его объема среди толщ второй группы. В обоих случаях будет наблюдаться незначительное изменение формы резервуара, а объем за три года упадет в среднем на 106 м^3 , что составит около 5% от первоначальной вместимости подземного резервуара (рис. 147, 148).

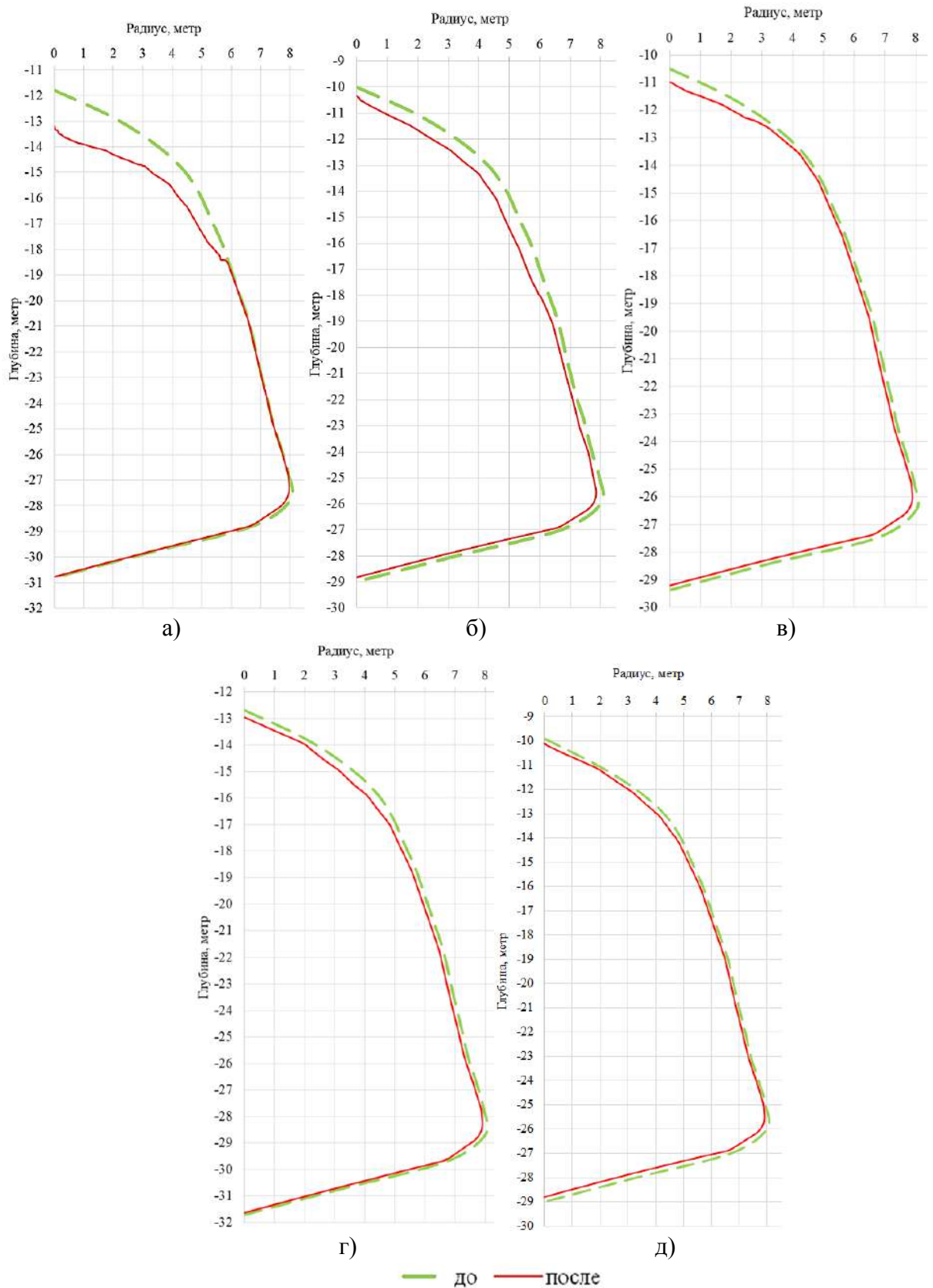


Рис. 147. Форма модельного подземного резервуара сразу после сооружения и спустя три года после нахождения в пустом состоянии в грунтовых толщах:

а) № 17 (скважина 79); б) № 18, в) № 14; г) № 17 (скважина 5); д) № 19 по результатам численного моделирования

Таким образом, по результатам численного моделирования изменения НДС благоприятных грунтовых толщ Харасавэйского месторождения в результате сооружения в них подземных резервуаров можно сделать следующие основные выводы. Строительство подземных резервуаров оптимальной формы в мерзлых песчаных грунтах территории, вне зависимости от их засоленности, не спровоцирует развитие пластических зон. Выявлено, что наличие в грунтовых толщах средnezасоленных мерзлых песчаных грунтов не приведет к существенным изменениям формы подземных резервуаров (перемещение свода 1-3 см) и оседанию земной поверхности над ними (не более 1 см). Однако строительство подземных резервуаров в средnezасоленных мерзлых песчаных грунтах спровоцирует большее снижение объема емкости (до 3%).

Строительство подземных резервуаров оптимальной формы в грунтовых толщах с пластовыми льдами разной мощности и состава не приведет к возникновению вывалов из их стенок и сводов. При размещении подземного резервуара в грунтовых толщах, содержащих пластовые льды со значительным количеством минеральных примесей, прогнозируется минимальное снижение объема (около 5%) и изменение формы емкости (перемещение свода 14 и 26 см), а также оседание земной поверхности над ней (не более 5 см) среди грунтовых толщ с пластовыми льдами. Сооружение подземного резервуара в грунтовых толщах с мощными чистыми льдами с малым количеством минеральных примесей спровоцирует наибольшее падение объема емкости. Максимальное изменение объема резервуара прогнозируется при его сооружении в грунтовой толще № 18 с мощными чистыми пластовыми льдами и средnezасоленными мерзлыми песками – за три года снижение объема емкости составит около 9% (183 м³). Изменение формы подземного резервуара и оседание земной поверхности над ним будут максимальны в случае залегания мощного чистого льда с малым количеством минеральных примесей в своде подземного резервуара. Так, прогиб свода подземного резервуара в области залегания чистого льда мощностью более 6 м в грунтовой толще № 17 (скважина 79) за три года достигнет 1,6 м, а оседание земной поверхности над ним составит 16 см.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующее научное положение № 4. **При строительстве подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения не прогнозируется развитие пластических зон при условии оптимальной формы емкости. Размещение подземных резервуаров в мерзлых средnezасоленных песчаных грунтах не приведет к изменению их формы и значительному оседанию земной поверхности над ними, однако спровоцирует большее снижение объема емкостей с течением времени по сравнению с сооружением подземных резервуаров только в слабозасоленных разностях.**

Наибольшее снижение объема подземных резервуаров с течением времени прогнозируется при их строительстве в грунтовых толщах, содержащих мощные слои чистого льда, в особенности в сочетании со среднесоленными песчаными грунтами. При залегании мощного чистого льда в своде подземных резервуаров с течением времени произойдет максимальное изменение их формы и оседание земной поверхности над ними.

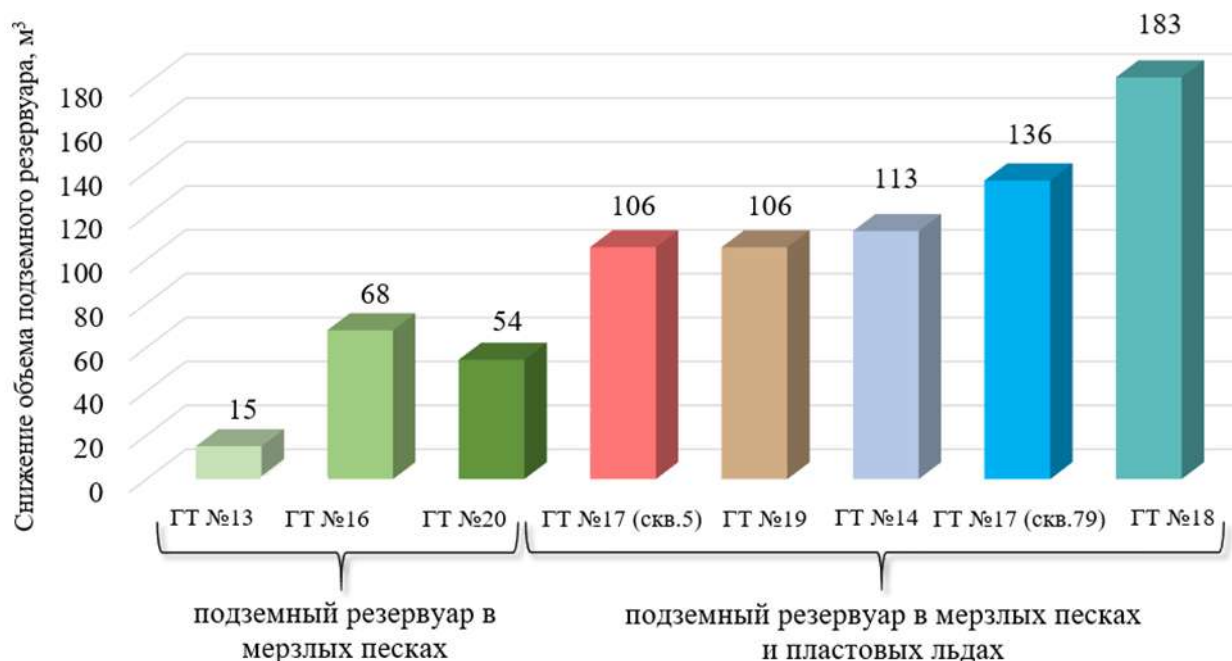


Рис. 148. Результаты прогноза снижения объема подземных резервуаров, сооруженных в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения спустя три года нахождения в пустом состоянии

Таблица 46. Результаты прогноза изменения НДС благоприятных грунтовых толщ Харасавэйского месторождения в результате сооружения подземных резервуаров по результатам численного моделирования

Грунтовая толща	Пластические зоны	Перемещение свода подземного резервуара, см	Оседание земной поверхности, см	Конвергенция, м³	Конвергенция, %
№13	-	1	-	15	0,7
№14	-	47	7	113	5,3
№16	-	3,3	1	67,8	3,2
№17 (скв. №79)	-	157	16	136	6,4
№17 (скв. №5)	-	26	5	105,7	5
№18	-	46	10	183	8,7
№19	-	14	4	105,6	5
№20	-	2,8	1	54,4	2,6

Как показали результаты численного моделирования, строительство подземных резервуаров приведет к изменению НДС грунтовых толщ, которое проявится в снижении эксплуатационной пригодности емкостей с течением времени. Так, в результате изменения объема и формы подземных резервуаров через три года их вместимость может снизиться на 1-9%. Интенсивность снижения эксплуатационной пригодности емкостей будет зависеть от состава, строения и свойств, прежде всего реологических, вмещающих мерзлых грунтов. Предотвращение ее падения возможно путем составления на основании численных расчетов графика ввода подземных резервуаров в эксплуатацию. Полное заполнение отходами бурения, в особенности твердой фазой, и их промерзание с течением времени создает дополнительное противодействие на стенки емкостей, что снижает изменение формы и объема резервуара с течением времени. С учетом результатов прогноза изменения НДС грунтовых толщ, вмещающих подземные резервуары, можно установить следующую схему эксплуатации. В первую очередь предлагается заполнение подземных резервуаров, сооруженных в грунтовых толщах с мощными чистыми пластовыми льдами с малым количеством минеральных примесей. После рекомендуется ввод в эксплуатацию емкостей в грунтовых толщах с пластовыми льдами с большим количеством минеральных примесей, затем – подземных резервуаров, размещенных в средnezасоленных мерзлых песчаных грунтах. Подземные резервуары, построенные в слабозасоленных мерзлых песках, можно заполнять в любой период времени, в связи с незначительным снижением их эксплуатационной пригодности с течением времени. Схематичный график заполнения подземных резервуаров, сооруженных в благоприятных грунтовых толщах Харасавэйского месторождения, приведен на рис. 149.



Рис. 149. График заполнения отходами бурения подземных резервуаров, сооруженных в благоприятных грунтовых толщах Харасавэйского месторождения

По результатам 4 главы можно сделать несколько основных **выводов**:

1. Проведена корректировка существующей методики изменения НДС грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров, на основании чего разработаны две группы оценочных критериев. С помощью первой – размера развивающихся в грунтовой толще пластических зон – предложено прогнозировать наступление аварийных ситуаций. Вторая группа оценочных критериев – перемещение свода подземного резервуара, оседание земной поверхности над ним и уменьшение его полезного объема – позволяет спрогнозировать снижение с течением времени эксплуатационной пригодности емкости.
2. Строительство подземных резервуаров оптимальной формы в 7 выделенных благоприятных грунтовых толщах Харасавэйского месторождения не приведет к образованию зон с пластическим течением. Отсутствие вывалов из свода и стенок емкостей будет наблюдаться как при их размещении в толщах со средnezасоленными песчаными грунтами, так и с пластовыми льдами, вне зависимости от их мощности и состава. Таким образом, при сооружении подземного резервуара правильной конусовидной формы с соотношением высоты к максимальному пролету более 2,3 и объемом 2123 м³, как было принято в расчетах настоящей работы, не возникнет аварийного состояния. Это позволяет сделать вывод, что даже в случае наличия в массиве грунтов со способностью к значительному снижению прочности с течением времени, обрушения свода и стенок сооружаемого в них подземного резервуара можно избежать путем формирования емкости устойчивой формы.
3. На снижение эксплуатационной пригодности подземных резервуаров для захоронения отходов бурения с течением времени окажет влияние степень засоленности вмещающих песчаных грунтов и наличие/отсутствие пластовых льдов в грунтовой толще. Строительство подземных резервуаров в средnezасоленных мерзлых песчаных грунтах не приведет к значительному изменению их формы, перемещению свода и оседанию земной поверхности над ними, однако спровоцирует большее падение объема емкости с течением времени.
4. Изменение НДС грунтовых толщ при строительстве подземных резервуаров в залегающих в них пластовых льдах будет зависеть от мощности, состава и расположения в разрезе последних. Наибольшее изменение формы подземного резервуара и оседание земной поверхности над ним прогнозируется при залегании в его своде мощного чистого льда без минеральных примесей. Наибольшее снижение объема емкости с течением времени будет наблюдаться при ее сооружении в мощных чистых льдах без минеральных примесей, в

особенности в сочетании со средnezасоленными разностями. Строительство подземных резервуаров в грунтовых толщах с ледогрунтами и слоистыми льдами, содержащими прослой мерзлого песка и ледогрунта, не приведет к значительному изменению их формы с течением времени и оседанию земной поверхности над ними.

5. В целом при сооружении подземных резервуаров в грунтовых толщах с пластовыми льдами прогнозируется большее снижение их объемов с течением времени, чем при размещении в грунтовых толщах без пластовых льдов. В связи с этим, для предотвращения снижения эксплуатационной пригодности с течением времени, в первую очередь заполнять отходами бурения необходимо подземные резервуары, сооруженные в грунтовых толщах с пластовыми льдами.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. По опубликованным данным и материалам изысканий по 105 скважинам охарактеризованы инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения. Установлена их высокая сложность для целей строительства подземных резервуаров, обусловленная следующими основными особенностями. В геоморфологическом отношении исследуемая территория характеризуется плоским террасированным рельефом, который местами прорезан речными долинами, оврагами и котловинами озер. Отложения территории до исследуемой глубины 70 м в основном представлены переслаиванием мерзлых песчаных, суглинистых, глинистых и супесчаных мерзлых грунтов, показатели состава, строения, состояния и свойств которых изменяются в широких пределах и имеют высокую зависимость от льдистости, степени их засоленности и криогенного строения. Важными особенностями криогенного строения грунтовых толщ, оказывающими значительное влияние на сооружение подземных резервуаров, являются: залегание в них мощных пластовых льдов разного состава и строения и высокоминерализованных вод. В пределах исследуемой территории широко развиты криогенные и посткриогенные процессы.

2. По результатам выполненного двухэтапного численного моделирования нижняя граница грунтовой толщи установлена на глубине 70 м. По данным 30 скважин проведена типизация грунтовых толщ территории. Используются две группы признаков, отражающие состав, строение и современное состояние грунтовых толщ, оказывающие наибольшее влияние на НДС многолетнемерзлой грунтовой толщи. Все выделенные грунтовые толщи подразделены по благоприятности для целей строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения, исходя из требований к составу, строению и состоянию слагающих их грунтов. Всего выявлены 7 благоприятных и 13 неблагоприятных грунтовых толщ.

3. Методом трехосного сжатия по быстрой кинематической и длительной статической схемам определены показатели физико-механических свойств наиболее распространенных типов мерзлых грунтов, в том числе льда, слагающих благоприятные грунтовые толщи для строительства подземных резервуаров. Выявлено влияние степени засоленности мерзлых песков казанцевской свиты на их прочность и деформируемость. В условиях трехосного сжатия по разным схемам нагружения изучены особенности механического поведения льдов, моделирующих состав и строение пластовых льдов в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения.

4. На основе выполненного прогноза получено, что строительство подземных резервуаров в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения не приведет к развитию пластических зон, при условии оптимальной формы емкости. Сооружение подземных резервуаров в грунтовых толщах со средnezасоленными мерзлыми песками спровоцирует большее снижение объема емкости с течением времени без значительных изменений ее формы и оседания земной поверхности над ней. Строительство подземных резервуаров в грунтовых толщах с пластовыми льдами будет сопровождаться наибольшим снижением объема емкости с течением времени, максимальное падение которого произойдет в грунтовых толщах с мощными чистыми льдами с малым количеством минеральных примесей, в особенности в сочетании со средnezасоленными мерзлыми песками. Наибольшее изменение формы емкости и оседание земной поверхности над ней прогнозируется при залегании мощного чистого льда в ее своде. Для снижения изменения НДС грунтовых толщ предложена схема заполнения подземных резервуаров отходами бурения.

Список литературы

1. Агеенко, В.А. Испытание мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия для определения реологических характеристик / В.А. Агеенко, М.Н. Тавостин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 5. – С. 122-128.
2. Аксенов, В.И. Зависимость прочностных и деформационных свойств пресноводного льда от температуры / В.И. Аксенов, С.Г. Геворкян, А.В. Иоспа // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – № 5. – С. 29-32.
3. Аксютин, О.Е. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах / О.Е. Аксютин, В.А. Казарян, А.Г. Ишков и др. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2013. – 430 с.
4. Баду, Ю.Б. Состав и строение криогенной толщи на Западном Ямале / Ю.Б. Баду, Г.И. Дубиков, Н.В. Иванова // Лабораторные исследования мерзлых грунтов и льдов. Сборник статей. – 1986. – С. 27-35.
5. Баулин, В.В. Пластовые залежи подземного льда / В.В. Баулин, Г.И. Дубиков // Труды ПНИИИС. Сборник статей. – 1970. – Т. 2. – С. 175-193.
6. Брушков, А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства / А.В. Брушков – М.: МГУ, 1998. – 330 с.
7. Брушков, А.В. Определение характеристик ползучести засоленных мерзлых грунтов из опыта на одноосное сжатие/ А.В. Брушков, В.И. Аксенов // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. – 1990. – С. 83-90.
8. Брушков, А.В. О прочности мерзлых засоленных грунтов п-ова Ямал / А.В. Брушков, Г.В. Лепинских, А.А. Николаев // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. – 1990. – С. 115-121.
9. Васильчук, А.К. Радиоуглеродное датирование пыльцы и спор из повторно-жильных льдов Ямала и Колымы / А.К. Васильчук // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2004. – № 2. – С. 225-237.
10. Васильчук, Ю.К. Закономерности развития инженерно-геологических условий севера Западной Сибири в голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.08 / Васильчук Юрий Кириллович – М., 1982. – 27 с.
11. Васильчук, Ю.К. Модель циклически-пульсирующего формирования сингенетических толщ с мощными повторно-жильными льдами / Ю.К. Васильчук // Криосфера Земли. – 1999. – Т. 3. – № 2. – С.50 - 61.

12. Васильчук, Ю.К. Новые данные об условиях накопления каргинских отложений на севере Западной Сибири / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, В.Т. Трофимов // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. – 1984. – № 53. – С. 28-35.
13. Великоцкий, М.А. К истории развития многолетнемерзлых пород на севере Западной Сибири / М.А. Великоцкий, Ю.В. Мудров // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое: Сборник статей. – 1985. – С. 29-42.
14. Войтковский, К.Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский – М.: АН СССР, 1960. – 90 с.
15. Вялов, С.С. Зависимость между напряжением и деформацией льда с учетом фактора времени / С.С. Вялов, В.А. Чернигов // Советская Антаркт. экспедиция. Вторая континент. экспедиция. – 1960 – Т.10. – С. 213-223.
16. Вялов, С.С. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С.С. Вялов, С.Э. Городецкий, Н.К. Пекарская – М.: Наука, 1966. – 87 с.
17. Вялов, С.С. Подземные льды и сильнольдистые грунты как основания сооружений / С.С. Вялов, В.В. Докучаев, Д.Р. Шейнкман – Л.: Стройиздат, 1976. – 165 с.
18. Вялов, С.С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений / С.С. Вялов, В.Г. Гмошинский, С.Э. Городецкий, В.Г. Григорьева, Ю.К. Зарецкий, Н.К. Пекарская, Е.П. Шушерина – М.: АН СССР, 1962. – 254 с.
19. Вялов, С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов / С.С. Вялов – М.: АН СССР, 1959. – 188 с.
20. Вялов, С.С. Реология мерзлых грунтов / С.С. Вялов – М.: Стройиздат, 2000. – 464 с.
21. Воронова, А.В. Оценка устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / А. В. Воронова, А.А. Скворцов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 9. – С. 35–46.
22. Городецкий, С.Э. Ползучесть и прочность мерзлых грунтов при сложном напряженном состоянии / С.Э. Городецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – №5. – С. 39-43.
23. ГОСТ 12248-2010 Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартиформ, 2010. – 27 с.
24. ГОСТ 12248.9-2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия. – М.: Стандартиформ, 2020. – 18 с.
25. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. – М.: Стандартиформ, 2020. – 37 с.

26. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 15 с.
27. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартиформ, 2014. – 54 с.
28. ГОСТ Р 59597-2021 Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 26 с.
29. Григорьев, Н.Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала / Н.Ф. Григорьев – Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1987. – 112 с.
30. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский и др.; под ред. В.Т. Трофимова. – М.: МГУ, Наука, 2005. – 1024 с.
31. Гудина, В.И. Стратиграфия морского плейстоцена Северной Сибири по фораминиферам / В.И. Гудина, А.В. Гольберт // Проблемы четвертичной геологии Сибири. К VIII Конгрессу ИНКВА в Париже: Сборник статей. – 1969. – С. 76-84.
32. Добровольский, Г.В. География почв / Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская – М.: МГУ, «Колос», 2004. – 460 с.
33. Дубиков, Г.И. Залежи подземного льда / Г.И. Дубиков, И.И. Шаманова; под ред. В.В. Баулина // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштернского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) – М.: ГЕОС, 2003. – С. 74-83.
34. Дубиков, Г.И. Распространение, строение и мощность криогенных толщ / Г.И. Дубиков, Н.В. Иванова, Ф.М. Ривкин; под ред. В.В. Баулина // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштернского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) – М.: ГЕОС, 2003. – С. 39-49.
35. Дубиков, Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г.И. Дубиков – М.: ГЕОС, 2002. – 246 с.
36. Зарецкий, Ю.К. Вязкопластичность льда и мерзлых грунтов / Ю.К. Зарецкий, Б.Д. Чумичев, А.Г. Щеболев – Новосибирск: Наука, 1986. – 185 с.
37. Зарецкий, Ю.К. Кратковременная ползучесть льда / Ю.К. Зарецкий, Б.Д. Чумичев – Новосибирск: Наука, 1982. – 116 с.
38. Иванова, Н.В. Засоленность мерзлых грунтов. Криопэги / Н.В. Иванова; под ред. В.В. Баулина // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштернского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) – М.: ГЕОС, 2003. – С. 83-92.
39. Инженерная геология СССР. Том II / Под редакцией Е.М. Сергеева. – М.: МГУ, 1976. – 495 с.

40. Казарян, В.А. Опыт эксплуатации подземного хранилища газового конденсата, созданного в многолетнемерзлых породах / В.А. Казарян, О.И. Савич, А.С. Хрулёв, Н.А. Гафаров, В.И. Соркин // Газовая промышленность. – 2012. – С. 92-95.
41. Каплина, Т.Н. Криогенные склоновые процессы / Т.Н. Каплина – М: Наука, 1965. – 296 с.
42. Каплянская, Ф.А. Пластовые залежи подземных льдов в ледниковых отложениях на западном побережье п-ва Ямал у пос. Харасавэй / Ф.А. Каплянская // Пластовые льды криолитозоны. – 1982. – С. 71-80.
43. Коржавин, К.Н. Воздействие льда на инженерные сооружения / К.Н. Коржавин – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 203 с.
44. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 т. Т.1. Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения / Под общей ред. Ю.К. Васильчука, Г.В. Крылова, Е.Е. Подборного. –Тюмень: ООО ТюменНИИгипрогаз, СПб: Недра, 2006. – 346 с.
45. Лавров, В.В. Деформация и прочность льда / В.В. Лавров – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 206 с.
46. Лазуков, Г.И. Антропоген северной половины Западной Сибири. Палеогеография / Г.И. Лазуков – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. – 127 с.
47. Лазуков, Г.И. Антропоген северной половины Западной Сибири. 4.1: Стратиграфия / Г.И. Лазуков – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. – 319 с.
48. Мосина, А.С. Грунтовые толщи Харасавэйского месторождения как объект для создания хранилищ буровых отходов / А.С. Мосина // Грунтоведение. – 2022. – № 1(18). – С. 43-49.
49. Мосина, А.С. Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / А.С. Мосина, А.Ю. Мирный, А.А. Скворцов, С.Д. Сурин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 3. – С. 223-237.
50. Мосина, А.С. Прогноз изменения состояния многолетнемерзлой грунтовой толщи под влиянием строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в условиях Крайнего Севера (на примере среднего Ямала) / А.С. Мосина, С.К. Николаева, А.А. Скворцов // Инженерная геология. – 2020. – Т. 15. – № 2. – С. 68–81.
51. Орлянский, В.В. Формирование и пространственное размещение залежей подземных льдов на Ямале / В.В. Орлянский // Криогенные процессы и явления в Сибири – 1984. – С. 22-30.

52. Основы геокриологии. Часть 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 526 с.

53. Пискунова, А.С. Проблемы захоронения буровых отходов в подземных резервуарах скважинного типа в многолетнемерзлых грунтах / А.С. Пискунова, С.Д. Сурин, А.В. Воронова // Сергеевские чтения: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). – 2018. – Вып. 20. – С. 244–250.

54. Птухин, Ф.И. Влияние скорости деформирования на предел прочности речного льда / Ф.И. Птухин // Труды ТЭИ СО АН СССР. – 1962 – Вып. 15. – С.78-92.

55. Роман, Л.Т. Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман – М.: Наука/Интерпериодика, 2002. – 425 с.

56. Скоробогатов, В.А. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала / В.А. Скоробогатов, Л.В. Строганов, В.Д. Копеев – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 352 с.

57. СП 121.13330.2012 Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96. – М.: ООО «Аналитик», 2012. – 97 с.

58. СП 123.13330.2012 Свод правил. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. Актуализированная редакция СНиП 34-02-99. – М.: ООО «Аналитик», 2012. – 19 с.

59. СТО Газпром 2-1.19-1142-2018 Захоронение отходов бурения в подземных резервуарах, созданных в многолетнемерзлых породах. Основные положения. – М.: ООО «АКЦЕНТ типография», 2019. – 35 с.

60. СТО Газпром 2-3.1-071-2006 Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне. – М.: Изд. дом «Полиграфия», 2006. – 25 с.

61. Сурин, С.Д. Методика формообразования подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / С.Д. Сурин, А.С. Мосина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 3-1. – С. 252-267.

62. Тимофеев, О.Я. Исследование прочностных свойств морского льда в обеспечение создания программных комплексов для расчета ледовой нагрузки / О.Я. Тимофеев, К.Е. Сазонов, А.А. Добродеев, Е.А. Бокатова, И.А. Саперштейн // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Т. 386. – № 4. – С. 41–49.

63. Трофимов, В.Т. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, М.А. Харьковина, Е.А. Вознесенский, Ю.К. Васильчук, и др. – М.: Геомаркетинг, 2012. – 320 с.
64. Трофимов, В.Т. Грунтовые толщи Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Н.Г. Фирсов, П.И. Кашперюк, В.Г. Кудряшов; под ред. В.Т. Трофимова. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 128 с.
65. Трофимов, В.Т. Грунтовые толщи и их отображение на картах / В.Т. Трофимов, П.И. Фадеев // Инженерная геология. – 1982. – № 3. – С. 26-35.
66. Трофимов, В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. – 276 с.
67. Трофимов, В.Т. Полуостров Ямал (Инженерно-геологический очерк) / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Бадю, В.Г. Кудряшов, Н.Г. Фирсов – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 278 с.
68. Филоненко-Бородич, М.М. Механические теории прочности / М.М. Филоненко-Бородич. – М.: Изд-во МГУ, 1961. – 90 с.
69. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович – М.: Высшая школа, 1973. – 446 с.
70. Цытович, Н.А. Основания механики мерзлых грунтов / Н.А. Цытович, М.И. Сумгин – Л.: Изд-во АН СССР, 1937. – 432 с.
71. Цытович, Н.А. Принципы механики мерзлых грунтов / Н.А. Цытович – М.: АН СССР, 1952. – 168 с.
72. Шушерина, Е.П. Влияние строение льда на его механические свойства / Е.П. Шушерина, А.Е. Гуликов // Мерзлотные исследования. – 1964. – Вып. 4. – С. 376-390.
73. Шумилова, Е.В. Минералого-петрографическая характеристика четвертичных доказанцевских отложений Западной Сибири / Е.В. Шумилова – М.: Наука, 1971. – 157 с.
74. Шумский, П.А. Основы структурного ледоведения / П.А. Шумский – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 492 с.
75. Яркин А.Н. Влияние типа засоления на прочностные и реологические свойства мерзлых грунтов / А.Н. Яркин // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. – 1990. – С. 103-107.
76. Arenson, L.U. Effects of Volumetric Ice Content and Strain Rate on Shear Strength under Triaxial Conditions for Frozen Soil Samples / L.U. Arenson, M.M. Johansen, S.M. Springman // Special Issue: The Nature and Dynamics of Mountain Permafrost: Papers from the

PACE 21 Contribution to the International Permafrost Association. – 2003. – Issue 3. – V. 15. – P. 261-271.

77. Arenson, L.U. Triaxial constant stress and constant strain rate tests on ice-rich permafrost samples / L.U. Arenson, S.M. Springman. // Canadian Geotechnical Journal – 2005. – V. 42. – № 2. P. 412-430.

78. Durham, W.B. Experimental deformation of polycrystalline H₂O ice at high pressure and low temperature: Preliminary results / W.B. Durham, H.C. Heard, S.H. Kirby // Journal of Geophysical Research Solid Earth. – 1983. – Issue S01. – V. 88. – P. B377-B392.

79. Hawkes, I. Deformation and fracture of ice under uniaxial stress/ I. Hawkes M. Mellor // Journal Glaciology. – 1972. – Issue 61. – V. 11. – P. 103-131.

80. Nadreau, J.P. Triaxial Testing of Freshwater Ice at Low Confining Pressure / J.P. Nadreau, A.M. Nawwar, Y.S. Wang // J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1991. – V. 4. – P. 260-265.

81. Yamamoto. Y. Triaxial stress path tests on artificially prepared analogue alpine permafrost soil / Y. Yamamoto, S.M. Springman // Canadian Geotechnical Journal. – 2019. – №10. – V. 56. – № 10. – P. 1448-1460.

Фондовые материалы

82. Васильчук, А.К. Палинологическая характеристика отложений позднего плейстоцена заполярных районов Западной Сибири (методика исследований и палеогеографическая интерпретация): дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.31 / Васильчук Алла Константиновна. – М., 1987. – 124 с.

83. Комплексные инженерные изыскания. Кусты газовых скважин, объекты подготовки газа, объекты промбазы. Инженерно-геокриологическое картирование. ООО «Промнефтегазпроект». – Тюмень, 2013.

84. Коржавин, К.Н. Воздействие льда на опоры мостов: дис. ...д-ра. техн. наук: / Коржавин Константин Николаевич. – М, 1951.

85. Отчет о научно-исследовательской работе «Создание геотехнических методов повышения надежности строительства и эксплуатации инженерных сооружений и объектов газового комплекса для оптимизации инвестиций освоения нефтегазоконденсатных месторождений в особо сложных условиях криолитозоны на севере Западной Сибири». – Тюмень: ООО «ТюменьНИИГипрогаз», 2003.

86. Отчет по инженерно-экологическим изысканиям на территории Харасавэйского и Бованенковского месторождений. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2006.

87. Проектная документация. Подземные резервуары для захоронения отходов бурения скважин газовых эксплуатационных и наблюдательных скважин Харасавэйского ГКМ в составе стройки «Эксплуатационное бурение. Харасавэйское ГКМ», 2016.

88. Проектная документация. Пояснительная записка. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского ГКМ. – Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

89. Проектная документация. Технический отчет. Книга 1. Куст № 1. Скважина 1-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

90. Проектная документация. Технический отчет. Книга 2. Куст № 2. Скважина 2-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

91. Проектная документация. Технический отчет. Книга 3. Куст № 3. Скважина 3-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

92. Проектная документация. Технический отчет. Книга 4. Куст № 4. Скважина 4-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

93. Проектная документация. Технический отчет. Книга 5. Куст № 5. Скважина 5-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

94. Проектная документация. Технический отчет. Книга 6. Куст № 6. Скважина 6-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

95. Проектная документация. Технический отчет. Книга 7. Куст № 7. Скважина 7-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

96. Проектная документация. Технический отчет. Книга 8. Куст № 8. Скважина 8-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

97. Проектная документация. Технический отчет. Книга 9. Куст № 9. Скважина 9-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИгаздобыча», 2013.

98. Проектная документация. Технический отчет. Книга 10. Куст № 10. Скважина 10-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

99. Проектная документация. Технический отчет. Книга 11. Куст № 11. Скважина 11-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

100. Проектная документация. Технический отчет. Книга 12. Куст № 12. Скважина 12-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

101. Проектная документация. Технический отчет. Книга 13. Куст № 13. Скважина 13-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

102. Проектная документация. Технический отчет. Книга 14. Куст № 14. Скважина 14-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

103. Проектная документация. Технический отчет. Книга 15. Куст № 15. Скважина 15-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

104. Проектная документация. Технический отчет. Книга 16. Куст № 16. Скважина 16-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

105. Проектная документация. Технический отчет. Книга 17. Куст № 17. Скважина 17-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

106. Проектная документация. Технический отчет. Книга 18. Куст № 18. Скважина 18-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

107. Проектная документация. Технический отчет. Книга 19. Куст № 19. Скважина 19-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

108. Проектная документация. Технический отчет. Книга 20. Куст № 20. Скважина 20-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

109. Проектная документация. Технический отчет. Книга 21. Куст № 21. Скважина 21-П-1. Обустройство сеноман-аптских залежей Харасавэйского. – Саратов: ООО «ВНИПИГаздобыча», 2013.

110. Проектная документация. Технический отчет по инженерным изысканиям. Комплексные инженерные изыскания под подземные резервуары для захоронения буровых отходов. Результаты изысканий 100 м скважин. Площадка КГС № 4. ПАО «Красноярскгазпром», 2016.

111. Проектная документация. Технический отчет по инженерным изысканиям. Комплексные инженерные изыскания под подземные резервуары для захоронения буровых отходов. Результаты изысканий 100 м скважин. Площадка КГС № 5. ПАО «Красноярскгазпром», 2016.

112. Проектная документация. Технический отчет по инженерным изысканиям. Комплексные инженерные изыскания под подземные резервуары для захоронения буровых отходов. Результаты изысканий 100 м скважин. Площадка КГС № 13. ПАО «Красноярскгазпром», 2016.

113. Сурин, С.Д. Обоснование тепловых режимов строительства и эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Сурин Степан Дмитриевич. – М., 2013. – 186 с.

114. Шергин Д.В. Исследование и разработка технологии создания подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15 / Шергин Денис Владимирович. – М., 2014. – 167 с.

115. Arenson, L.U. Unstable alpine permafrost: a potentially important natural hazard - variations of geotechnical behaviour with time and temperature. Dr. sc. Dissertation / Lukas Urs Arenson. – Zurich., 2002. – 267 p.

Приложение 1. Состав и содержание водорастворимых солей в грунтах салехардской свиты Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [89-109]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	PH	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ + K ⁺		Сухой остаток %	Суммарное содержание солей %
			мг	мг- экв	мг	мг- экв	мг	мг- экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв		
Скв. 1. Северная часть месторождения, близ озера Вархыто																
34,6-35,2	суглинок	7,6	39,7	0,7	1157,3	32,6	169,4	3,5	26,5	1,32	25,8	2,12	766,8	33,3	2,25	2,19
49,6-50,3	суглинок	7,7	36,6	0,6	1476,1	41,6	176,6	3,7	38,5	1,92	41,3	3,40	932,4	40,5	2,73	2,70
70,0-70,6	суглинок	8,1	64,1	1,1	503,4	14,2	29,3	0,6	12,0	0,60	5,8	0,48	339,5	14,8	0,94	0,95
Скв. 3. Северо-западная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Мерцятаяха																
27,2-27,8	суглинок	7,8	51,9	0,9	302,1	8,5	17,3	0,4	12,8	0,64	4,6	0,38	200,1	8,7	0,58	0,59
34,8-35,4	суглинок	8,2	50,6	0,8	318,8	9,0	14,4	0,3	13,6	0,68	3,9	0,32	209,3	9,1	0,60	0,61
49,9-50,5	суглинок	8,1	58,0	1,0	523,3	14,7	22,1	0,5	13,6	0,68	8,3	0,68	340,2	14,8	0,97	0,97
70,0-70,6	суглинок	8,3	45,8	0,8	385,9	10,9	23,5	0,5	12,8	0,64	5,6	0,46	253,2	11,0	0,73	0,73
Скв. 4. Северо-восточная часть месторождения, устье реки Тумбэтаяха																
59,7-60,4	суглинок	7,9	70,2	1,2	673,1	19,0	31,2	0,7	16,4	0,82	8,0	0,66	443,7	19,3	1,26	1,24
80,1-80,7	супесь	7,6	36,6	0,6	554,9	15,6	33,6	0,7	24,6	1,23	14,5	1,19	333,7	14,5	1,01	1,0
Скв. 6. Западная часть месторождения, междуречье рек Хардьяха и Нявоталаваяха																
17,1-17,6	суглинок	8,3	103,7	1,7	131,4	3,7	27,4	0,6	11,2	0,56	2,9	0,24	118,9	5,8	0,40	0,40
22,0-22,5	суглинок	8,2	137,3	2,3	172,5	4,9	25,9	0,5	14,4	0,72	4,9	0,40	150,2	6,5	0,51	0,51
39,7-40,3	суглинок	8,1	72,0	1,2	361,4	10,2	29,3	0,6	13,6	0,68	2,9	0,24	253,9	11,0	0,72	0,73
49,7-50,3	глина	7,7	94,6	1,6	541,7	15,3	77,8	1,6	12,8	0,64	6,8	0,56	396,3	17,2	1,14	1,13
69,7-70,3	глина	7,7	91,5	1,5	509,1	14,3	69,6	1,5	15,2	0,76	5,4	0,44	370,1	16,1	1,11	1,06
Скв. 8. Восточная часть месторождения, среднее течение реки Пикцятарка, 2 км восточнее озера Нгопто																
49,7-50,3	суглинок	8,2	45,8	0,8	265,5	7,5	13,9	0,3	10,4	0,52	2,9	0,24	178,5	7,8	0,52	0,52
70,1-70,7	суглинок	7,7	68,9	1,1	547,8	15,4	62,4	1,3	12,0	0,60	5,6	0,46	386,2	16,8	1,09	1,08
Скв. 9. Южная часть месторождения, правобережье нижнего течения реки Сильяха																
19,6-20,2	суглинок	7,8	54,9	0,9	562,3	15,8	26,4	0,6	13,2	0,66	6,1	0,50	371,0	16,1	1,04	1,03
25,0-25,6	суглинок	7,7	73,2	1,2	477,1	13,4	43,2	0,9	11,6	0,58	5,1	0,42	334,4	14,5	0,94	0,95
34,8-35,4	суглинок	7,8	68,9	1,1	434,5	12,2	51,8	1,1	10,8	0,54	5,0	0,41	310,3	13,5	0,88	0,88
59,7-60,3	суглинок	7,7	64,1	1,1	431,0	12,1	81,6	1,7	11,6	0,58	4,9	0,40	319,9	13,9	0,92	0,91
Скв. 12. Южная часть месторождения, верхнее течение реки Хардьяха																
20,0-20,6	суглинок	7,8	88,5	1,5	357,8	10,1	81,6	1,7	12,8	0,64	5,8	0,48	278,5	12,1	0,82	0,83

24,8-25,4	суглинок	7,8	73,2	1,2	443,0	12,5	72,0	1,5	12,8	0,64	5,6	0,46	323,8	14,1	0,94	0,93
39,5-40,1	суглинок	7,7	67,1	1,1	519,7	14,6	110,4	2,3	12,0	0,60	6,8	0,56	388,2	16,9	1,12	1,10
59,6-60,2	суглинок	7,9	68,9	1,1	349,3	9,8	83,5	1,7	14,8	0,74	0,7	0,06	273,9	11,9	0,81	0,79
Скв. 15 Южная часть месторождения, левобережье нижнего течения реки Сильяха																
12,1-12,7	суглинок	7,3	67,1	1,1	511,2	14,4	81,6	1,7	14,4	0,72	8,8	0,72	362,5	15,8	1,07	1,05
14,5-15,1	суглинок	7,5	58,0	0,9	451,6	12,7	69,6	1,5	13,6	0,68	7,8	0,64	317,4	13,8	0,92	0,92
25,0-25,6	суглинок	7,8	54,9	1,0	494,2	13,9	62,4	1,3	9,2	0,46	5,1	0,42	350,5	15,2	0,97	0,98
39,6-40,2	суглинок	7,8	67,1	1,1	391,9	11,0	41,3	0,9	11,6	0,58	4,9	0,40	276,5	12,0	0,80	0,79
59,4-60,0	глина	7,7	85,4	1,4	306,7	8,6	76,8	1,6	11,2	0,56	4,4	0,36	246,6	10,7	0,74	0,73
Скв. 18 Центральная часть месторождения, правобережье верхнего течения реки Нявоталаваяха, более 2 км юго-западнее озера Нгопто																
24,8-25,3	суглинок	7,9	54,9	0,9	312,0	8,8	27,4	0,6	12,8	0,64	1,2	0,10	219,0	9,5	0,64	0,63
29,7-30,3	суглинок	8,2	64,1	1,1	279,0	7,9	36,0	0,8	10,4	0,52	10,7	0,88	190,0	8,3	0,57	0,59
39,7-40,3	суглинок	8,0	82,4	1,4	361,4	10,2	50,4	1,1	12,8	0,64	5,1	0,42	265,0	11,5	0,79	0,78
59,7-60,3	глина	7,7	73,2	1,2	549,9	15,5	72,0	1,5	13,2	0,66	7,1	0,58	389,9	17,0	1,12	1,11
Скв. с-7. Северная часть месторождения, правобережье верхнего течения реки Мерцятаяха																
39,4-40,0	суглинок	7,2	27,5	0,5	262,1	7,4	96,2	2,0	12,5	0,6	4,0	0,3	204,8	8,9	-	0,61
49,4-50,0	суглинок	7,2	45,8	0,8	313,3	8,9	143	3,0	10,0	0,5	4,9	0,4	268,5	11,7	-	0,79
59,4-60,0	суглинок	7,2	30,5	0,5	250,1	7,1	82	1,7	10,0	0,5	3,0	0,3	196,6	8,6	-	0,57
Скв. ю-2 Северная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Тумбэтаяха																
49,4-50,0	суглинок	7,3	58,0	1,0	280,2	7,9	72,3	1,5	15,0	0,8	3,0	0,3	215,4	9,4	-	0,64
59,4-60,0	суглинок	7,2	76,3	1,3	430,6	12,2	127,6	2,7	12,5	0,6	6,8	0,6	342,1	14,9	-	1,00
69,4-70,0	суглинок	7,2	30,5	0,5	603,6	17,1	70,6	1,5	18,3	0,9	6,7	0,6	403,7	17,6	-	1,13

Состав и содержание водорастворимых солей в грунтах казанцевской свиты Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [89-109]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	РН	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ + K ⁺		Сухой остаток, %	Суммарное содержание солей, %
			МГ	МГ-ЭКВ	МГ	МГ-ЭКВ	МГ	МГ-ЭКВ	МГ	МГ-ЭКВ	МГ	МГ-ЭКВ	МГ	МГ-ЭКВ		
Скв. 1. Северная часть месторождения, близ озера Вархыто																
12,5-13	песок	8,5	18,3	0,3	327,0	9,2	27,4	0,6	12,4	0,6	9,5	0,8	199,6	8,7	0,6	0,6
17,5-18,1	песок	8,3	18,3	0,3	411,1	11,6	17,3	0,4	112	5,6	31,6	2,6	92,9	4,0	0,7	0,7
19,6-20,2	суглинок	7,8	45,8	0,8	771,8	21,7	119,5	2,5	20,4	1,0	18,7	1,5	515,7	22,4	1,5	1,5
22,3-22,6	песок	7,4	29,3	0,5	553,4	15,6	52,8	1,1	27,7	1,4	19,2	1,6	326,8	14,2	1,0	1,0
Скв. 3. Северо-западная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Мерцятаяха																
10-10,6	песок	8,5	41,5	0,7	21,7	0,6	25,9	0,5	4,0	0,2	2,4	0,2	32,9	1,4	0,1	0,1
12,5-13,1	песок	7,7	15,3	0,3	27,0	0,8	4,8	0,1	8,0	0,4	1,5	0,1	13,6	0,6	0,1	0,1
22,3-22,9	песок	7,9	21,4	0,4	105,8	3,0	12,0	0,3	12,0	0,6	3,4	0,3	62,1	2,7	0,2	0,2
25,0-25,6	песок	8,4	42,7	0,7	93,0	2,6	15,4	0,3	8,8	0,4	2,4	0,2	69,0	3,0	0,2	0,2
Скв. 4. Северо-восточная часть месторождения, устье реки Тумбэтаяха																
10-10,6	песок	8,0	23,2	0,4	24,5	0,7	12,0	0,3	3,6	0,2	1,2	0,1	23,7	1,0	0,1	0,1
14,6-15,4	песок	6,9	14,0	0,2	9,9	0,3	12,0	0,3	2,4	0,1	1,0	0,1	12,7	0,6	0,1	0,1
17,3-17,9	супесь	7,9	33,6	0,6	23,1	0,7	34,1	0,7	6,2	0,3	1,5	0,1	34,0	1,5	0,2	0,1
24,6-25,3	супесь	7,8	53,7	0,9	47,6	1,3	29,8	0,6	15,6	0,8	2,6	0,2	42,6	1,9	0,2	0,2
29,7-30,4	песок	7,3	27,5	0,5	21,3	0,6	15,8	0,3	9,8	0,5	1,9	0,2	16,6	0,7	0,1	0,1
40-40,6	песок	7,5	18,3	0,3	132,1	3,7	13,0	0,3	14,0	0,7	4,3	0,4	74,8	3,3	0,3	0,3
Скв. 5. Северо-западная часть месторождения, близ истока реки Варкуяха																
12,4-13,0	песок	7,6	24,4	0,4	35,1	1,0	21,6	0,5	8,4	0,4	0,5	0,0	31,7	1,4	0,1	0,12
17,0-17,6	песок	8,2	45,8	0,8	28,4	0,8	24,0	0,5	9,6	0,5	1,5	0,1	33,4	1,5	0,2	0,14
19,4-20,0	песок	7,6	24,4	0,4	16,0	0,5	16,8	0,4	8,8	0,4	3,9	0,3	10,1	0,4	0,1	0,08
27,3-27,9	песок	7,6	15,3	0,3	52,9	1,5	17,3	0,4	8,0	0,4	1,0	0,1	37,3	1,6	0,1	0,13
34,8-35,4	песок	7,9	12,2	0,2	132,4	3,7	13,0	0,3	17,2	0,9	5,1	0,4	67,2	2,9	0,3	0,25

Скв. 6. Западная часть месторождения, междуречье рек Хардьяха и Няволалаваяха																
14,0-14,2	песок	8,0	48,8	0,8	23,1	0,7	14,4	0,3	5,6	0,3	1,7	0,1	30,6	1,3	0,1	0,12
Скв. 8. Восточная часть месторождения, среднее течение реки Пикцятарка, 2 км восточнее озера Нгобто																
27,5-27,9	супесь	8,1	45,8	0,8	166,1	4,7	26,9	0,6	10,0	0,5	3,6	0,3	119,4	5,2	0,4	0,37
35,0-35,6	суглинок	8,1	65,9	1,1	232,5	6,6	9,6	0,2	19,2	1,0	2,7	0,2	152,7	6,6	0,5	0,48
Скв. 9. Южная часть месторождения, правобережье нижнего течения реки Сильяха																
11,9-12,5	супесь	8,3	27,5	0,5	111,5	3,1	36,0	0,8	5,6	0,3	2,4	0,2	88,8	3,9	0,3	0,27
14,8-15,4	песок	8,2	36,6	0,6	276,2	7,8	21,6	0,5	11,2	0,6	3,6	0,3	183,3	8,0	0,5	0,53
Скв. 10. Центральная часть месторождения, междуречье рек Пикцятарка и Няволалаваяха, 2,2 км южнее озера Нгобто																
16,5-17,7	супесь	7,4	41,5	0,7	82,4	2,3	11,5	0,2	20,4	1,0	3,9	0,3	43,7	1,9	0,2	0,20
22,5-23,1	песок	7,3	26,2	0,4	187,4	5,3	1,0	0,0	19,0	1,0	3,9	0,3	102,4	4,5	0,4	0,34
25,0-25,6	песок	7,5	22,0	0,4	54,7	1,5	1,4	0,0	7,8	0,4	1,5	0,1	32,7	1,4	0,1	0,12
Скв. 11. Юго-восточная часть месторождения, междуречье рек Хардьяха и Нюдянояха																
12,2-13,0	песок	8,1	45,8	0,8	20,6	0,6	39,8	0,8	5,6	0,3	1,9	0,2	39,6	1,7	0,2	0,15
17,5-18,2	песок	7,6	18,3	0,3	8,5	0,2	12,0	0,3	4,8	0,2	1,5	0,1	9,9	0,4	0,1	0,06
20,0-21,0	песок	7,6	15,3	0,3	42,6	1,2	29,8	0,6	5,2	0,3	1,0	0,1	39,8	1,7	0,1	0,13
22,5-23,5	песок	8,2	23,2	0,4	40,8	1,2	7,2	0,2	3,2	0,2	1,5	0,1	32,2	1,4	0,1	0,11
27,5-28,5	песок	7,9	23,2	0,4	54,7	1,5	17,8	0,4	4,0	0,2	4,9	0,4	38,6	1,7	0,1	0,14
Скв. 12. Южная часть месторождения, верхнее течение реки Хардьяха																
9,6-10,0	песок	7,9	36,6	0,6	76,7	2,2	16,8	0,4	8,8	0,4	2,9	0,2	55,9	2,4	0,2	0,20
14,7-15,3	песок	8,3	18,3	0,3	69,9	2,0	10,1	0,2	6,4	0,3	1,7	0,1	46,5	2,0	0,2	0,15
Скв. 13. Южная часть месторождения, правобережье нижнего течения реки Сильяхи																
16,8-17,5	песок	8,6	33,6	0,6	18,8	0,5	20,2	0,4	4,8	0,2	0,7	0,1	27,6	1,2	0,1	0,11
21,9-22,7	песок	8,6	18,3	0,3	29,1	0,8	12,0	0,3	5,2	0,3	1,2	0,1	23,2	1,0	0,1	0,09
26,8-27,5	песок	8,1	15,3	0,3	30,5	0,9	14,4	0,3	5,6	0,3	0,5	0,0	25,1	1,1	0,1	0,09
Скв. 15. Южная часть месторождения, левобережье нижнего течения реки Сильяха																
9,6-10,0	песок	7,6	21,4	0,4	83,4	2,4	27,4	0,6	6,4	0,3	1,9	0,2	64,2	2,8	0,2	0,21
Скв. 16. Северная часть месторождения, 1,5 км севернее реки Мерцятаяха																
12,5-12,9	суглинок	7,6	42,7	0,7	956,0	26,9	150,7	3,1	20,8	1,0	18,0	1,5	649,8	28,3	1,8	1,84
15,0-15,4	песок	8,7	39,0	0,6	140,9	3,0	27,4	0,6	16,0	0,8	4,4	0,4	92,5	4,0	0,3	0,32
17,5-17,9	песок	7,5	21,4	0,4	1183	33,3	146,9	3,1	42,5	2,1	50,3	4,1	700,6	30,5	2,1	2,14

Скв. 18. Центральная часть месторождения, правобережье верхнего течения реки Нявоталаваяха, более 2 км юго-западнее озера Нгобто																
17,2-17,6	песок	8,1	27,5	0,5	55,7	1,6	21,1	0,4	5,6	0,3	2,7	0,2	45,1	2,0	0,2	0,16
19,8-20,0	суглинок	8,1	30,5	0,5	267,7	7,5	19,7	0,4	8,0	0,4	9,7	0,8	166,8	7,3	0,5	0,50
22,2-22,5	песок	7,7	21,4	0,4	31,2	0,9	14,4	0,3	4,8	0,2	2,2	0,2	25,5	1,1	0,1	0,10
Скв. 19. Центральная часть месторождения, междуречье рек Пикцятарка и Нявоталаваяха, 4.8 км южнее озера Нгобто																
10,0-11,0	песок	8,0	30,5	0,5	115,7		3,3	0,1	24,0	0,5	0,0	7,2	0,4	0,0	2,4	0,20
12,9-13,7	песок	7,2	12,2	0,2	8,5		0,2	0,0	9,6	0,2	0,0	3,2	0,2	0,0	1,0	0,08
17,3-17,9	песок	7,1	18,3	0,3	10,3		0,3	0,0	7,2	0,2	0,0	3,2	0,2	0,0	1,5	0,12
27,5-28,3	песок	7,1	12,2	0,2	71,7		2,0	0,1	19,2	0,4	0,0	7,6	0,4	0,0	2,7	0,22
40,0-41,0	песок	7,3	14,0	0,2	88,8		2,5	0,1	25,0	0,5	0,0	8,0	0,4	0,0	3,4	0,28
Скв. 21. Восточная часть месторождения, 3 км на северо-восток от озера Нгобто																
12,5-13,1	песок	7,2	14,0	0,2	15,3	0,4	14,9	0,3	3,2	0,2	1,0	0,1	16,6	0,7	0,1	0,07
17,5-18,1	песок	7,4	15,3	0,3	11,0	0,3	21,1	0,4	3,6	0,2	1,0	0,1	17,0	0,7	0,1	0,07
22,5-23,1	песок	7,7	18,3	0,3	8,5	0,2	9,6	0,2	4,2	0,2	1,0	0,1	10,4	0,5	0,1	0,05
27,5-28,1	песок	7,4	17,1	0,3	21,3	0,6	19,2	0,4	4,6	0,2	0,7	0,1	22,8	1,0	0,1	0,09
35,0-35,6	песок	7,5	12,2	0,2	57,9	1,6	43,2	0,9	4,0	0,2	1,9	0,2	52,4	2,3	0,2	0,17
Скв. с-7. Северная часть месторождения, правобережье верхнего течения реки Мерцятаяха																
6,7-7,5	Песок	7,2	21,1	0,3	3,9	0,1	17,4	0,4	6,1	0,3	1,9	0,2	8,3	0,4	-	0,06
14,4-15,0	Суглинок	7,0	39,7	0,7	12,4	0,4	25,7	0,5	16,3	0,8	2,3	0,2	12,3	0,5	-	0,11
18,2-18,8	Песок	7,1	12,7	0,2	71,7	2,0	43,8	0,9	5,9	0,3	1,4	0,1	63,0	2,7	-	0,20
21,7-22,3	Песок	7,2	24,4	0,4	3,5	0,1	33,9	0,7	8,4	0,4	1,3	0,1	15,6	0,7	-	0,09
25,7-26,3	Песок	7,1	11,4	0,2	8,2	0,2	22,6	0,5	4,9	0,2	0,6	0,1	13,8	0,6	-	0,06
29,4-30,0	Песок	7,2	19,8	0,3	4,9	0,1	44,5	0,9	8,6	0,4	1,5	0,1	19,3	0,8	-	0,10
Скв. ю-2. Северная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Тумбэтаяха																
7,0-7,6	Песок	7,0	45,8	0,8	3,1	0,1	35,3	0,7	8,8	0,4	1,5	0,1	23,2	1,0	-	0,12
10,7-11,3	Песок	7,1	30,5	0,5	136,3	3,9	25,7	0,5	10,0	0,5	1,5	0,1	97,9	4,3	-	0,25
14,5-15,1	Песок	7,1	11,3	0,2	274,8	7,6	31,3	0,6	10,5	0,5	1,5	0,1	172,6	7,7	-	0,50
21,9-22,5	Песок	7,1	33,1	0,5	125,1	3,5	29,0	0,6	8,3	0,4	0,5	0,0	94,8	4,1	-	0,29
29,5-30,1	Песок	7,1	34,1	0,6	124,1	3,4	33,0	0,7	9,3	0,5	1,52	0,1	96,8	4,1	-	0,30
34,4-35,0	Песок	7,3	15,3	0,3	143	4	25,7	0,5	7,5	0,3	3,0	0,2	97,9	4,3	-	0,27
39,2-39,8	Песок	7,3	11,9	0,2	150,6	4,2	26,7	0,6	10,9	0,5	3,8	0,3	99,4	4,3	-	0,30
Скв. ю-6. Северная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Тумбэтаяха																
10,7-11,3	Песок	7,3	16,9	0,3	89,1	2,5	18,2	0,4	12,5	0,6	4,6	0,4	49,9	2,2	-	0,19

18,3-18,9	Песок	7,1	15,3	0,3	68,1	1,9	30,1	0,6	10,0	0,5	4,3	0,4	44,8	2,0	-	0,17
21,9-22,5	Песок	7,2	13,4	0,2	154,0	4,4	23,1	0,5	7,6	0,4	2,8	0,2	102,1	4,4	-	0,30
25,6-26,3	Песок	7,2	21,1	0,3	300,3	8,5	68,9	1,4	15,0	0,8	7,9	0,7	203,7	8,9	-	0,62
29,3-30,3	Песок	7,1	11,4	0,2	98,4	2,8	22,6	0,5	8,8	0,4	3,8	0,3	61,8	2,7	-	0,21
34,4-35,0	Песок	7,2	61,0	1,0	256,7	7,3	78,9	1,6	9,0	0,5	3,6	0,3	210,1	9,1	-	0,62

Состав и содержание водорастворимых солей в грунтах третьей морской террасы Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [89-109]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	РН	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ + K ⁺		Сухой остаток %	Суммарное содержание солей %
			мг	мг-экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв		
Скв. 3. Северо-западная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Мерцятаяха																
5,0-5,6	суглинок	8,2	109,8	1,8	246,4	6,9	53,8	1,1	10,6	0,5	2,2	0,2	210,2	9,1	0,6	0,63
7,2-7,9	суглинок	8,3	90,3	1,5	180,7	5,1	26,4	0,6	14,0	0,7	1,0	0,1	145,6	6,3	0,5	0,46
Скв. 5. Северо-западная часть месторождения, близ истока реки Варкуяха																
2,0-2,6	глина	8,1	70,2	1,2	466,5	13,1	32,6	0,7	20,0	1,0	3,9	0,3	314,0	13,7	0,9	0,91
4,7-5,3	суглинок	8,1	70,2	1,2	335,5	9,5	47,0	1,0	14,8	0,7	2,7	0,2	243,8	10,6	0,7	0,71
9,4-10,3	суглинок	8,0	62,8	1,0	251,7	7,1	38,9	0,8	14,4	0,7	2,9	0,2	183,1	8,0	0,6	0,55
Скв. 7. Юго-восточная часть месторождения, правый приток реки Сильяха, 2,4 км на северо-запад от озера Сейто																
5,0-5,7	глина	7,9	62,8	1,0	279,0	7,9	38,4	0,8	17,2	0,9	6,4	0,5	190,7	8,3	0,6	0,60
Скв. 8. Восточная часть месторождения, среднее течение реки Пикцятарка, 2 км восточнее озера Нгобто																
4,6-5,3	суглинок	8,1	81,1	1,3	315,2	8,9	25,9	0,5	12,8	0,6	4,9	0,4	223,3	9,7	0,7	0,66
7,1-7,6	суглинок	8,0	70,2	1,2	373,5	10,5	36,0	0,8	12,8	0,6	5,5	0,5	260,6	11,3	0,8	0,76
12,2-12,9	суглинок	8,0	58,0	1,0	398,3	11,2	15,8	0,3	12,0	0,6	5,6	0,5	263,1	11,4	0,8	0,75
17,1-17,8	суглинок	8,1	84,2	1,4	423,2	11,9	13,4	0,3	12,6	0,6	4,3	0,4	289,8	12,6	0,8	0,83
22,1-22,8	суглинок	8,0	75,0	1,2	348,6	9,8	30,7	0,6	12,8	0,6	4,4	0,4	245,6	10,7	0,7	0,72
Скв. 20. Центральная часть месторождения, правобережье верхнего течения реки Нявоталаваяха, 400 м от озера Нгобто																
1,8-2,2	суглинок	7,2	87,8	1,4	110,8	3,1	22,6	0,5	10,2	0,5	3,8	0,3	96,8	4,2	0,3	0,33
5,4-6,0	суглинок	7,8	106,8	1,8	249,9	7,0	59,0	1,2	9,8	0,5	6,9	0,6	206,1	9,0	0,7	0,64
9,5-10,5	суглинок	7,8	94,6	1,6	345,1	9,7	33,6	0,7	13,4	0,7	2,8	0,2	254,6	11,1	0,8	0,75
14,5-15,5	суглинок	8,0	112,2	1,8	265,5	7,5	24,5	0,5	7,8	0,4	2,4	0,2	212,5	9,2	0,6	0,63
Скв. 21. Восточная часть месторождения, 3 км на северо-восток от озера Нгобто																
2,2-2,5	суглинок	7,5	61,0	1,0	409,0	11,5	44,2	0,9	18,0	0,9	15,0	1,2	260,1	11,3	0,8	0,81
7,5-8,1	суглинок	7,9	51,9	0,9	90,2	2,5	26,4	0,6	9,8	0,5	3,5	0,3	72,9	3,2	0,2	0,26
Скв. с-7. Северная часть месторождения, правобережье верхнего течения реки Мерцятаяха																
3,2-3,8	суглинок	7,3	45,8	0,8	12,4	0,4	148,1	3,1	4,0	0,2	1,8	0,2	88,1	3,8	-	0,30
Скв. ю-2 Северная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Тумбэтаяха																
3,3-3,9	суглинок	6,7	38,1	0,6	3,1	0,1	45,3	0,9	7,5	0,4	0,8	0,1	28,0	1,2	-	0,12
Скв. ю-6. Северная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Тумбэтаяха																
3,0-4,0	суглинок	7,8	45,8	0,8	51,7	1,5	33,1	0,7	10,2	0,5	7,9	0,7	40,0	1,7	-	0,19
7,0-7,6	суглинок	7,4	67,1	1,1	77,0	2,2	251,7	5,2	15,0	0,8	7,9	0,7	163,7	7,1	-	0,58

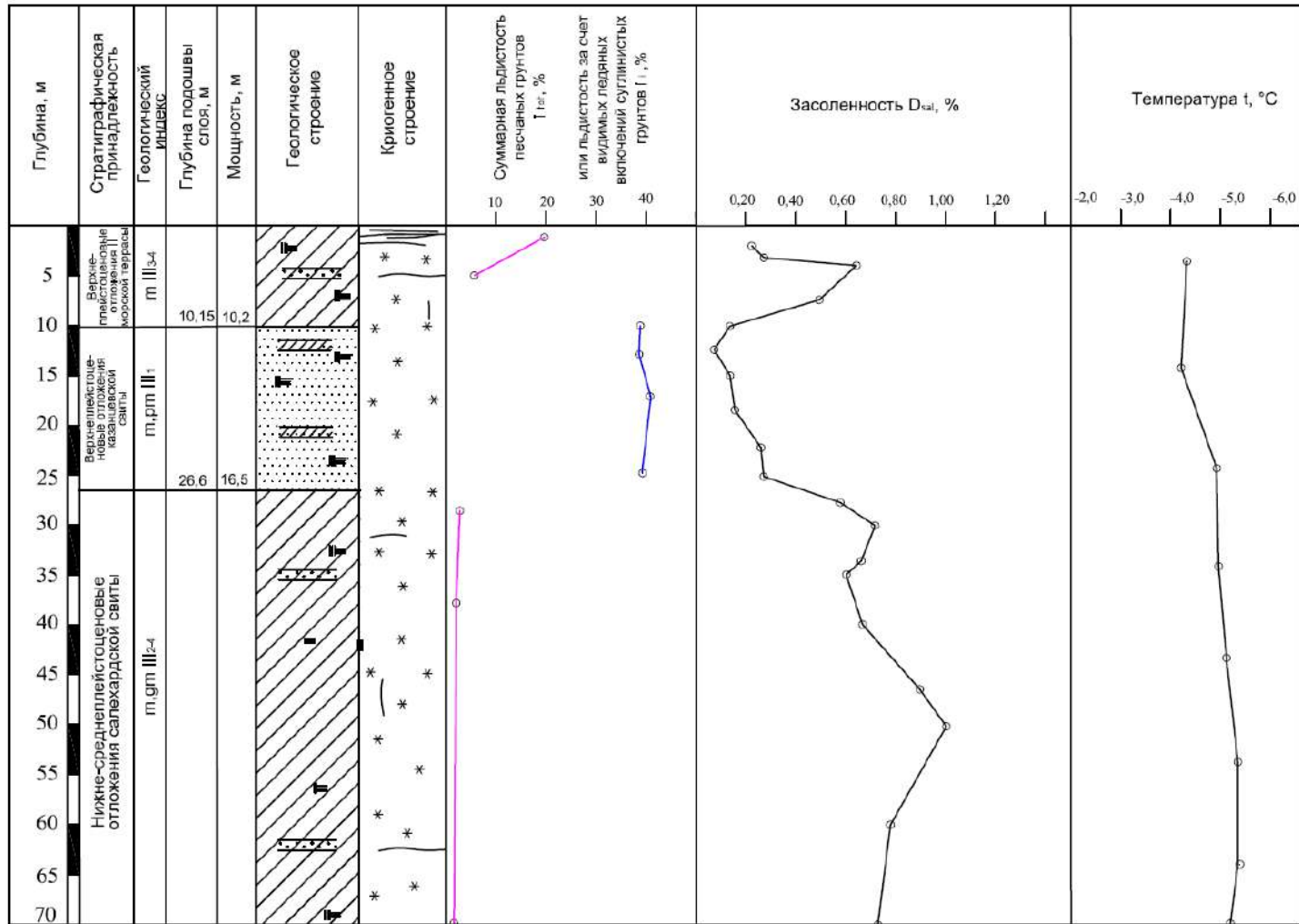
Состав и содержание водорастворимых солей в грунтах второй морской террасы Харасавэйского месторождения (результаты на 100 г абсолютно-сухого грунта) [89-109]

Глубина отбора, м	Наименование грунта	PH	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ + K ⁺		Сухой остаток %	Суммарное содержание солей %
			мг	мг- экв	мг	мг- экв	мг	мг- экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв	мг	мг-экв		
Скв. 2. Юго-восточная часть месторождения, 700 м на северо-запад от озера Сейто																
2,4-2,9	суглинок	6,7	143,4	2,4	53,6	1,5	62,4	1,3	9,6	0,5	6,1	0,5	94,1	4,1	0,4	0,37
7,3-7,9	суглинок	8,4	64,1	1,1	272,6	7,7	56,2	1,2	12,0	0,6	5,4	0,4	203,8	8,9	0,6	0,61
Скв. 3. Северо-западная часть месторождения, междуречье рек Варкуяха и Мерцятаха																
2,3-2,9	суглинок	7,6	64,1	1,1	32,0	0,9	56,2	1,2	8,8	0,4	3,4	0,3	55,2	2,4	0,2	0,22
7,2-7,8	суглинок	7,9	53,7	0,9	235,0	6,6	29,8	0,6	16,8	0,8	6,3	0,5	155,3	6,8	0,5	0,50
Скв. 6. Западная часть месторождения, междуречье рек Хардыяха и Нявоталаваяха																
2,1-2,9	суглинок	5,9	48,8	0,8	10,7	0,3	9,1	0,2	9,6	0,5	4,6	0,4	9,9	0,4	0,1	0,09
7,6-8,3	суглинок	7,4	51,9	0,9	30,5	0,9	12,5	0,3	9,6	0,5	6,6	0,5	21,9	1,0	0,1	0,13
Скв. 9. Южная часть месторождения, правобережье нижнего течения реки Сильяха																
4,6-5,0	глина	8,2	115,9	1,9	187,4	5,3	36,0	0,8	12,0	0,6	2,9	0,2	163,1	7,1	0,5	0,52
7,1-7,5	глина	8,4	100,7	1,7	247,1	7,0	39,4	0,8	11,2	0,6	3,9	0,3	196,7	8,6	0,6	0,60
Скв. 10. Центральная часть месторождения, междуречье рек Пикцятарка и Нявоталаваяха, 2,2 км южнее озера Нгопто																
3,8-4,1	суглинок	4,8	85,4	1,4	11,7	0,3	27,8	0,6	12,6	0,6	8,1	0,7	23,2	1,0	0,2	0,17
12,5-13,1	суглинок	4,8	85,4	1,4	11,7	0,3	27,8	0,6	12,6	0,6	8,1	0,7	23,2	1,0	0,2	0,17
Скв. 13. Южная часть месторождения, правобережье нижнего течения реки Сильяхи																
2,4-2,9	суглинок	7,1	85,4	1,4	68,2	1,9	76,8	1,6	11,2	0,6	5,8	0,5	89,2	3,9	0,4	0,34
6,9-7,5	суглинок	7,7	106,8	1,8	170,4	4,8	40,8	0,9	16,8	0,8	4,9	0,4	141,7	6,2	0,5	0,48
12,1-12,7	глина	7,3	88,5	1,5	163,7	4,6	38,4	0,8	10,4	0,5	4,4	0,4	137,5	6,0	0,5	0,44
Скв. 15. Южная часть месторождения, левобережье нижнего течения реки Сильяха																
2,3-2,7	суглинок	4,7	18,3	0,3	102,2	2,9	580,8	12,1	27,3	1,4	37,0	3,0	250,2	10,9	1,0	1,02
5,0-5,4	глина	7,6	65,9	1,1	460,1	13,0	49,0	1,0	16,8	0,8	6,6	0,5	314,6	13,7	0,9	0,91
Скв. 17. Центральная часть месторождения, междуречье рек Сармикэцятарка и Тумбэтаяха																
2,3-2,9	супесь	6,7	42,7	0,7	10,7	0,3	12,0	0,3	6,2	0,3	3,5	0,3	15,2	0,7	0,1	0,09
4,7-5,2	глина	7,5	100,7	1,7	230,0	6,5	65,3	1,4	11,8	0,6	6,0	0,5	193,2	8,4	0,6	0,61
9,4-10,0	глина	7,9	88,5	1,5	205,2	5,8	63,8	1,3	12,4	0,6	4,0	0,3	175,3	7,6	0,6	0,55
Скв. 19. Центральная часть месторождения, междуречье рек Пикцятарка и Нявоталаваяха, 4,8 км южнее озера Нгопто																
2,0-2,6	суглинок	7,7	56,7	0,9	0,1	332,3	9,4	0,3	27,8	0,6	0,0	14,4	0,7	0,0	3,9	0,32
7,0-7,7	суглинок	7,5	50,0	0,8	0,1	545,3	15,4	0,5	40,8	0,9	0,0	13,6	0,7	0,0	7,8	0,64

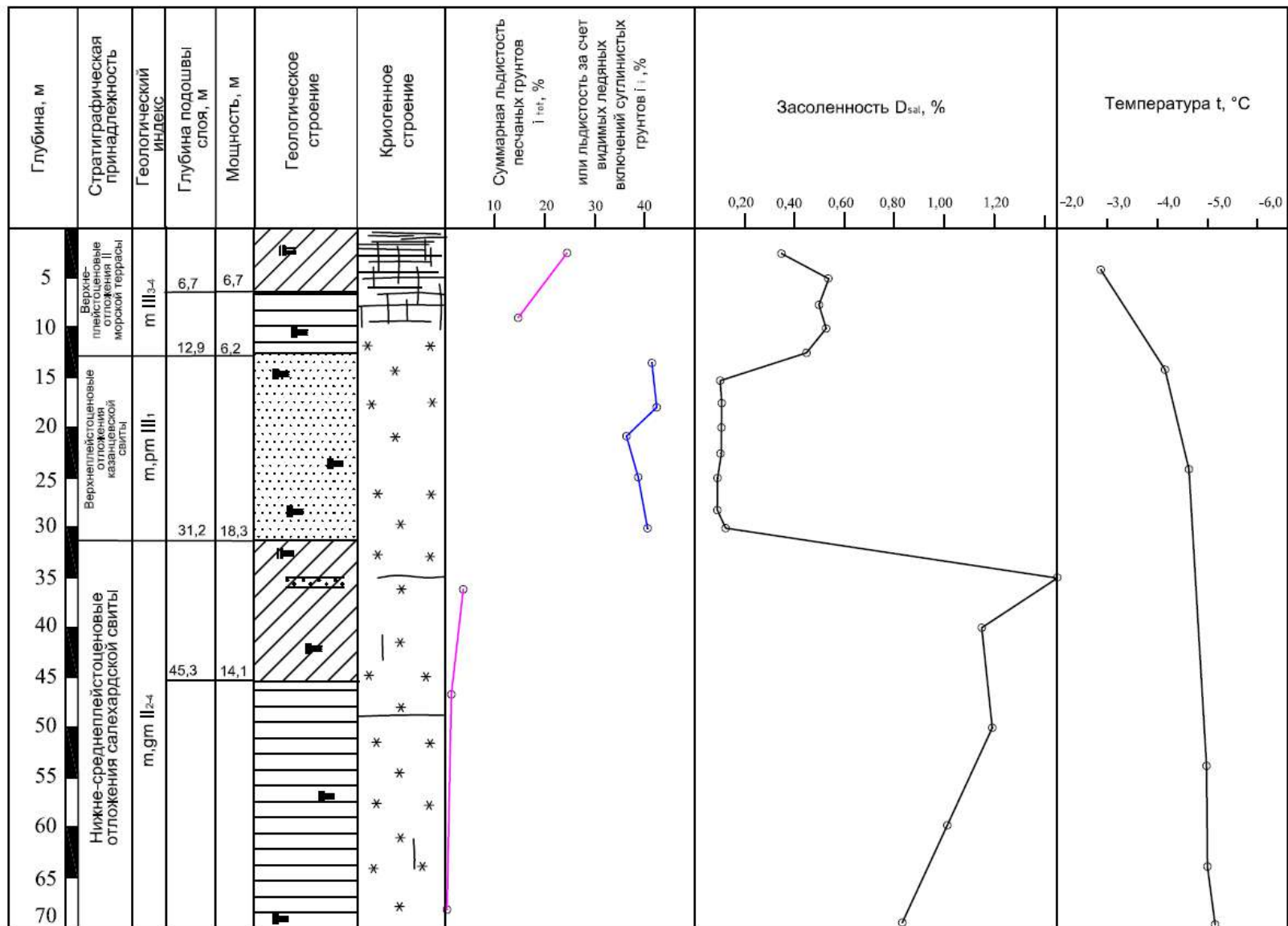
Приложение 2. Грунтовые толщи территории Харасавэйского месторождения

Благоприятные грунтовые толщи для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения

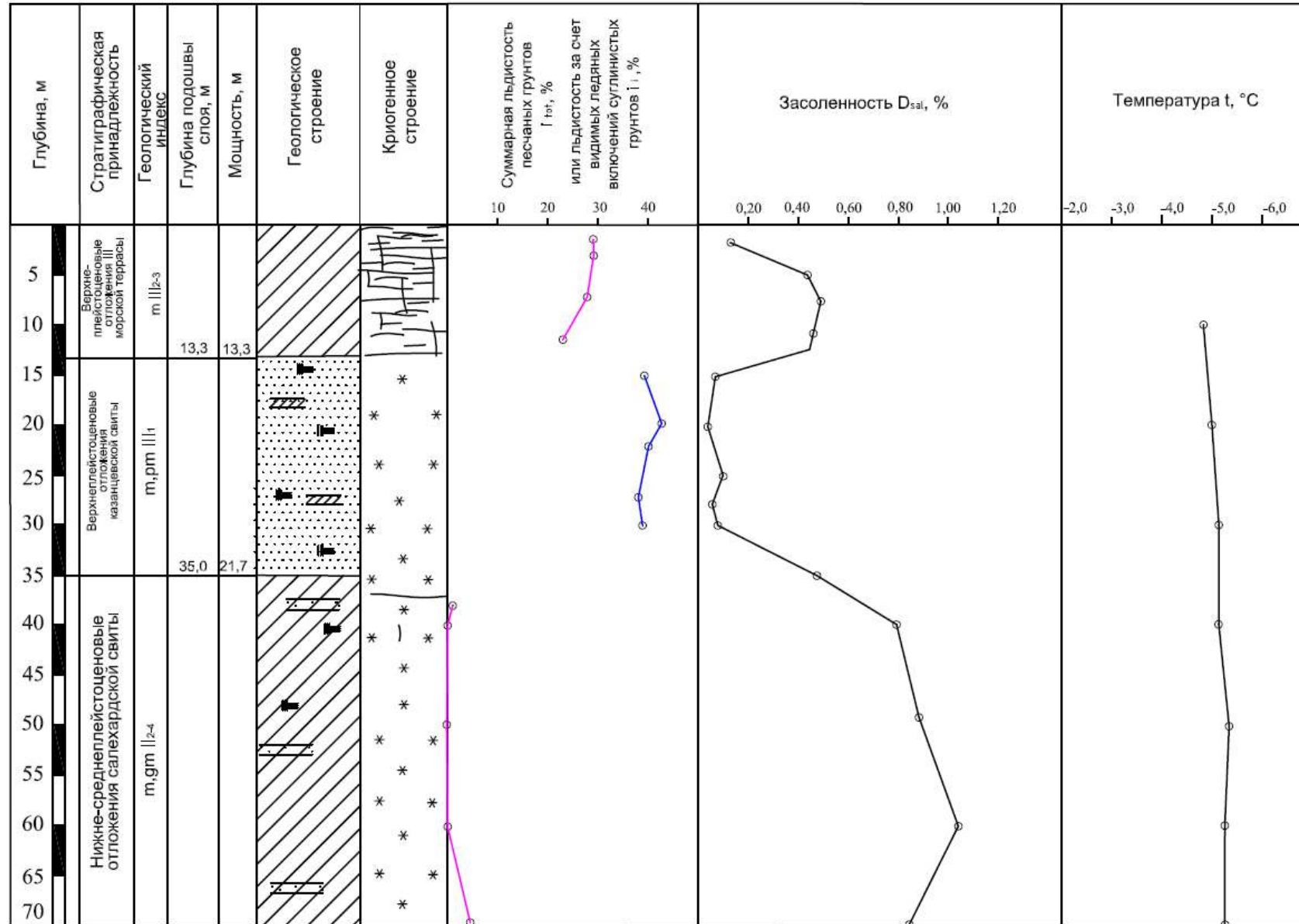
Грунтовая толща №13, скважина 3



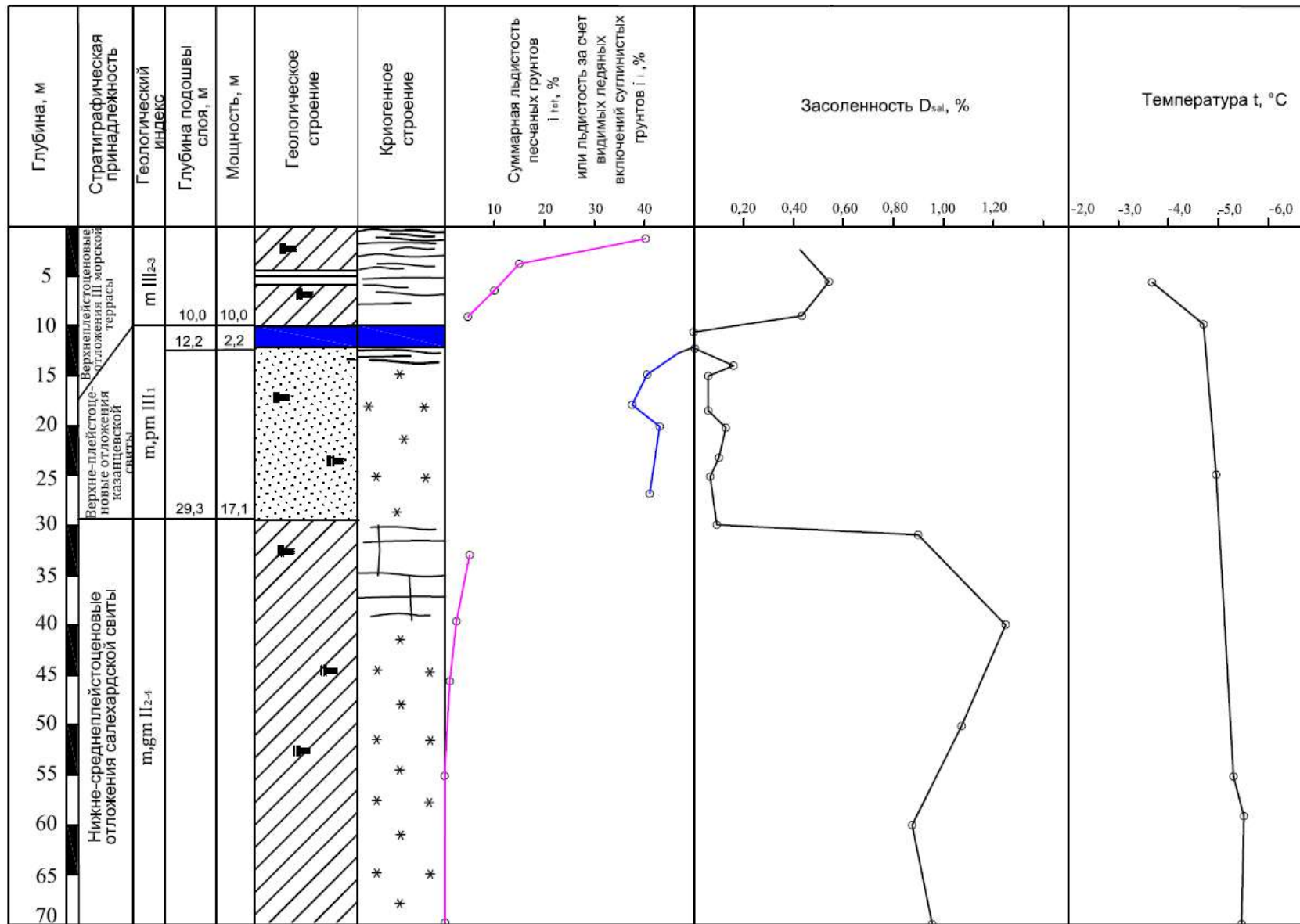
Грунтовая толща №13, скважина 13



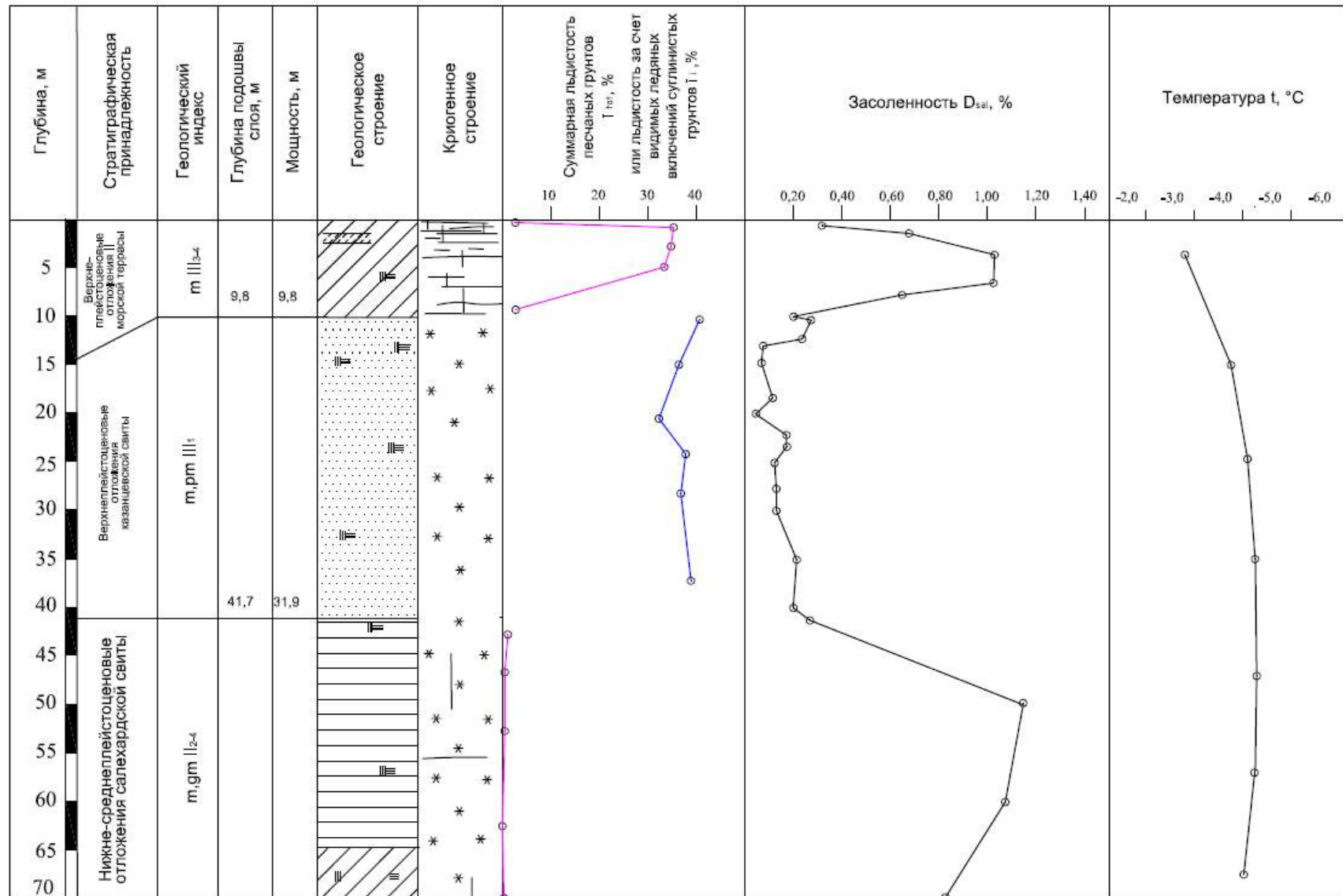
Грунтовая толща №13, скважина с-9



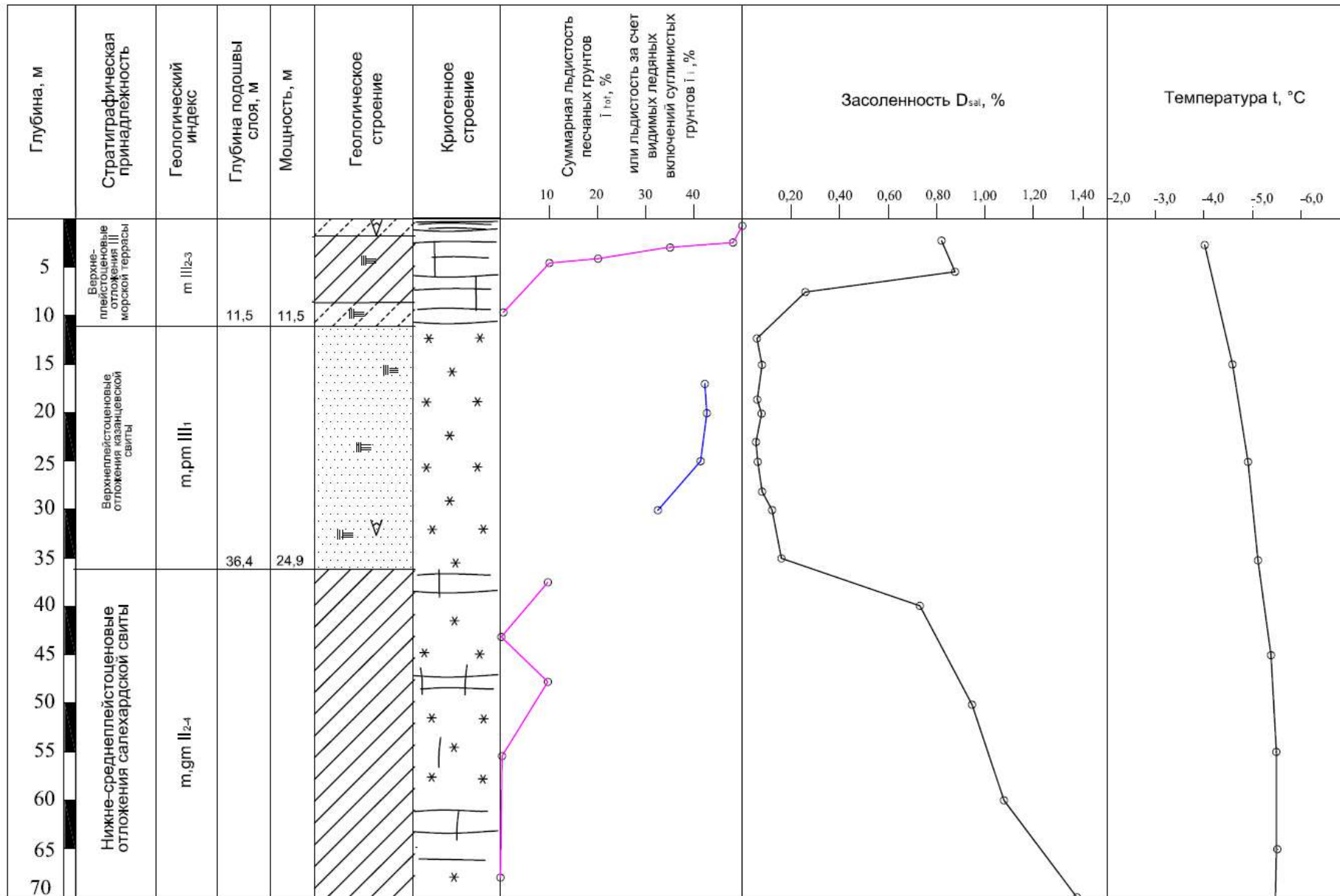
Грунтовая толща №14, скважина 11



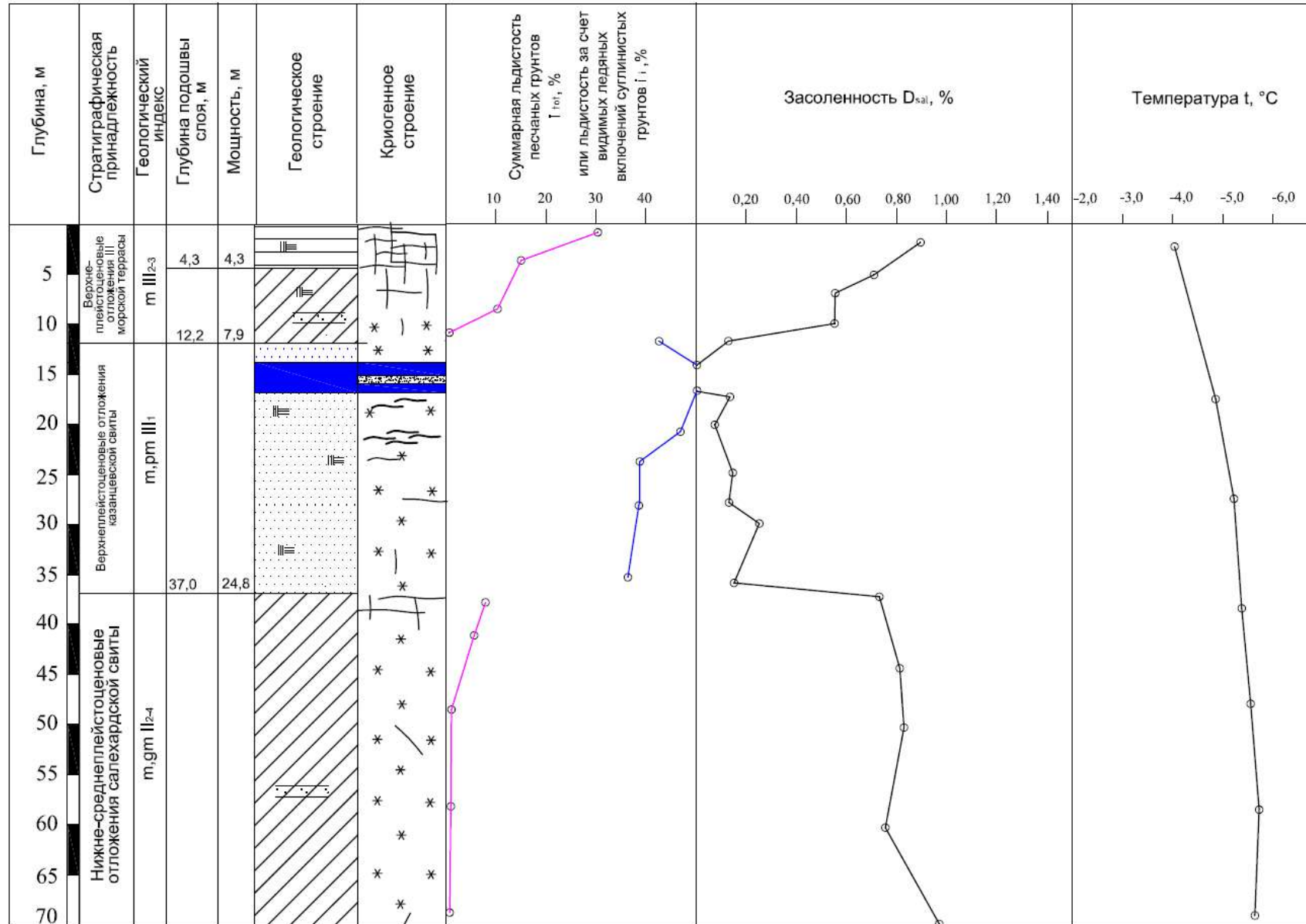
Грунтовая толща №16, скважина 19



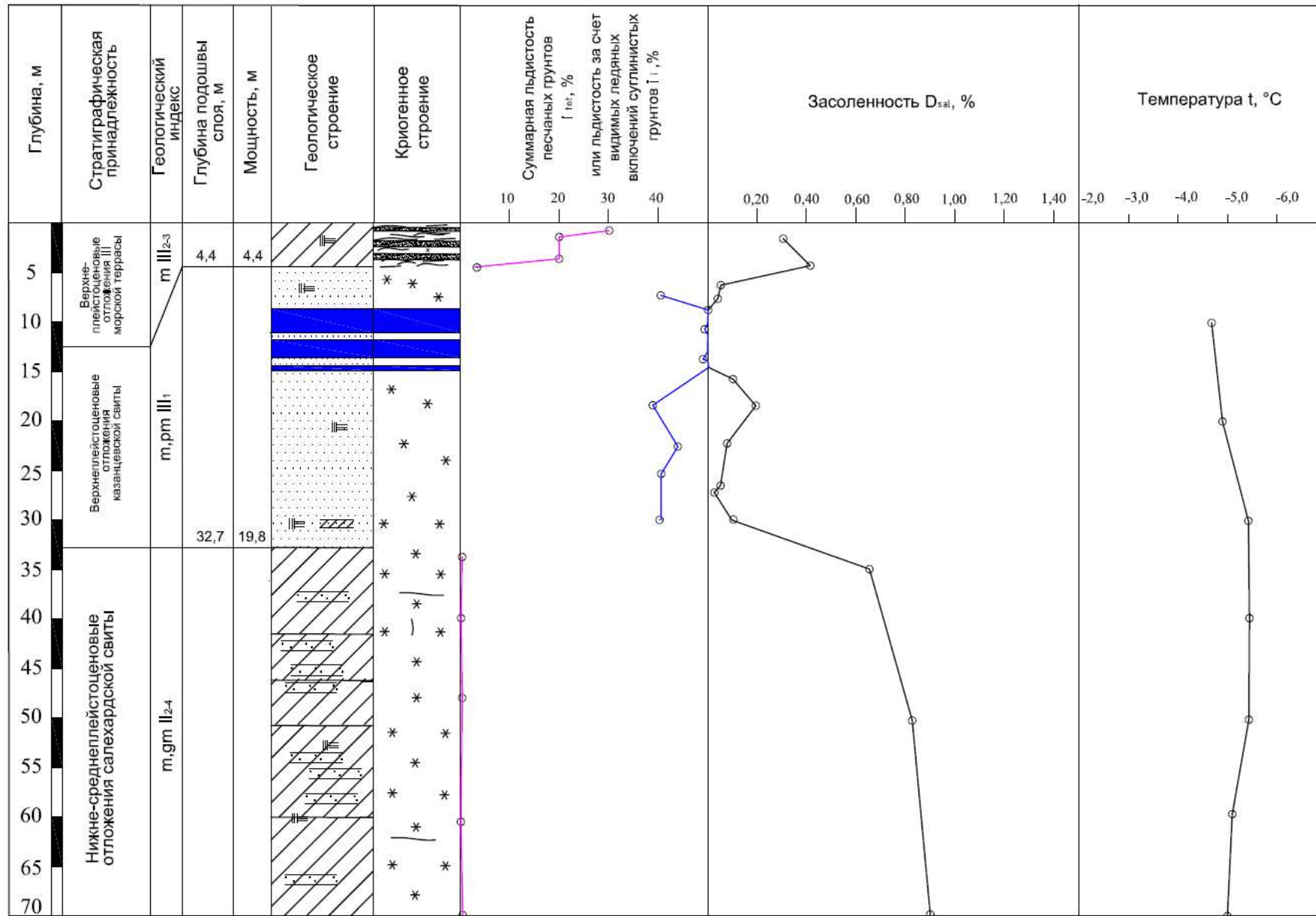
Грунтовая толща №16, скважина 21



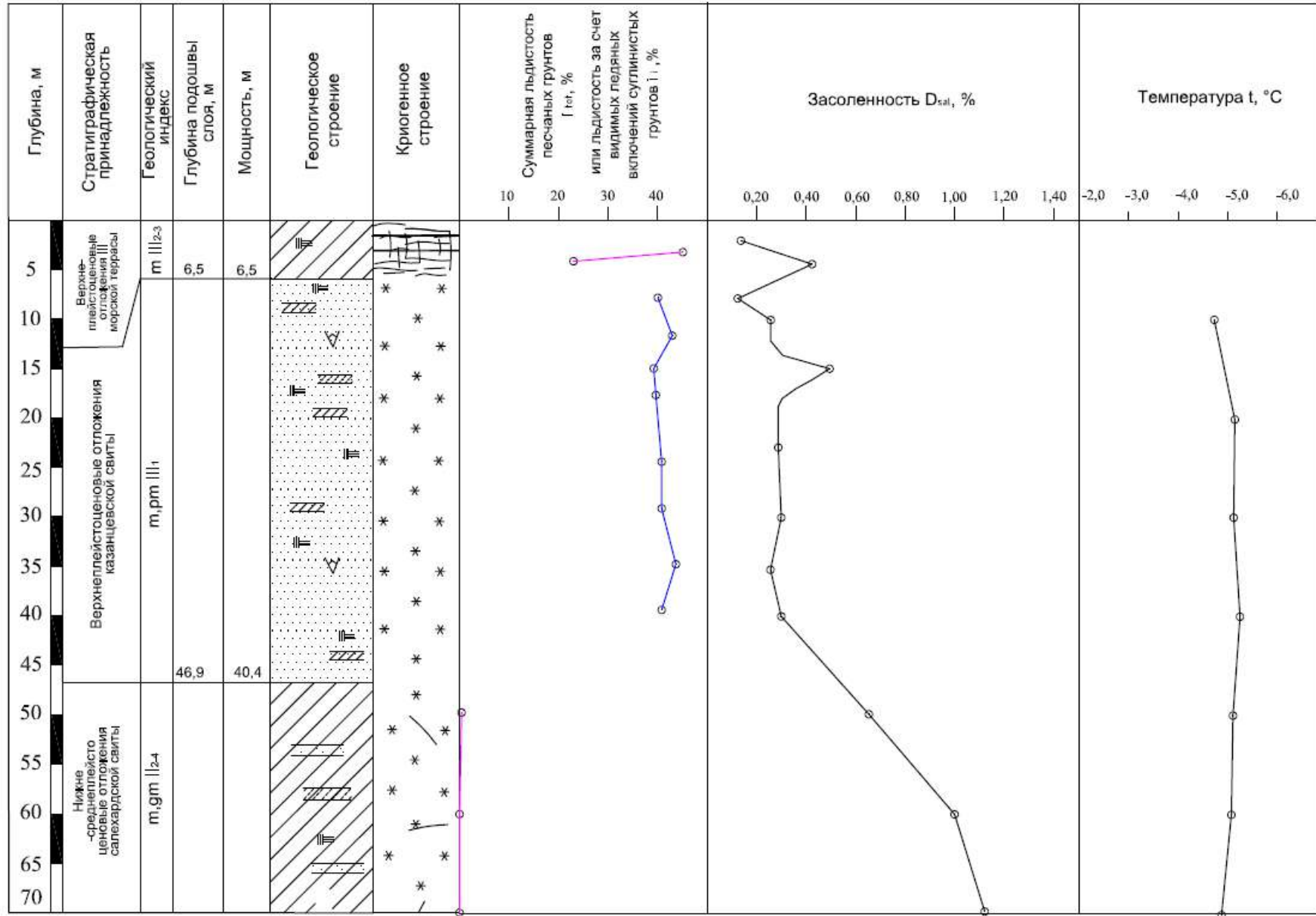
Грунтовая толща №17, скважина 5



Грунтовая толща №19, скважина с-7

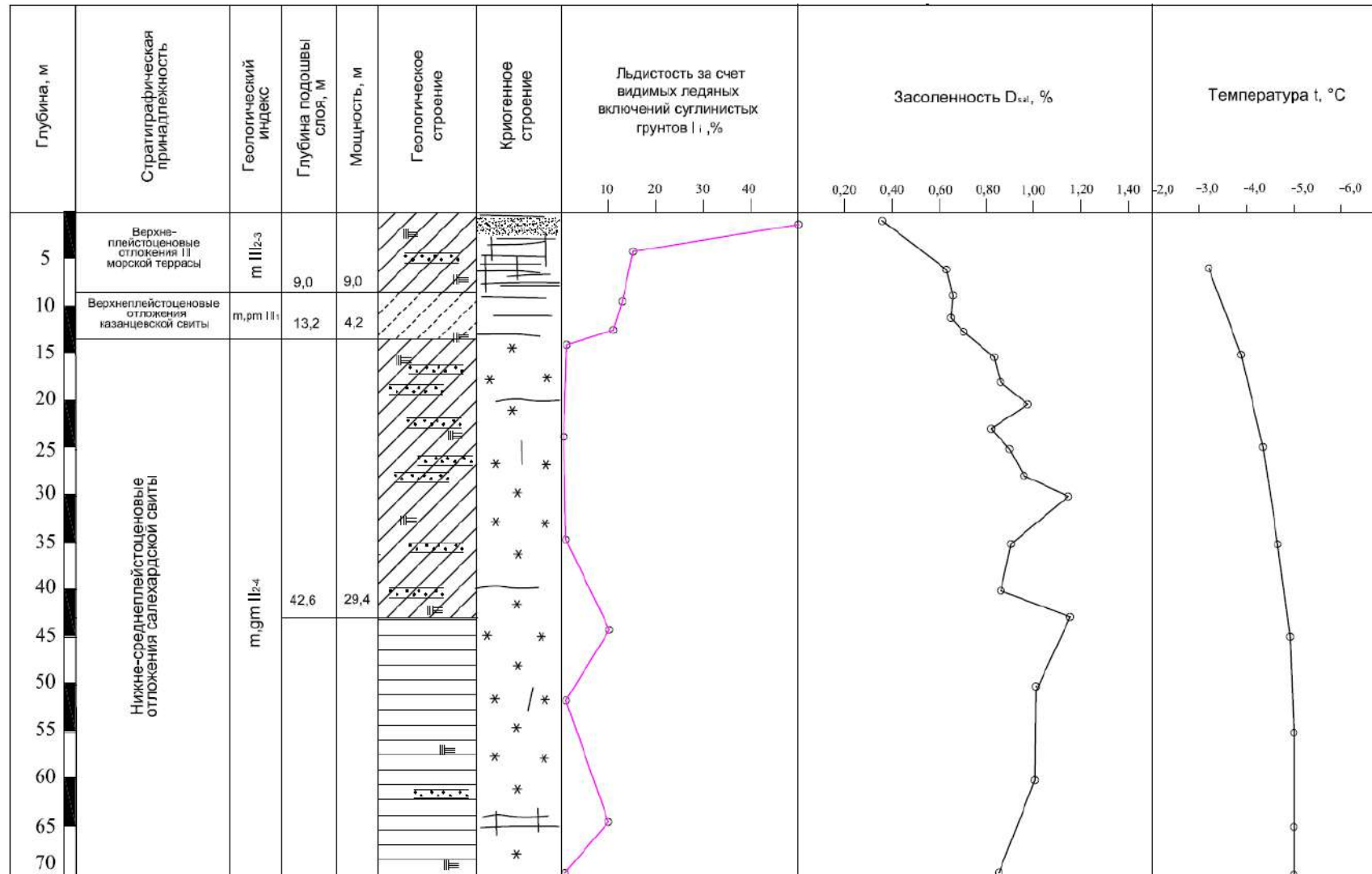


Грунтовая толща №20, скважина ю-2

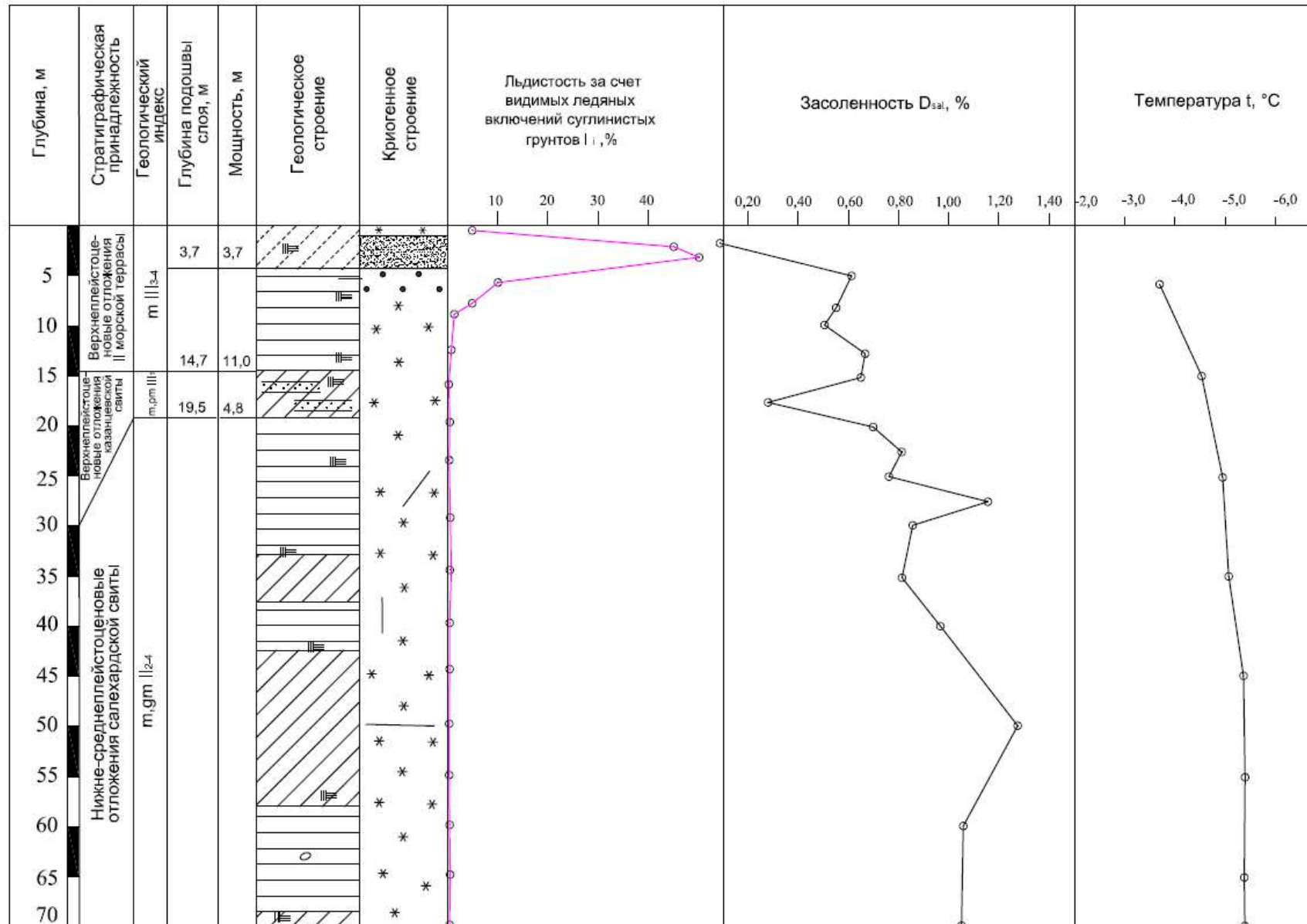


Неблагоприятные грунтовые толщи для строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения

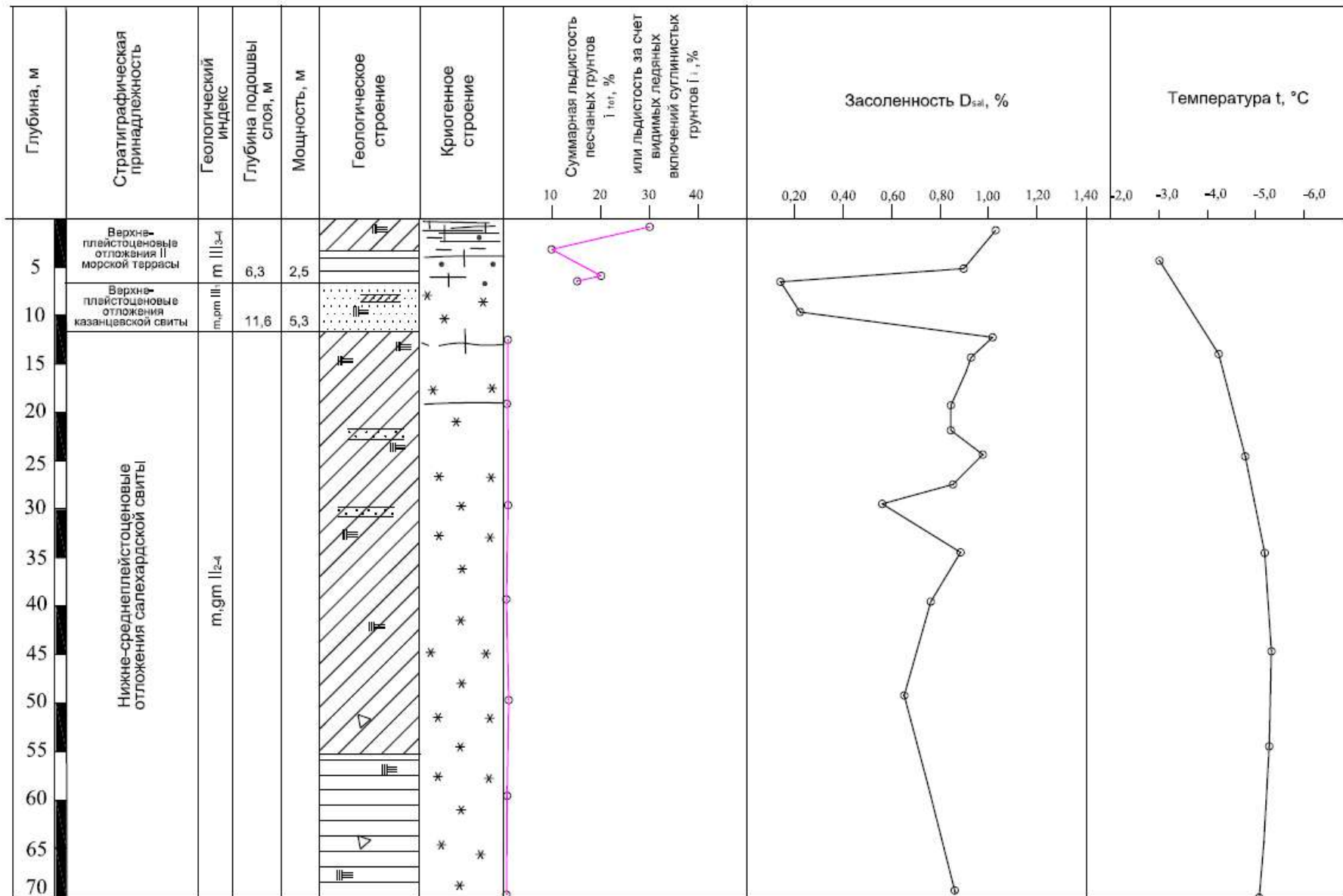
Грунтовая толща №1, скважина 2



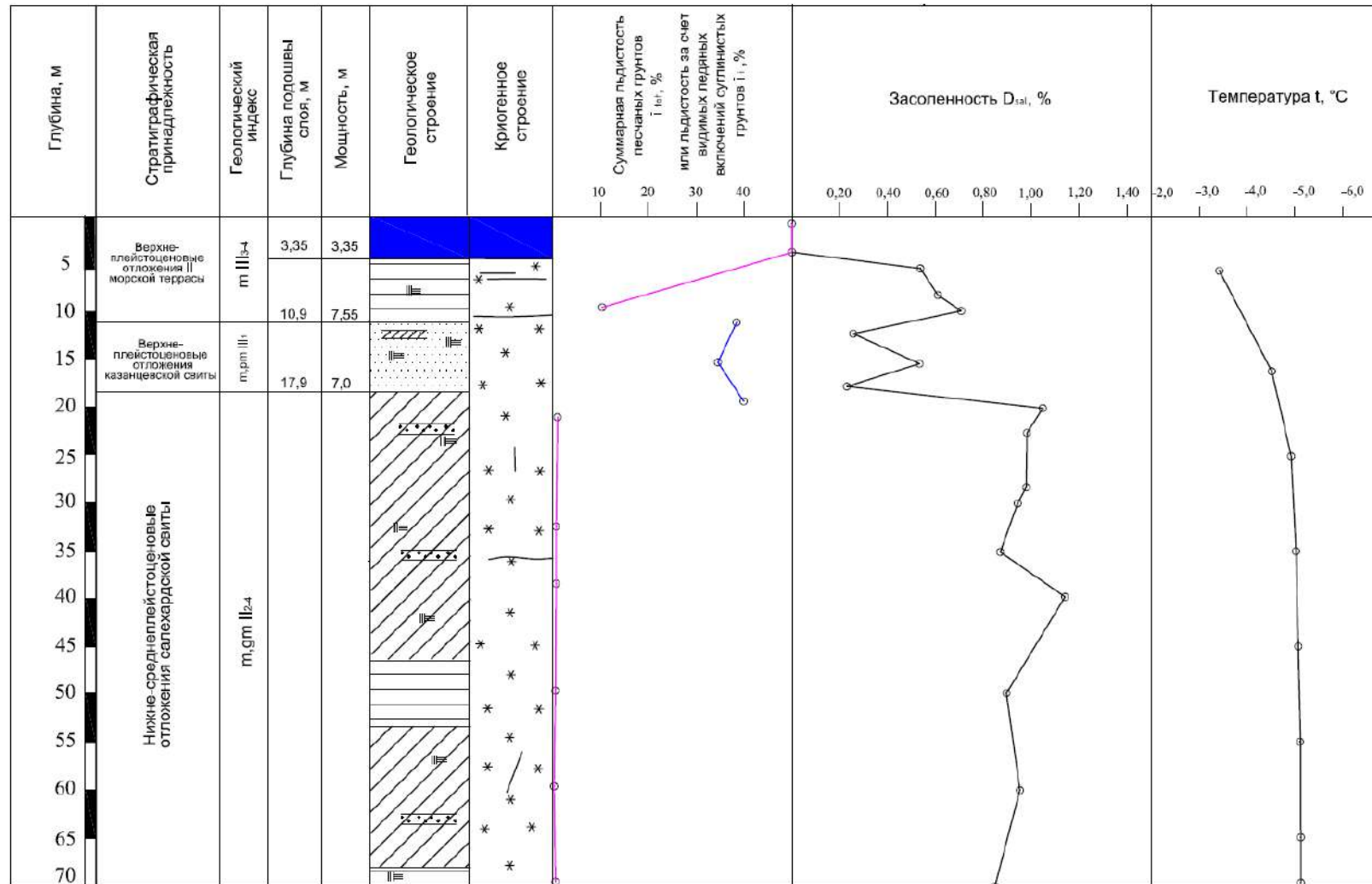
Грунтовая толща №3, скважина 17



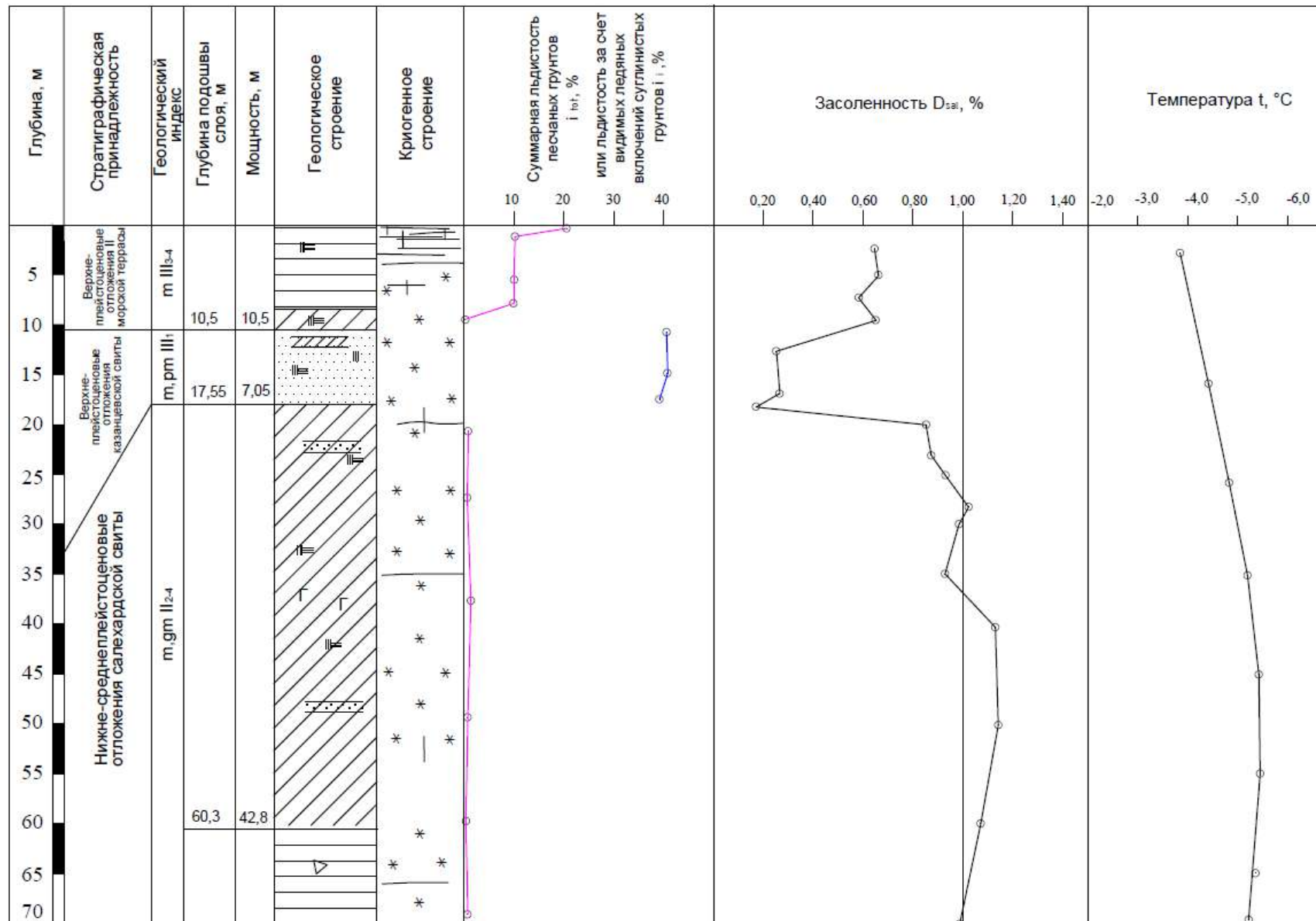
Грунтовая толща №7, скважина 15



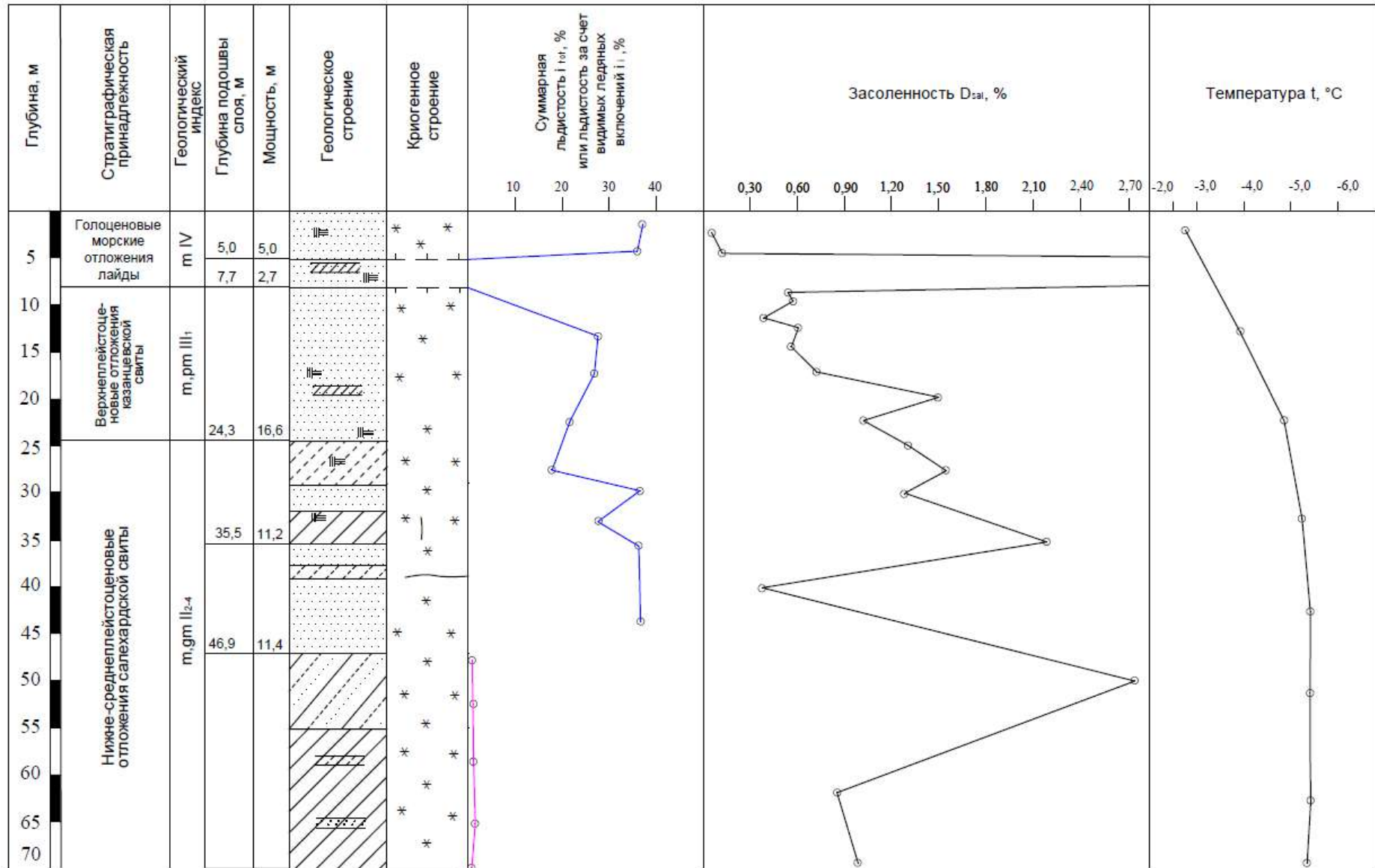
Грунтовая толща №9, скважина 9



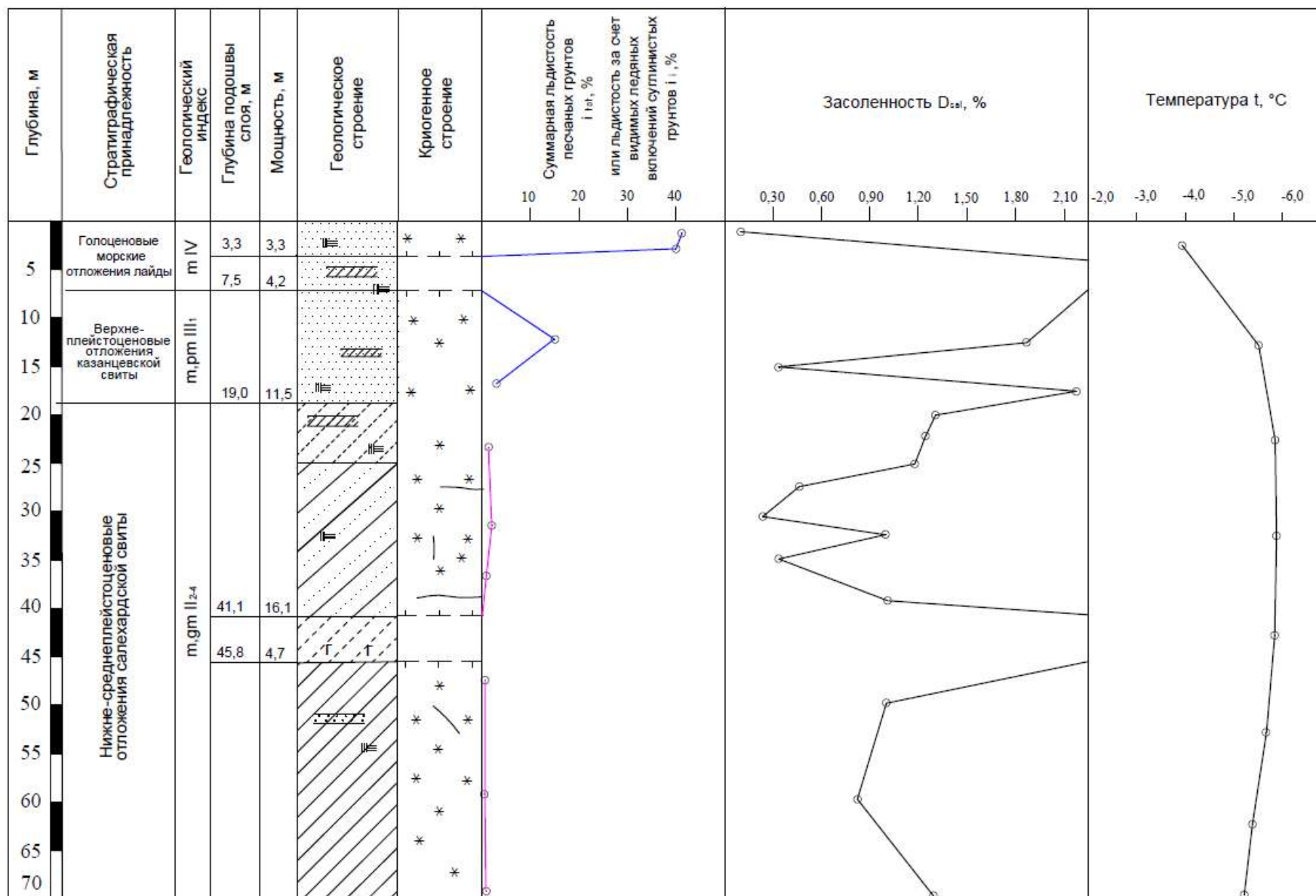
Грунтовая толща №8, скважина 14



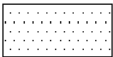


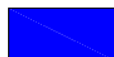
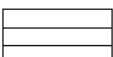
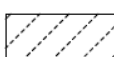
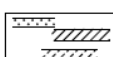
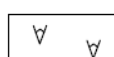
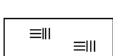
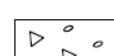
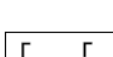
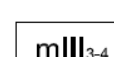

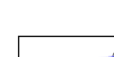
Грунтовая толща №15, скважина 1



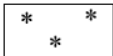






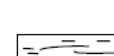
Грунтовая толща №10, скважина 16



Условные обозначения

	мерзлый песок		переслаивание мерзлых песка, супеси, суглинка
	мерзлый суглинок		лед
	мерзлая глина		мерзлая супесь
	прослой мерзлых песка, супеси, суглинка		ожелезнение
	включения органического вещества		включения гравия, дресвы, щебня
	газопроявления		геологический индекс
	льдиистость за счет видимых ледяных включений суглинистых грунтов		суммарная льдиистость песчаных грунтов

Криогенная текстура

	массивная		слоистая
	сетчатая		атакситовая
	слоистая		лед
	единичные шлиры льда		линзовидно-слоистая

Приложение 3. Условия залегания и характеристики пластовых льдов территории Харасавэйского месторождения по данным [88-112]

Номер скважины	Глубина залегания и мощность льда	Перекрывающие отложения	Подстилающие отложения	Строение пластовых льдов
Скв. 5	13,8-16,9 м m = 3,1 м	Пески мерзлые мощностью 1,6 м, выше – суглинки	Пески мерзлые мощностью 20 м	Ледогрунт с льдистостью от 50 до 80%, чередование прослоев льда толщиной 1-2 мм через 1 мм с прослоями пылеватого песка; в интервале 15,2-15,6 м слой льда
Скв. 7	7,8-10,2 м m=2,4 м	Суглинки мерзлые	Пески мерзлые мощностью 4,9 м, ниже – суглинки	Лед темно-серый, непрозрачный, редко полупрозрачный с льдистостью более 90% с прослоями прозрачного льда до 1 см
Скв. 11	9,9-12,2 м m=2,3 м	Суглинки мерзлые	Пески мерзлые мощностью 17,1 м	Лед серый, белый от полупрозрачного до прозрачного, чистый с незначительным количеством примесей грунта
Скв. с-7	8,0-14,2 м m=6,2 м	Пески мерзлые мощностью 3,6 м, выше – суглинки	Пески мерзлые мощностью 17,7 м	8,0-9,8 м (1,8 м) – лед мутный с незначительной примесью песка (3-5%) 9,8-10,4 м (0,6 м) – ледогрунт с льдистостью 80% 10,4-11,1 м (0,7 м) – песок мелкозернистый с прослоями торфа 1-5 мм 11,1-12,9 (1,8 м) – лед полупрозрачный с незначительной примесью песка с 12,7 м до 12,9 м лед матовый 12,9-13,7 м (0,8 м) – песок мелкий с прослоями торфа и льда 13,7-14,2 (0,5 м) – лед

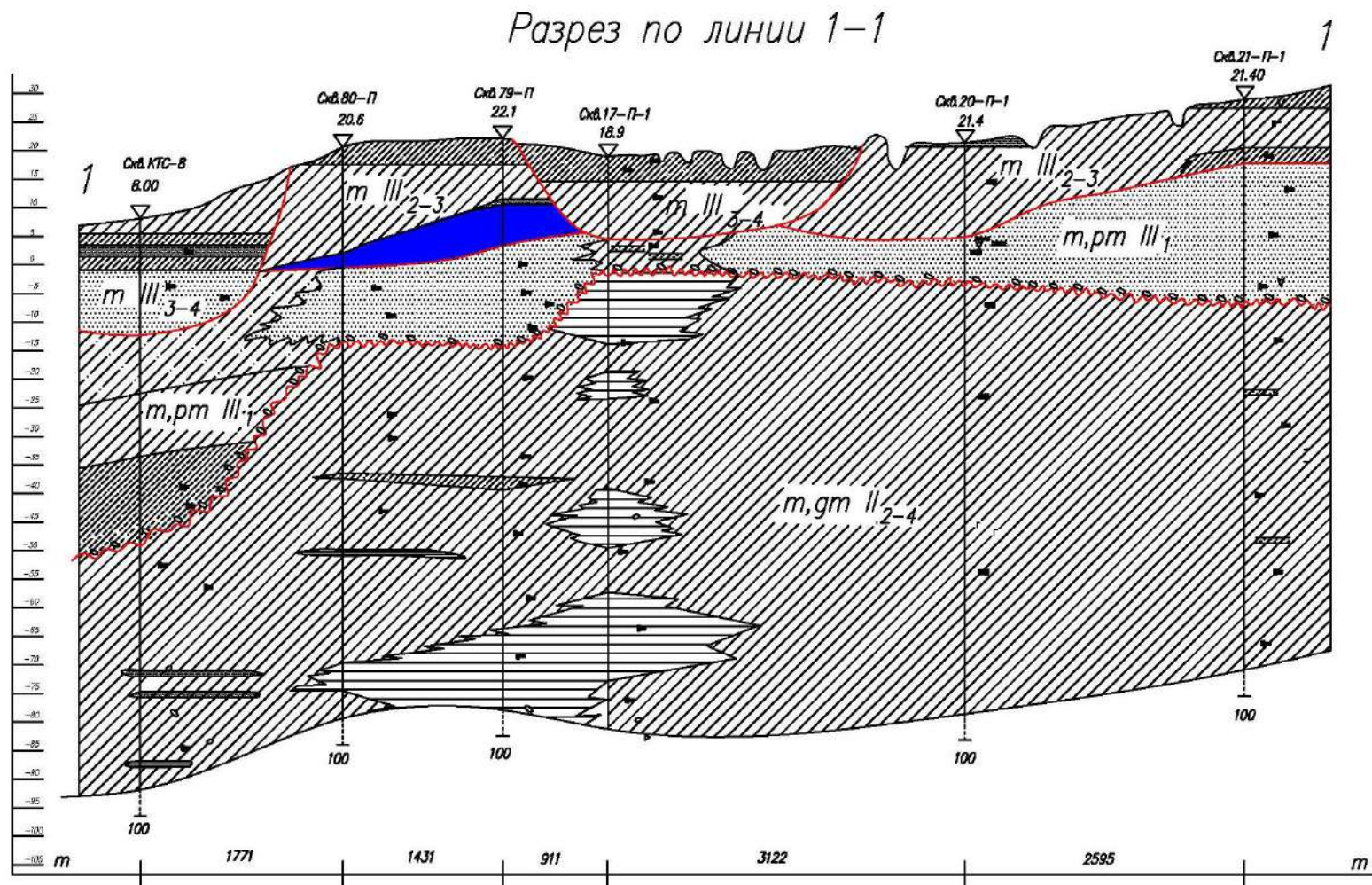
Скв. ю-6	12,8-17,9 m=5,1 м	Пески мерзлые мощностью 4,8 м, выше – суглинки	Пески мерзлые мощностью 16,1 м	12,8 м-13,5 (0,7 м) – лед мутный с незначительной примесью песчаного материала до 3% 13,5-14,0 (0,5 м) – лед чистый прозрачный 14,0-14,4 м (0,4 м) – лед непрозрачный с прослоями песка 1-3 мм 14,4-15,5 м (1,1 м) – лед мутный с содержанием грунта менее 2% 15,5-16,0 (0,5 м) – ледогрунт с прослоями мелкого песка 1-3 мм, в верхней части интервала 30 см пылеватого песка 16,0-17,9 м (1,9 м) – лед мутный местами прозрачный с незначительной примесью грунта до 3%
Скв. 79	11,3-18,5 m=7,2 м	Пески мерзлые мощностью 4 м	Пески мерзлые мощностью 23,1 м	11,3-11,8 м (0,5 м) – чередование чистого льда 10 см и ледогрунта 10 см с примесью песка с нечеткими границами 11,8-18,5 м (6,7 м) – лед прозрачный с редкими прослоями песка толщиной от 1 мм до 3-5 мм На глубине 18 м – чередование слоев песка и льда толщиной 1 мм.
Скв. 80	18,5-21,1 м m=2,6 м	Глина мерзлая	Пески мерзлые мощностью 13,2 м	18,5-19,5 м (1 м) – ледогрунт с косослоистым песком, льдистость 70-80% 19,5-21,1 м (1,6 м) – лед прозрачный без примесей, местами с участками молочно-белого льда.

Приложение 4. Показатели состава, строения и свойств мерзлых грунтов [110-112]

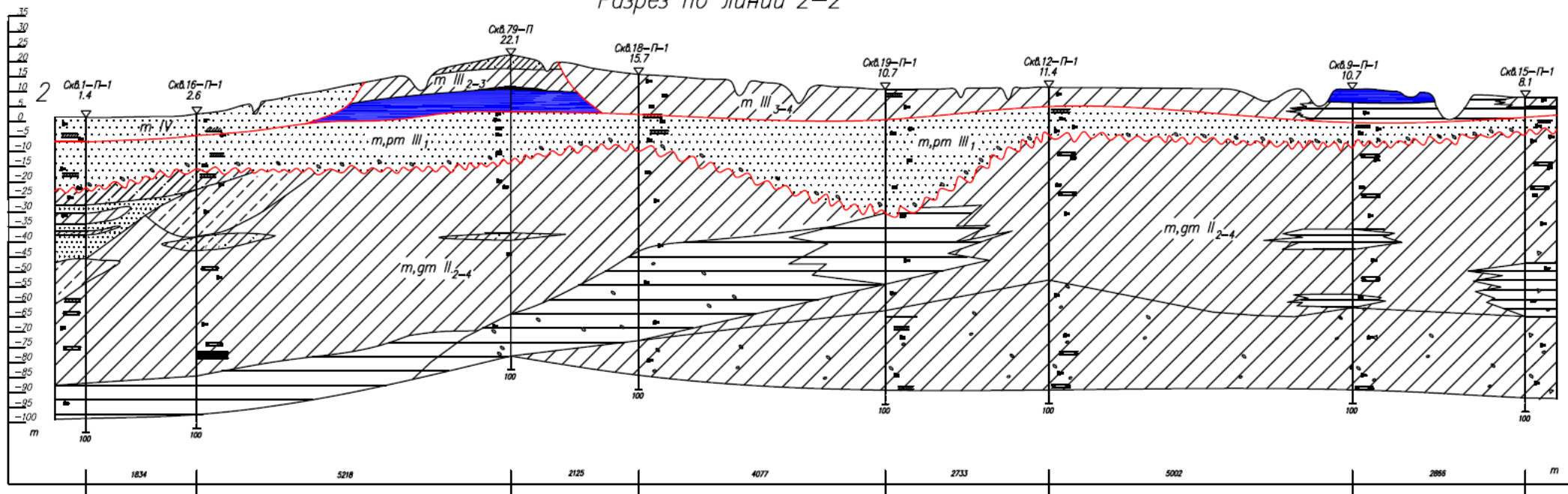
Номер образца	Интервал отбора, м	Геологический индекс	Наименование грунта	Среднее значение W_{tot} , д.ед.	Влажность на границе текучести W_L , д.ед.	Влажность на границе раскатывания W_p , д.ед.	Число пластиности I_p	Гранулометрический состав, %							Плотность твердых частиц грунта, г/см ³	Плотность грунта, г/см ³	Потери при прокаливании, д.ед.	Степень засоленности, %	Плотность скелета грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Пористость, %	Льдистость за счет видимых включений	Суммарная льдистость, д.ед.
								размер частиц, мм.															
								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									
ю-6-2	7-7,6	mIII ₂₋₃	суглинок тяжелый пылеватый средnezасоленный льдистый	0,54	0,35	0,19	15,9	0,0	0,0	1,7	12,3	31,3	15,9	38,8	2,69	1,67	0,04	0,50	0,89	1,49	60,0	0,25	0,48
с-4-2	6,9-7,5	mIII ₂₋₃	суглинок тяжелый пылеватый средnezасоленный слабольдистый	0,28	0,38	0,22	16,4	0,0	0,0	0,5	1,8	19,6	20,8	57,3	2,69	1,70	0,05	0,59	1,34	1,01	50,3	0,04	0,35
с-7-4	69,4-70	m,gmII ₂₋₄	суглинок тяжелый пылеватый сильнозасоленный нельдистый	0,30	0,33	0,20	13,1	0,0	0,0	0,2	1,5	36,4	21,0	40,9	2,68	1,85	0,06	0,90	1,42	0,89	47,1	0,00	0,38
с-2-6	39,4-40	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий пылеватый сильнозасоленный нельдистый	0,24	0,31	0,20	11,1	0,0	0,3	2,1	17,4	41,1	12,8	26,3	2,68	1,90	0,04	0,83	1,52	0,76	43,1	0,01	0,31
с-2-4	21,9-22,5	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабольдистый	0,25	-	-	-	0,4	1,0	37,8	52,9	7,9	-	-	2,65	1,91	0,01	0,09	1,53	0,73	42,1	0,00	0,40
с-4-5	18,8-19,4	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный льдистый	0,25	-	-	-	0,4	0,6	55,0	39,3	4,7	-	-	2,65	1,91	0,01	0,07	1,53	0,73	42,3	0,00	0,41
с-3-8	29,4-30	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабольдистый	0,23	-	-	-	0,1	0,2	45,0	51,5	3,2	-	-	2,66	1,93	0,00	0,12	1,56	0,70	41,2	0,00	0,38

с-3-4	14,7-15,3	m,pmIII ₁	песок пылеватый среднезасоленный слабодистый	0,24	-	-		1,0	1,0	34,1	48,3	15,6			2,64	1,87	0,01	0,18	1,51	0,75	42,9	0,00	0,37
ю-6-5	18,3-18,9	m,pmIII ₁	песок пылеватый среднезасоленный льдистый	0,26	-	-	-	0,6	0,6	26,5	59,9	12,4			2,65	1,90	0,01	0,17	1,53	0,73	42,2	0,00	0,41
п-13-1-1/1,2	3,4-4	mIII ₃₋₄	суглинок легкий пылеватый среднезасоленный льдистый	0,62	0,29	0,22	7,5	0,0	0,1	1,0	32,8	44,2	6,4	15,5	2,65	1,64	0,07	0,63	1,01	1,71	63,1	0,25	0,64
с-9-12	60-60,6	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий пылеватый сильнозасоленный нелдистый	0,27	0,30	0,21	8,9	0,0	0,0	0,5	9,9	43,5	15,4	30,7	2,68	1,92	0,05	1,04	1,52	0,77	43,4	0,00	0,33
с-4-11	50-50,6	m,gmII ₂₋₄	суглинок легкий песчанистый сильнозасоленный нелдистый	0,26	0,24	0,17	7,1	0,0	0,3	5,7	51,1	26,5	3,1	13,3	2,67	1,95	0,03	1,11	1,56	0,72	41,7	0,00	0,39
с-1-6	21,8-22,5	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный льдистый	0,27				0,0	0,4	82,8	11,0	5,8			2,65	1,82	0,01	0,09	1,44	0,84	45,7	0,00	0,41
с-3-8	29,4-30	m,pmIII ₁	песок пылеватый слабозасоленный слабодистый	0,23	-	-		0,1	0,2	45,0	51,5	3,2			2,66	1,93	0,00	0,12	1,56	0,70	41,2	0,00	0,38
П-13-2-6/1	21,9-22,5	m,pmIII ₁	песок пылеватый среднезасоленный слабодистый	0,24				0,0	0,0	68,0	28,4	3,6			2,67	1,92	0,00	0,24	1,56	0,71	41,5	0,00	0,39
п-13-1-4	14,7-15,3	m,pmIII ₁	песок пылеватый среднезасоленный слабодистый	0,25				0,0	0,0	21,8	72,3	5,9			2,67	1,90	0,01	0,22	1,52	0,76	43,2	0,00	0,37

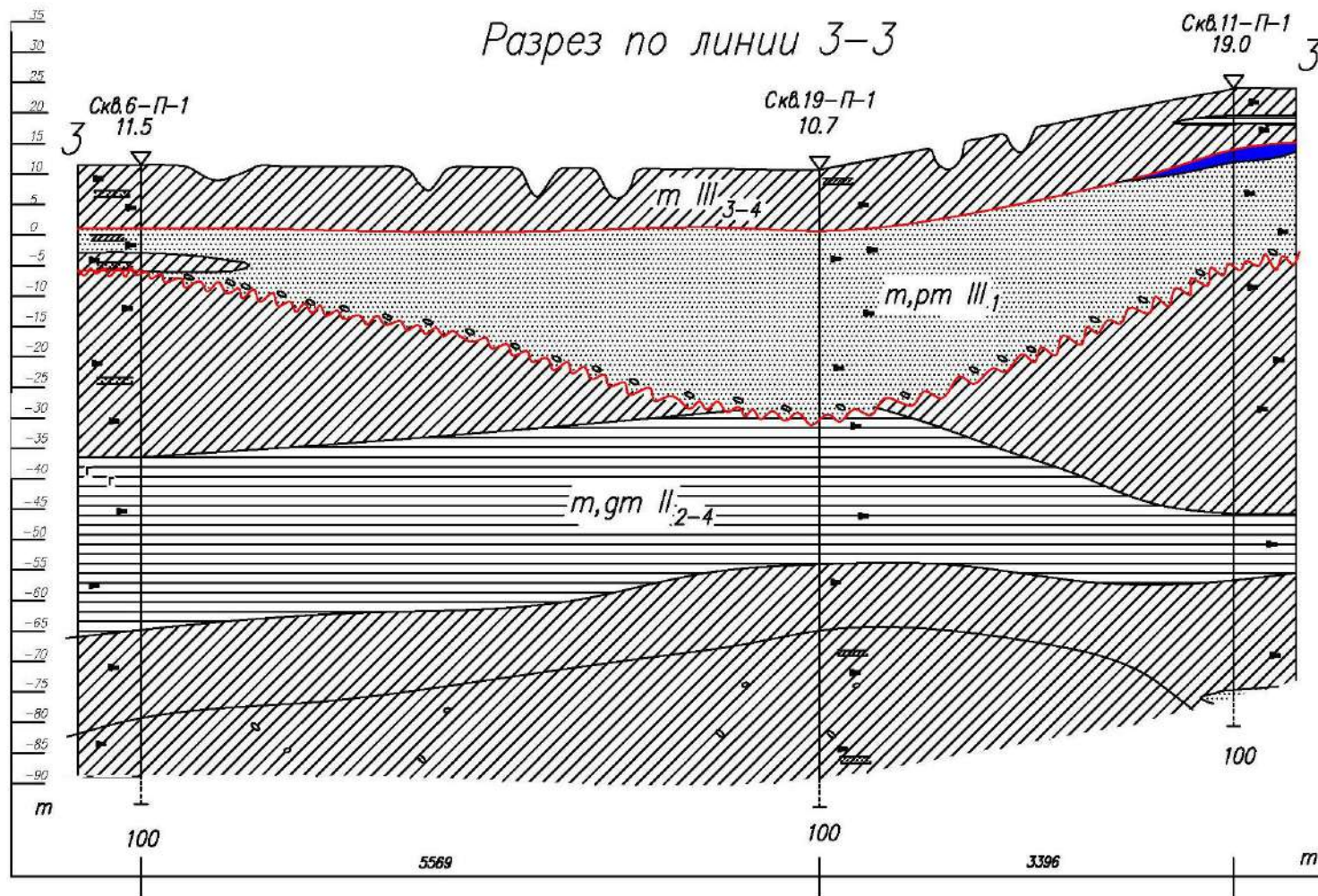
Приложение 5. Геологические разрезы Харасавэйского месторождения (линии разрезов приведены на рис. 35)



Разрез по линии 2-2



Масштаб
 М 1 : 25000 - по горизонтали
 М 1 : 500 - по вертикали

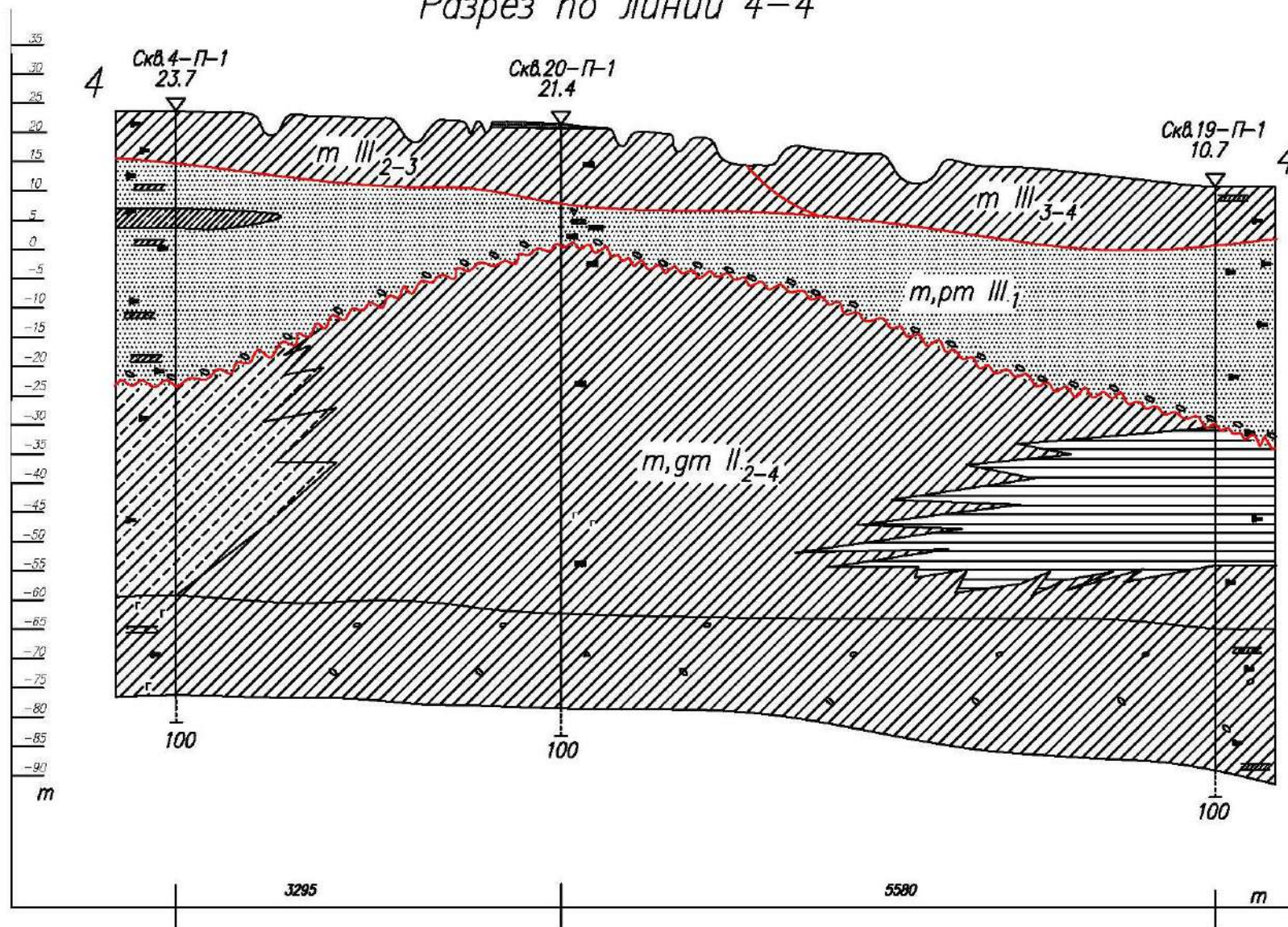


Масштаб

М 1 : 25000 – по горизонтали

М 1 : 500 – по вертикали

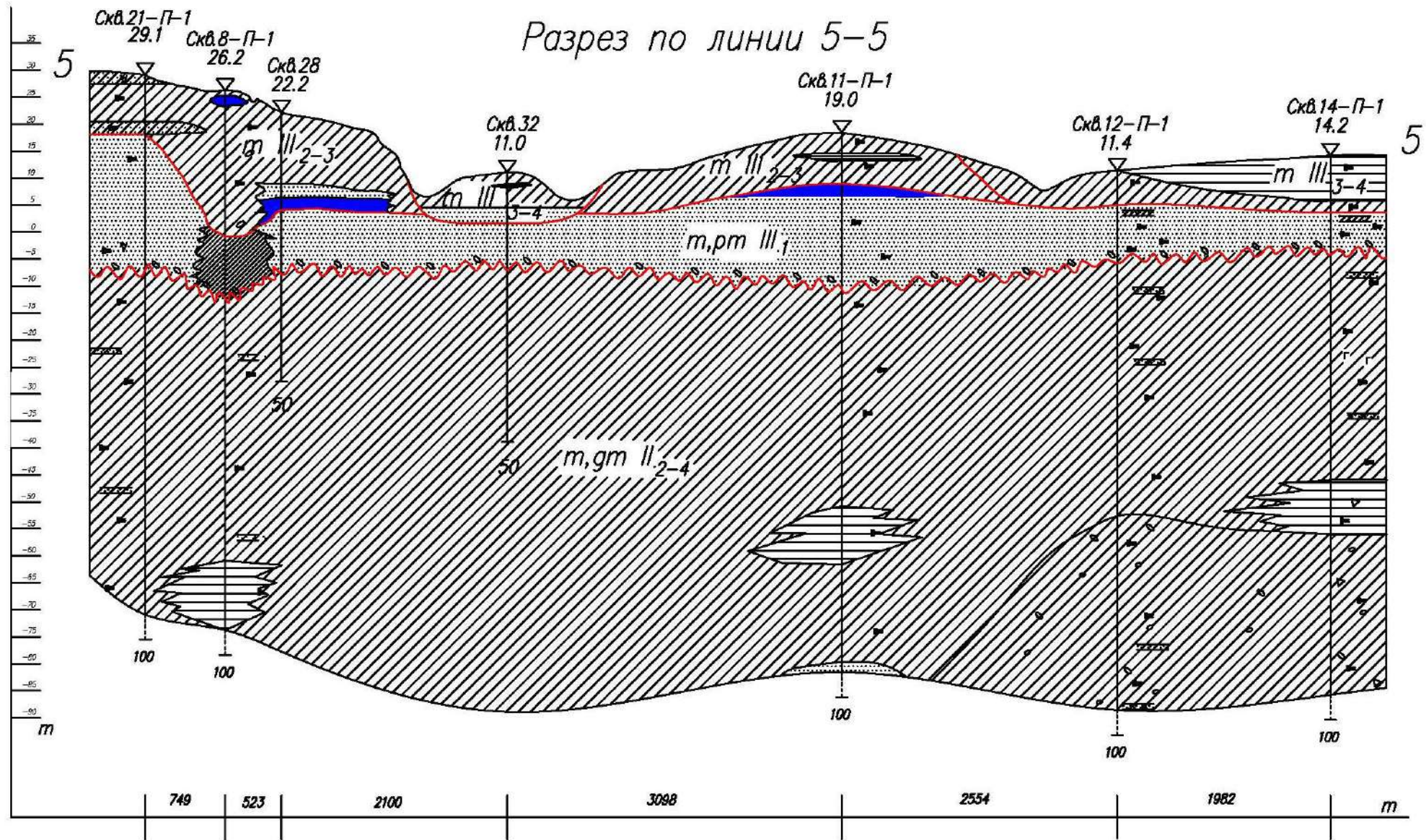
Разрез по линии 4-4



Масштаб

М 1 : 500 - по вертикали

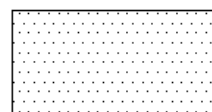
М 1 : 25000 - по горизонтали



Условные обозначения



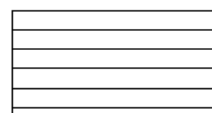
мерзлый суглинок



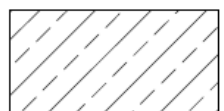
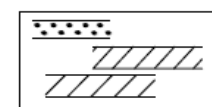
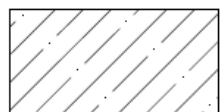
мерзлый песок



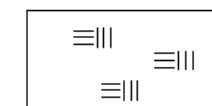
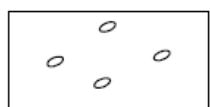
лед



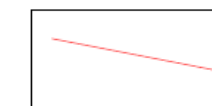
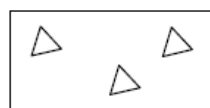
мерзлая глина

переслаивание
мерзлых
глинисто - песчаных
грунтовпрослой мерзлых песка,
суглинка, супеси

мерзлая супесь

включения
органического
вещества

включения гравия, гальки

границы
стратиграфических слоев

включения дресвы, щебня

Скв. 79-П

номер скважины

22.1

абсолютная отметка
устья скважины

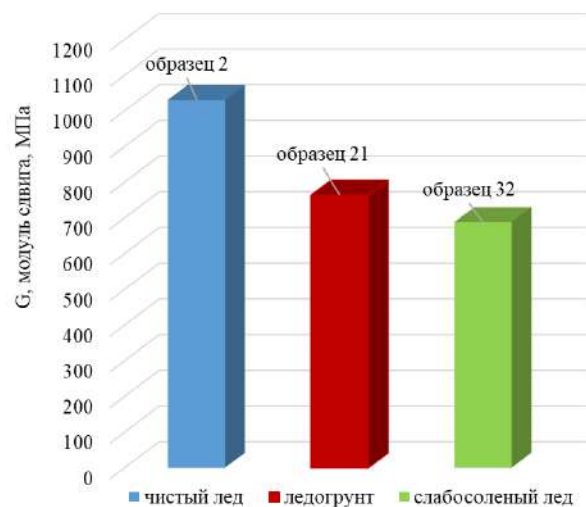
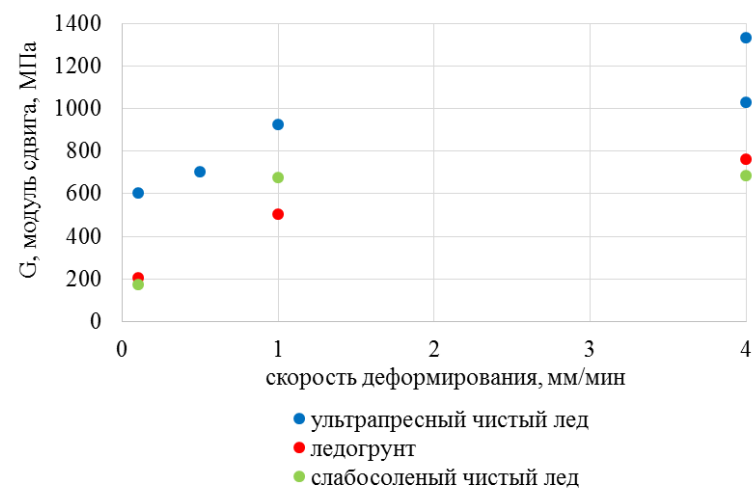
100

глубина скважины

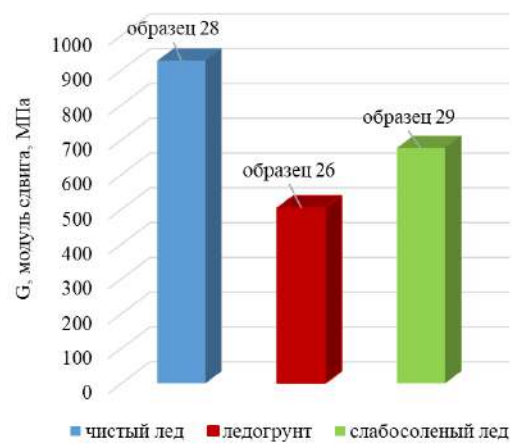
 $m, pmll_1$

геологический индекс

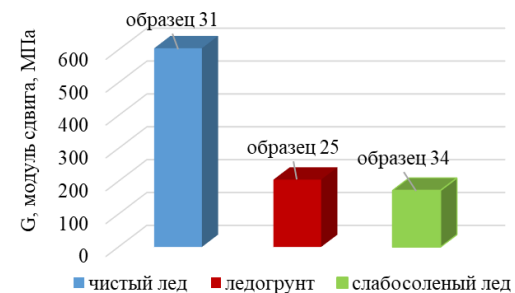
Приложение 6. Зависимость модуля сдвига льда от скорости деформирования по результатам испытаний трехосного сжатия



а) 4 мм/мин



б) 1 мм/мин



в) 0,1 мм/мин

Приложение 7. Состав отходов бурения, подлежащих захоронению в подземные резервуары на территории Харасавэйского месторождения [87]

Компоненты	Растворы буровые, прим. при бурении газовых и газоконденсатных скважин	Шламы буровые, обр. при добыче природного газа и газового конденсата	Воды сточные буровые
Вода	97,94%	34,81% (влажность)	98,832%
Нефтепродукты	0,246%	0,246%	0,41%
С (углерод)	-	1,45%	-
SO ₄ ²⁻ (сульфат-ион)	0,007%	0,761%	0,002%
Cl ¹⁻ (хлорид-ион)	0,369%	-	0,04%
PO ₄ ³⁻ (фосфат-ион)	-	0,014%	-
Al ₂ O ₃ (оксид алюминия)	0,223%	3,224%	0,083%
Ba (барий)	0,07%	0,202%	0,096%
FeO (оксид железа)	0,171%	3,73%	0,189%
K ₂ O (оксид калия)	0,022%	2,539%	0,008%
CaO (оксид кальция)	0,338%	1,094%	0,065%
SiO ₂ (диоксид кремния)	0,153%	47,8%	0,106%
MgO (оксид магния)	0,065%	0,71%	0,07%
MnO (оксид марганца)	0,003%	0,049%	0,007%
Na ₂ O (оксид натрия)	0,386%	2,81%	0,088%
Sr (стронций)	0,002%	0,014%	0,001%
Co (кобальт)	<0,001%	0,001%	-
TiO ₂ (диоксид титана)	0,002%	0,247%	0,001%
Cr (хром)	0,001%	0,002%	-
Zn (цинк)	0,001%	0,003%	-
Ni (никель)	<0,001%	0,001%	-
V (ванадий)	<0,001%	<0,002%	-
S (сера)	-	0,257%	-
хлориды	-	0,037%	-
оксид фосфора	-	-	0,001%
Суммарно: анионные ПАВ, фенолы летучие, оксид фосфора, ванадий, кобальт, медь, мышьяк, никель	0,001%	-	-
Суммарно: медь, свинец, мышьяк, ртуть, фенолы	-	0,001%	-
Суммарно: анионные ПАВ, фенолы летучие, ванадий, кобальт, медь, мышьяк, никель, свинец, хром, цинк	-	-	0,001%
Класс опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду	4 класс	4 класс	4 класс