

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научные руководители** – **Трофимов Виктор Титович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор
- Мирный Анатолий Юрьевич**,  
кандидат технических наук
- Официальные оппоненты** – **Фоменко Игорь Константинович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
ФГБОУ ВО «Российский государственный  
геологоразведочный университет имени Серго  
Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ),  
гидрогеологический факультет, профессор  
кафедры инженерной геологии
- Кудрявцев Сергей Анатольевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения», Институт  
транспортного строительства, заведующий  
кафедрой «Мосты, тоннели и подземные  
сооружения»
- Гребенец Валерий Иванович**,  
кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент, ФГБОУ ВО «Московский  
государственный университет имени  
М.В. Ломоносова», географический факультет,  
доцент кафедры криолитологии и гляциологии

Защита диссертации состоится 17 февраля 2023 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27), а также на сайтах:

<https://istina.msu.ru/dissertations/519274028/>

<https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.1/2372>

Автореферат разослан 12 января 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук

Н.А. Харитонова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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-теплого 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 такой 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 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; 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 В.Т. Трофимову за чуткое руководство, ценные советы и замечания, искреннюю поддержку и вдохновение для настоящей работы; научному руководителю к.т.н. А.Ю. Мирному за внимание, конструктивные советы и значительную помощь в ходе выполнения работы; к.г.-м.н. С.К. Николаевой; к.г.-м.н. Т.И. Аверкиной; к.г.н. Ю.Б. Бадю; д.г.-м.н., профессору Ю.К. Васильчуку; к.г.-м.н. В.З. Хилимонюк; к.г.-м.н. Р.Г. Мотенко; к.г.-м.н. Л.В. Емельяновой; к.г.-м.н. В.Е. Гагарину и Д.М. Фролову; к.т.н. В.А. Агеенко; к.т.н. С.Д. Сурина и к.т.н. О.И. Савичу; к.т.н. Ю.Л. Филимонову; к.г.-м.н. Ф.С. Карпенко; Э.С. Гречищевой.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### ГЛАВА 1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ ХАРАСАВЭЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В геоморфологическом отношении территория Харасавэйского месторождения характеризуется плоским рельефом, сформированным несколькими морскими террасами с абсолютными отметками от 5 м до 35 м. Террасированная поверхность месторождения местами прорезана речными долинами, оврагами и котловинами озер (Криосфера..., 2006).

В пределах Харасавэйского месторождения развита мощная толща мерзлых четвертичных отложений, в разрезе которой до исследуемой глубины 70 м выделено 9 геолого-генетических комплексов. Анализ их состава, строения, состояния и свойств проведен по опубликованным литературным данным и материалам инженерно-геологических изысканий около 105 скважин.

Отложения территории Харасавэйского месторождения в основном представлены переслаиванием мерзлых песчаных, суглинистых, глинистых и супесчаных грунтов с субгоризонтальным залеганием. Большую часть грунтовых толщ до исследуемой глубины 70 м составляют: среднеплейстоценовые отложения салехардской свиты, верхнеплейстоценовые отложения казанцевской свиты, верхнеплейстоцен-голоценовые отложения III-I морских террас. Показатели их состава, строения, свойств и состояния изменяются в широких пределах и имеют высокую зависимость от льдистости грунтов, степени их засоленности, а также криогенного строения. Отложения салехардской свиты чаще всего представлены эпигенетическими суглинисто-глинистыми грунтами с суммарным содержанием солей в среднем более 0,9%. Для них характерна массивная криогенная текстура со средней суммарной льдистостью 25-29% и льдистостью за счет ледяных включений менее 3%. Отложения казанцевской свиты имеют более низкую дисперсность и чаще представлены мерзлыми песчаными грунтами с массивной криогенной текстурой. Регрессивная пачка казанцевской свиты сложена сингенетическими мерзлыми грунтами, а подстилающая ее – эпигенетическими разностями. Суммарное содержание водорастворимых солей здесь в среднем изменяется от 0,1 до 0,2%. Суммарная льдистость эпигенетических песчаных грунтов казанцевской свиты составляет в среднем около 40%, а у сингенетических несколько выше. Мощность песчаных мерзлых грунтов казанцевской свиты доходит до 10-25 м и более, что делает их пригодными для строительства подземных резервуаров. Отложения III-I морских террас схожи и представлены преимущественно сингенетическими мерзлыми суглинисто-глинистыми грунтами с суммарным содержанием солей в среднем 0,5% и суммарной льдистостью 20-60%, местами более. Для них

характерны линзовидно-слоистые, слоистые, слоисто-сетчатые, атакситовые и шлировые криотекстуры (Трофимов В.Т. и др., 1975), (Криосфера..., 2006).

Территория Харасавэйского месторождения относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов, мощность которых зависит от возраста и генезиса геоморфологического уровня и изменяется от первых метров до 180 м. В центральных частях плоских морских террас среднегодовая температура грунтов до глубины 100 м колеблется в среднем от -4 до -6 °С (Криосфера..., 2006).

Одной из важнейших особенностей криогенного строения многолетнемерзлых грунтовых толщ исследуемой территории, оказывающей влияние на строительство подземных резервуаров, является наличие в них крупных пластовых льдов. Выявлено, что пластовые льды чаще встречаются в отложениях III-I морских террас и залегают на глубинах до 15-25 м. Их мощность в среднем колеблется от 2 до 4 м. Химический состав льдов преимущественно относится к ультрапресному хлоридно-натриевому типу засоления с минерализацией от 10 до 200 мг/л, реже более. По результатам анализа фактического материала выявлено сложное строение пластовых залежей льда – встречаются как 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 (Криосфера..., 2006).

В грунтовых толщах территории встречаются высокоминерализованные межмерзлотные воды, которые являются серьезным препятствием для сооружения подземных резервуаров. Они преимущественно залегают в прибрежных частях и молодых элементах рельефа территории в песчаных грунтах до глубины 10 м, но иногда на глубинах 50 м и ниже. Их температура может достигать -6÷-8 °С, а минерализация 150 г/л и выше. Воды характеризуются хлоридно-натриевым составом и зачастую обладают напором от 1 до 3 м.

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

В целом инженерно-геологические условия территории Харасавэйского месторождения характеризуются высокой сложностью для целей строительства подземных резервуаров. Главным образом, она обосновывается изменчивостью состава и строения грунтовых толщ, что проявляется в различной льдистости и степени засоленности мерзлых грунтов, наличии высокоминерализованных вод и мощных пластовых льдов, а также необходимостью выбора строительных площадок с плоским рельефом без развития

опасных геологических процессов. Строительство подземных резервуаров для захоронения отходов бурения здесь возможно, однако выбор места их сооружения следует проводить путем предварительного исследования территории и систематизации грунтовых толщ месторождения с выделением среди них благоприятных.

## **ГЛАВА 2. ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ ТЕРРИТОРИИ ХАРАСАВЭЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Границы грунтовых толщ Харасавэйского месторождения установлены по зоне влияния от строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения на основании численных расчетов модельного подземного резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup>. За верхнюю границу грунтовой толщи принята земная поверхность, латеральные границы не учитывались. Нижняя граница грунтовой толщи установлена по зоне влияния от изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовой толщи в результате формирования в ней незакрепленной выработки и теплового воздействия захораниваемых в подземный резервуар отходов бурения. Прогноз изменения НДС выполнен в программном комплексе Simulia Abaqus методом конечных элементов, выделена зона с перемещением мерзлого грунта более 0,05 м. Прогноз теплового воздействия отходов бурения проведен в программном комплексе Heat методом конечных разностей, за зону влияния принята область с изменением естественной температуры грунта не менее чем на 0,5 °С. По результатам прогноза изменения НДС грунтовой толщи глубина влияния от формирования подземного резервуара составила 64 м от земной поверхности, вследствие теплового воздействия захораниваемых отходов бурения – 70 м. Нижняя граница грунтовой толщи принята по максимальному полученному значению и назначена на глубине 70 м.

Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения выполнена по данным 30 скважин, расположенных по территории всего Харасавэйского месторождения. Их бурение было проведено в пределах площадей с плоским рельефом и отсутствием проявления опасных геологических процессов. В связи с этим, все выделенные грунтовые толщи с точки зрения поверхностных условий подходили для целей строительства подземных резервуаров. При типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения использовано построение двухрядного, перекрестного типа (таблицы-матрицы), приняты две группы признаков, отражающие состав, строение и современное состояние грунтовых толщ и оказывающие наибольшее влияние на НДС многолетнемерзлой грунтовой толщи (рис. 1). В первую группу признаков вошли показатели состава и строения грунтовых толщ: количество и характер классов грунтов; число слоев и процентное соотношение песчаных и глинистых грунтов в толще; глубина расположения подошвы песчаного слоя, в случае его

наличия; содержание водорастворимых солей в разрезе толщи. Во вторую группу признаков вошли особенности состояния грунтовой толщи, характеризующиеся фазовым состоянием воды в грунтах, среднегодовой температурой и степенью льдистости (увлажненности) грунтов толщи. При наличии в грунтовой толще пластового льда мощностью более 0,5 м она была отнесена к отдельному типу путем прибавления характеристики «с включением сильнольдистых». Грунтовые толщи с включением высокоминерализованных вод выделены в отдельный тип с добавлением слов «с включением сильноувлажненных». Всего выделено 147 типов грунтовых толщ, из которых на Харасавэйском месторождении действительно встречено 20 типов, они отмечены нумерацией на рис. 1.

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. В качестве благоприятных грунтовых толщ для строительства подземных резервуаров принимались содержащие: песчаный пласт мощностью более 10 м на глубине не менее 10 м от земной поверхности, мерзлые песчаные грунты с суммарной льдистостью более 20%; не содержащие сильноувлажненных грунтов. По результатам подразделения выделены 7 типов грунтовых толщ с благоприятными и 13 типов с неблагоприятными условиями для сооружения подземных резервуаров (рис. 2, 3).

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	
Сложенные грунтами одного класса	Однородные	глинистые	сильнозасоленные		1					
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных				2			
			переслаивание средне- и сильнозасоленных	3	4					
	Дисперсные	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			

Рис. 1. Типизация грунтовых толщ для целей строительства подземных резервуаров под захоронение отходов бурения

*Примечание 1:* а – преимущественно нельдистые; б – слабо- и льдистые на нельдистых; в – слабо- и льдистые с включением сильнольдистых на нельдистых; г – переслаивание слабо- и нельдистых с включением сильноувлажненных.

*Примечание 2:* нумерацией отмечены типы грунтовых толщ, встреченные на территории Харасавэйского месторождения; зеленым цветом изображены благоприятные грунтовые толщи для строительства подземных резервуаров, красным – неблагоприятные.

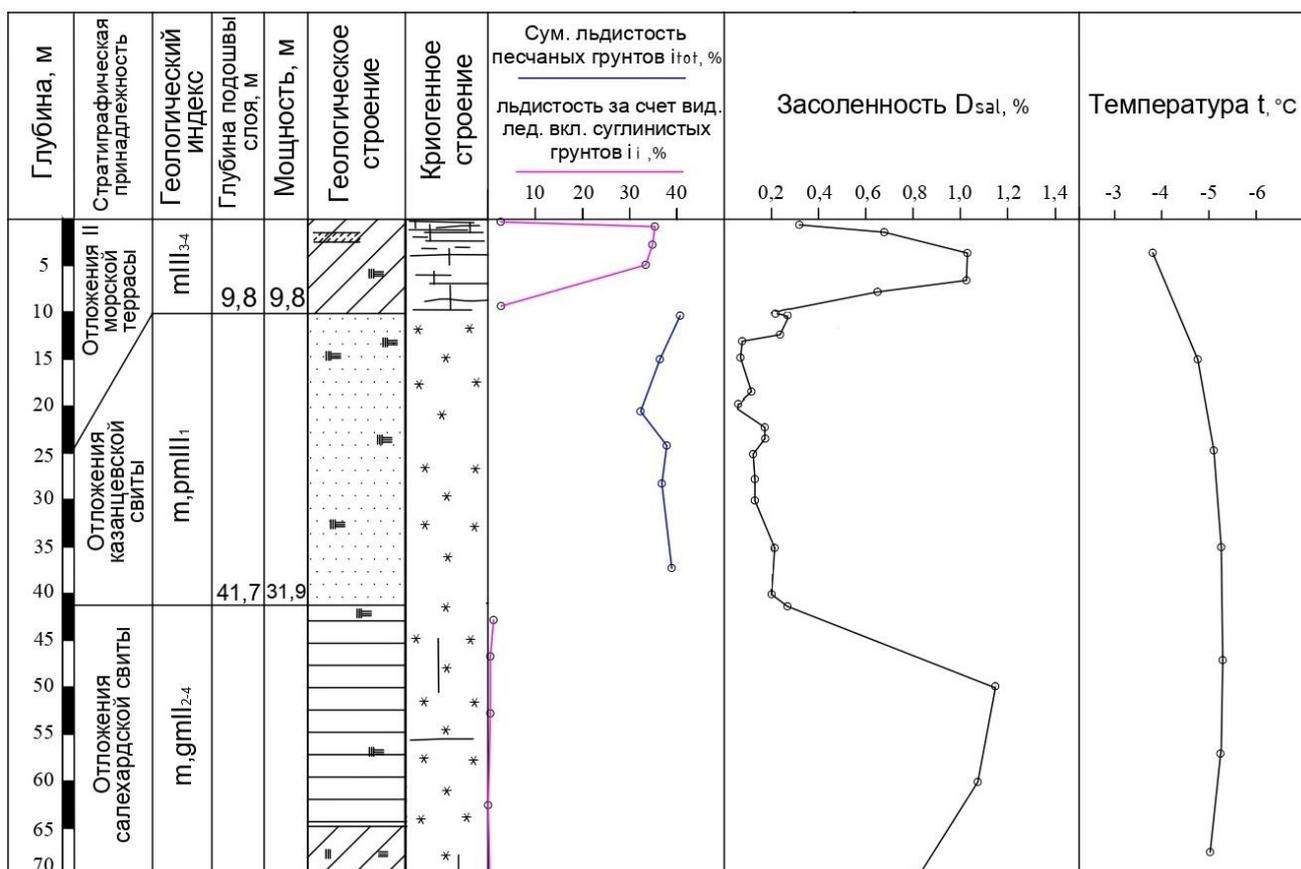


Рис. 2. Пример грунтовой толщи № 16 с благоприятными условиями для строительства подземных резервуаров (см. рис. 1)

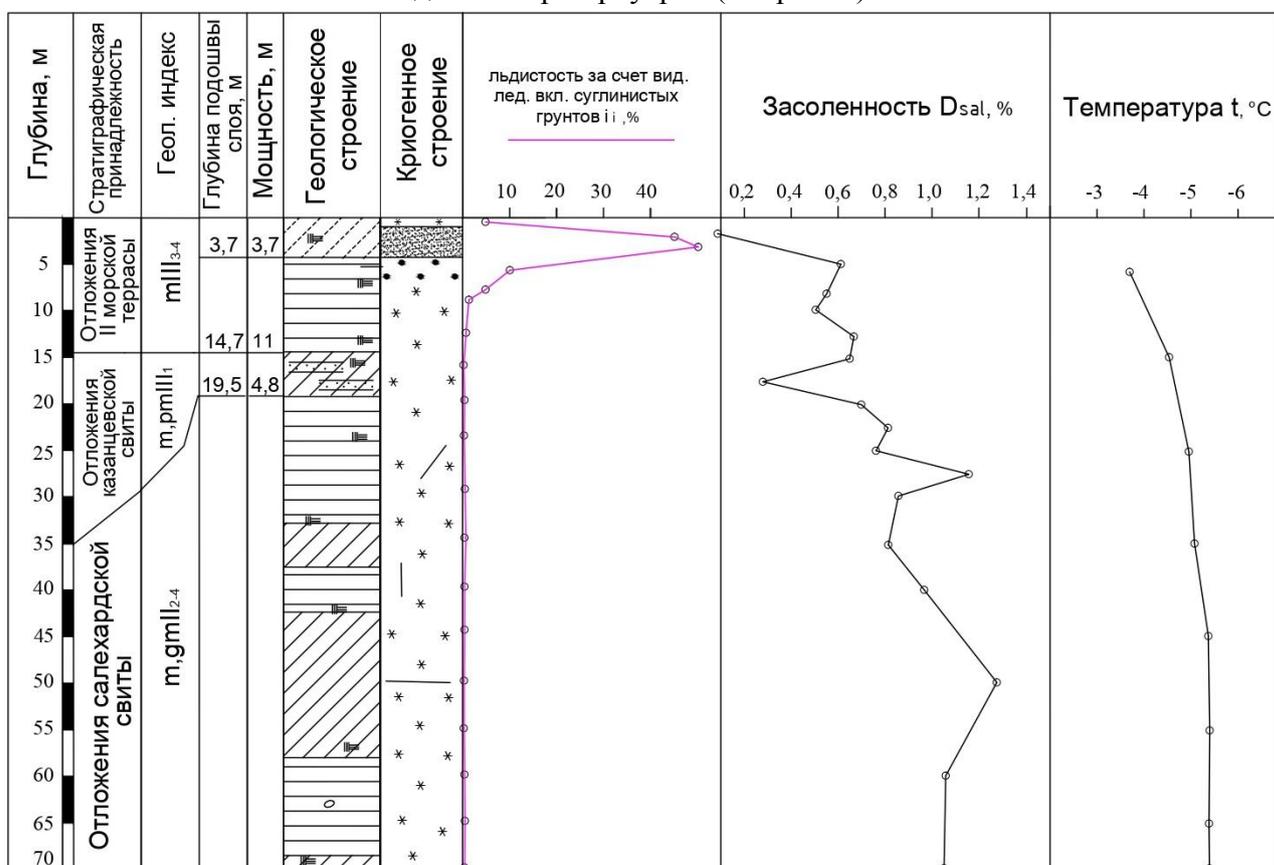


Рис. 3. Пример грунтовой толщи № 3 с неблагоприятными условиями для строительства подземных резервуаров (см. рис. 1)

### **ГЛАВА 3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ, СЛАГАЮЩИХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ ХАРАСАВЭЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Для выполнения прогноза изменения НДС благоприятных грунтовых толщ определены показатели физико-механических свойств наиболее распространенных слагающих их грунтов (таблица) на основании испытаний 17 образцов песчаных и суглинистых грунтов естественного сложения и 26 модельных образцов льда, изготовленных методом послойного намораживания с учетом особенностей состава и строения пластовых льдов Харасавэйского месторождения.

Определение показателей физико-механических свойств выполнено методом трехосного сжатия по двух схемам нагружения – быстрой кинематической и длительной статической. Быстрые кинематические испытания проведены при разных скоростях деформирования и направлены на изучение механического поведения мерзлых грунтов при условно-мгновенном нагружении. Длительные статические испытания были направлены на изучение ползучести мерзлых грунтов и проведены ступенчатым нагружением. В качестве условного предела длительной прочности льда принималась величина девиатора напряжений, после превышения которой фиксировалось вязкопластическое течение со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч. Все испытания трехосного сжатия проведены при температуре -5 °С.

На основании результатов испытаний трехосного сжатия (таблица) могут быть сделаны следующие выводы. Мерзлые суглинки второй, третьей морских террас и салехардской свиты обладают низкой условно-мгновенной сдвиговой прочностью. Мерзлые пески казанцевской свиты имеют более 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, переход в стадию незатухающей ползучести у средnezасоленных мерзлых песчаных грунтов происходит при девиаторе напряжений в среднем меньшем на 20-25%, чем это наблюдается у слабозасоленных разностей.

Длительные статические испытания трех типов льда показали, что установившееся течение со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч начиналось при малых значениях девиатора напряжений – от 0,75 до 1,2 МПа. Дальнейшее увеличение напряжения в более чем 90% привело к деформированию с еще большей, но постоянной скоростью продольной деформации на ступени. Во всех длительных испытаниях течение льда проходило без

визуального нарушения его сплошности с сохранением прозрачности и, в некоторых случаях, со значительным изменением формы (рис. 4).

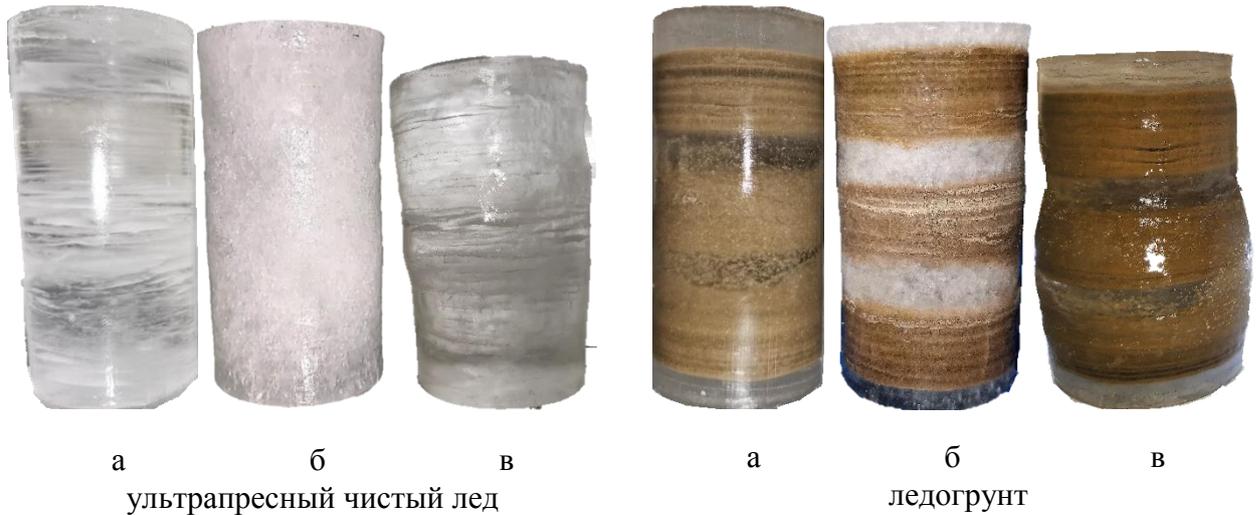


Рис. 4. Образцы льда: а – до проведения испытаний трехосного сжатия; б – после быстрого кинематического испытания со скоростью деформирования 4 мм/мин при  $\sigma_3 = 0,3$  МПа; в – после длительного статического испытания при  $\sigma_3 = 0,5$  МПа

По результатам длительных испытаний обнаружено, что показатели физико-механических свойств слабосоленого чистого льда отличались не более чем на 6-15% от ультрапресного чистого льда. В связи с редкой распространенностью слабосоленого чистого льда в грунтовых толщах территории и схожести его реологического поведения с ультрапресным чистым льдом принято не учитывать его в дальнейших численных расчетах.

Испытания трехосного сжатия ультрапресного чистого льда и ледогрунта, напротив, показали существенную разницу в механическом поведении под нагрузкой. По результатам быстрых испытаний сдвиговая прочность ледогрунта оказалась выше на 20-25%, чем у ультрапресного чистого льда, а сдвиговая жесткость на – 25-65%. Однако по результатам длительных испытаний установившееся течение у ледогрунта со скоростью продольной деформации 0,01 мм/ч начиналось при девиаторе напряжений в среднем большем на 25-30%, чем у ультрапресного чистого льда. По результатам всех испытаний при схожих/одинаковых девиаторах напряжений у ледогрунта стадия установившейся ползучести протекала с меньшей скоростью продольной деформации. Кроме этого, при испытании ультрапресного чистого льда произошел переход к прогрессирующей ползучести, у ледогрунта при таком же и даже большем уровне напряжений наблюдалось установившееся течение вплоть до достижения практически 20% деформации образца. Все результаты длительных статических испытаний показали, что при наличии во льду примесей снижается степень проявления реологических свойств (рис. 5).

Таблица. Некоторые показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов, в том числе льда, по результатам испытаний трехосного сжатия, используемые в качестве входных параметров для расширенной модели Друкера-Прагера при численном моделировании изменения НДС грунтовых толщ в результате сооружения в них подземных резервуаров

Наименование мерзлого грунта	№ ИГЭ	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	Быстрые кинематические испытания							Длительные статические испытания								
			$E_0$ МПа	$\nu$	$\psi, ^\circ$	Предел текучести		Предел прочности		$\sigma_3$ МПа	$\sigma_\infty$ , МПа		$\Delta\sigma$ , МПа	$t$ , ч	$\beta, ^\circ$	А	m	n
						$q$ , МПа	$\gamma$ , д.ед	$q$ , МПа	$\gamma$ , д.ед		$q$ , МПа	$\sigma_3$ , МПа						
плотность	модуль общей деформации	коэффициент относительного поперечного расширения	угол дилатансии	девиатор напряжений	отн. деформация сдвига	девиатор напряжений	отн. деформация сдвига	всестороннее давление	девиатор напряжений	всестороннее давление	шаг увеличения вертикальной нагрузки	время выдержки ступени нагрузки	угол наклона поверхности текучести в расширенной модели Друкера-Прагера	параметры ползучести в расширенной модели Друкера-Прагера				
суглинок среднезасоленный слабо- и льдистый	1	1,7	24	0,42	0	0,25	0	1,9	0,13	0,2	0,7	0,2	0,1	24	39	4,2*10 <sup>-9</sup>	-0,56	1,15
						0,92	0,4	0,12										
суглинок сильнозасоленный нельдистый	3	1,9	18,5	0,43	0	0,1	0	1,48	0,13	0,2	0,8	0,2	0,2	24	50	5,6*10 <sup>-9</sup>	-0,74	1,03
						1,2	0,4	0,3										
песок слабозасоленный слабо- и льдистый	2а	1,9	193	0,29	0	1,82	0	4,75	0,03	0,2	2	0,2	0,3	24	41	1,1*10 <sup>-11</sup>	-0,91	1,00
						2,25	0,4	0,35										
песок среднезасоленный слабо- и льдистый	2б	1,87	108	0,27	0	1,45	0	4,6	0,06	0,2	1,5	0,2	0,3	24	45	1,6*10 <sup>-10</sup>	-0,5	1,05
						1,8	0,4	0,3										
ультрапресный чистый лед	4а	0,9	402	0,35	0	5,08	0	5,76	0,01	0,4	0,75	0,5	0,25	18	19	2,7*10 <sup>-6</sup>	-0,26	1,14
						0,6	0,3	0,15										
						0,6	0,1	0,1										
ледогрунт (20% примеси пылеватого песка)	4б	1,07	230	0,37	0	3,38	0	4,2	0,01	0,4	1	0,5	0,2	18	23	5,5*10 <sup>-7</sup>	-0,38	1,12
						0,9	0,3	0,15										
						0,8	0,1	0,1										
слабосоленный чистый лед (соленость 820 мг/л)	-	0,9	236	0,31	0	4,9	0	5,58	0,01	0,4	0,8	0,5	0,07	18	17	2,3*10 <sup>-6</sup>	-0,28	1,18
						0,67	0,3	0,07										
											0,67	0,1	0,07					

Примечание 1: результаты быстрых кинематических испытаний приведены при скорости деформирования 1 мм/мин.

Примечание 2: номер ИГЭ приведен, согласно расчетным схемам на рис. 6.

Примечание 2.  $\sigma_\infty$ , МПа – предел длительной прочности (для льда условный).

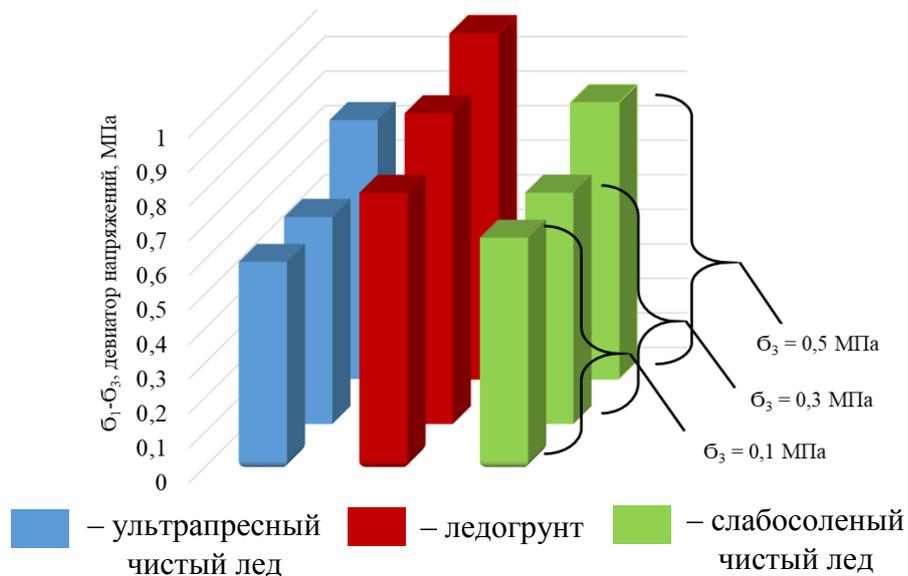


Рис. 5. Условный предел длительной прочности трех типов льда при разных всесторонних давлениях по результатам длительных статических испытаний трехосного сжатия

#### **ГЛАВА 4. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВЫХ ТОЛЩ ПОД ВЛИЯНИЕМ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ**

Предложенная методика прогноза изменения НДС грунтовых толщ в результате строительства подземных резервуаров основана на оценке критериев достижения первого и второго предельных состояний. Первое предельное состояние (наступление аварийной ситуации) предложено оценивать по расчетному размеру пластических зон во вмещающем массиве. Второе предельное состояние (эксплуатационную пригодность) предложено оценивать по перемещению свода резервуара, оседанию земной поверхности над ним и уменьшению полезного объема с течением времени.

Прогноз изменения НДС грунтовых толщ (см. рис. 1) в результате сооружения подземных резервуаров выполнен методом конечных элементов в программном комплексе Simulia Abaqus в осесимметричной постановке. Противодействие при расчете не учитывалось – принято, что резервуар находится в пустом состоянии в течение 3 лет. Для описания механического поведения грунтовых толщ использована упруго-вязкопластическая расширенная модель Друкера-Прагера. Каждая грунтовая толща подразделена на шесть инженерно-геологических элементов, отражающих однородные в генетико-возрастном и литолого-петрографическом отношении наиболее часто встречающиеся грунты (таблица, рис. 6). В грунтовые толщи был вписан модельный подземный резервуар оптимальной формы с соотношением высоты к его максимальному радиусу равному 2,38 и объемом 2123 м<sup>3</sup>.

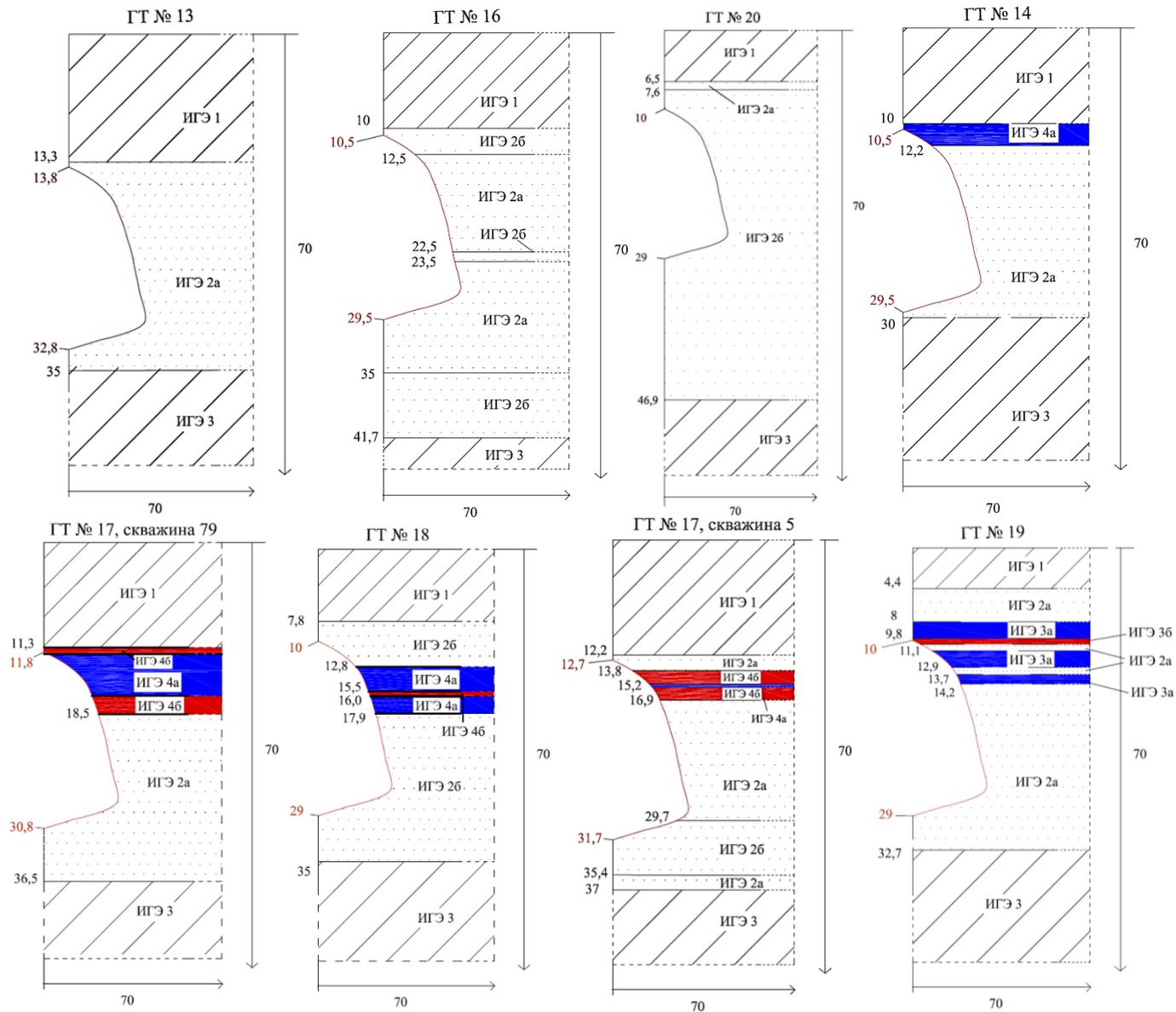


Рис. 6. Расчетные схемы благоприятных грунтовых толщ с размещением в них модельного подземного резервуара (используемые в численных расчетах показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов приведены в таблице)

На рис. 6 показаны расчетные схемы грунтовых толщ, в которых резервуар расположен полностью в мерзлых песчаных грунтах (первая группа) и частично в пластовых льдах (вторая группа).

Результаты численных расчетов показали, что сооружение подземных резервуаров в грунтовых толщах первой группы № 13, 16, 20, вне зависимости от засоленности слагающих их мерзлых песков, 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%).

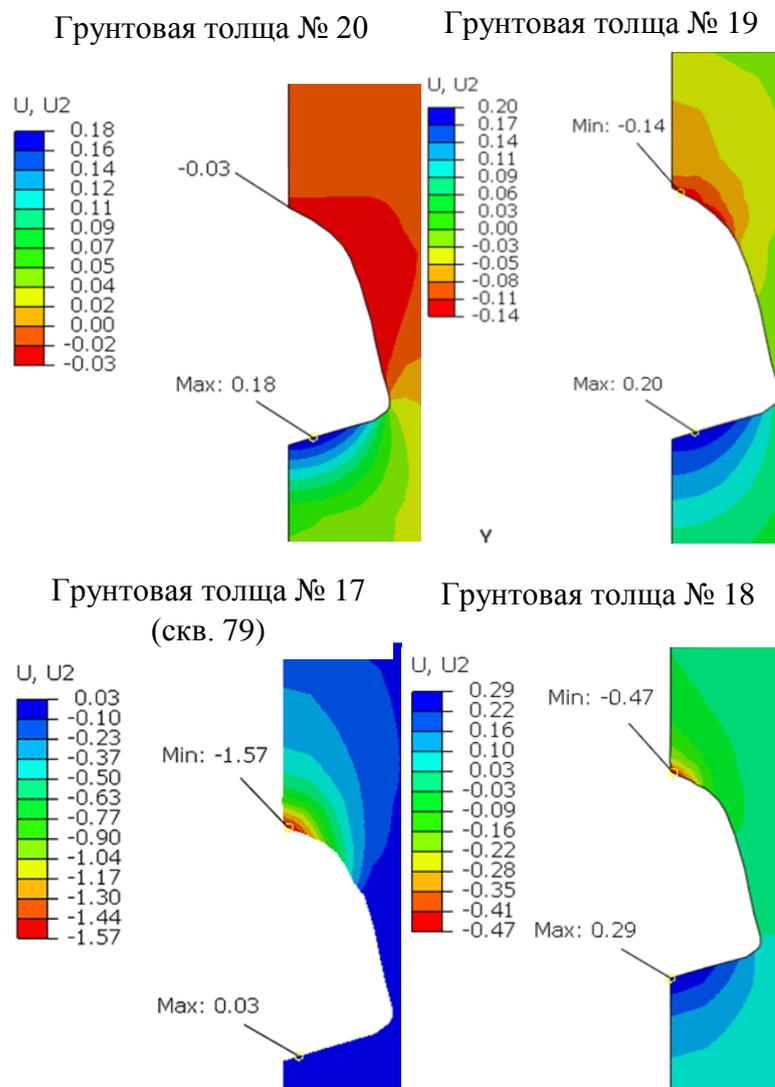


Рис. 7. Перемещение мерзлых грунтов в окрестности модельного подземного резервуара спустя три года в грунтовых толщах Харасавэйского месторождения

Сооружение подземных резервуаров в грунтовых толщах с пластовыми льдами № 14, 17, 18, 19 не приведет к развитию пластических зон. При строительстве 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 второй группы (см. рис. 7). Сооружение подземного резервуара в грунтовых толщах с мощными чистыми льдами с малым количеством минеральных примесей спровоцирует большее падение объема емкости. Так, при размещении подземного резервуара в грунтовой толще № 17 (скв.79) снижение объема за три года составит около 6,5% (136 м<sup>3</sup>). 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 м<sup>3</sup>), (рис. 8). Изменение формы подземного резервуара и оседание земной поверхности над ним будут максимальны в случае залегания мощного чистого льда в своде подземного резервуара. Так, прогиб свода подземного резервуара в грунтовой толще № 17 (скв.79) через три года составит 1,6 м, а оседание земной поверхности над ним достигнет 16 см.

По результатам численных расчетов предложена схема заполнения подземных резервуаров отходами бурения, позволяющая сократить негативные последствия изменения НДС грунтовых толщ Харасавэйского месторождения.

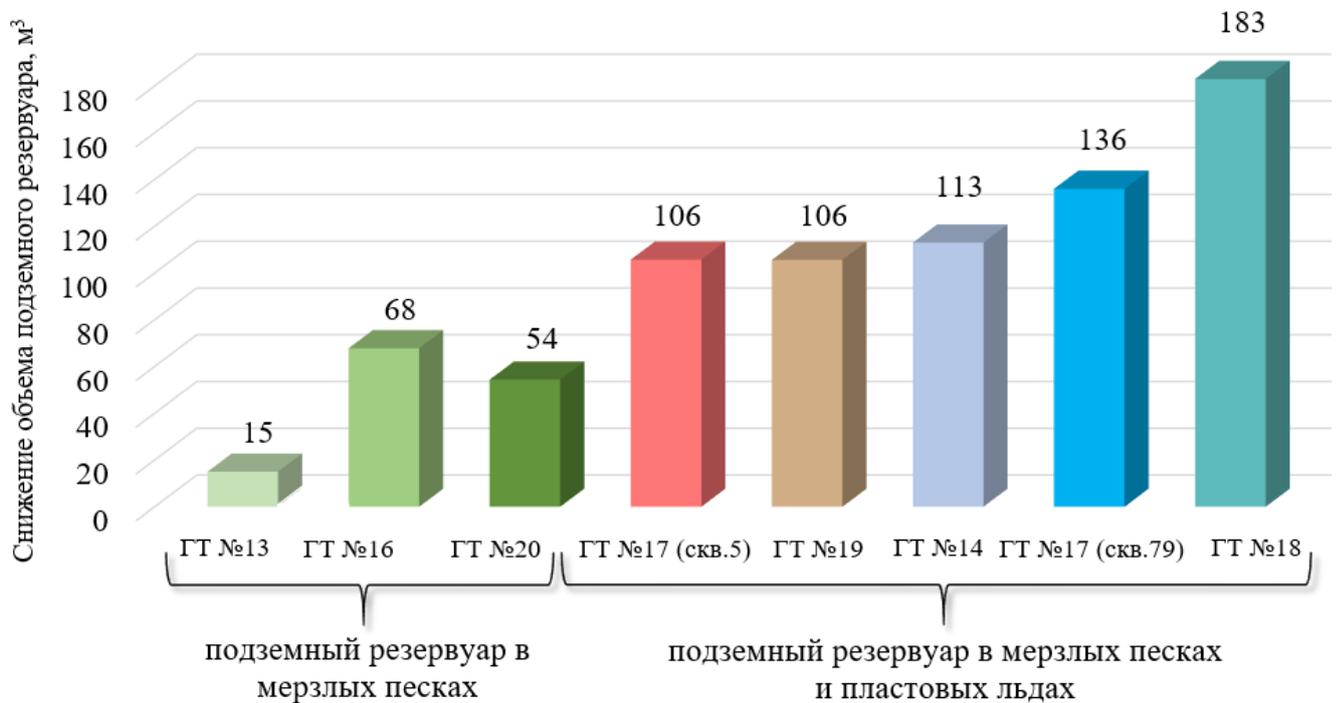


Рис. 8. Снижение объема модельного подземного резервуара спустя три года нахождения в пустом состоянии в благоприятных грунтовых толщах Харасавэйского месторождения

## ОБЩИЕ 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 толщ 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 толщ 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 среднезасоленными 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 среднезасоленными 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.

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7, опубликованные автором по теме диссертации**

1. Мосина А.С., Николаева С.К., Скворцов А.А. 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) // Инженерная геология. – 2020. – № 2. – С. 68-81. Импакт-фактор РИНЦ 2020: 0,577. Объем публикации: 1,75 п.л., объем вклада соискателя: 1,3 п.л.

2. Сурин С.Д., Мосина А.С. Методика формообразования подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 3-1. – С. 252-267. Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,629. Объем публикации: 1 п.л. объем вклада соискателя: 0,4 п.л.

3. Мосина А.С., Мирный А.Ю., Скворцов А.А., Сурин С.Д. Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 3-1. – С. 223-237. Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,629. Объем публикации: 0,94 п.л., объем вклада соискателя: 0,7 п.л.

**Публикации в иных научных изданиях**

1. Мосина А.С. Грунтовые толщи Харасавэйского месторождения как объект для создания хранилищ буровых отходов // Грунтоведение. – 2022. – № 1(18). – С. 43-49.

2. Мосина А.С., Мирный А.Ю. Проблемы прогнозирования эксплуатационной надежности подземных резервуаров в многолетнемерзлых грунтах // Труды Международной научной конференции. Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии. Под редакцией В.Т. Трофимова, В.А. Королева. – 2021. – С.172-177.

3. Мосина А.С. Грунтовые толщи Харасавэйского месторождения как объект для создания хранилищ буровых отходов // Сергеевские чтения. Мат-лы годичной сессии Научного

совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта-1 апреля 2022 г.) Выпуск 23. – 2022. – С.87-94.

4. Мосина А.С., Мирный А.Ю., Гагарин В.Е., Фролов Д.М. Первые результаты исследования физико-механических свойств льда методом трехосного сжатия // Мат-лы Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения» (20 мая 2022 г.). – 2022. – С. 9-16.