

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

На правах рукописи

КИЯШКО
Надежда Владимировна

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОЛЕННЫХ ПОРОД И КРИОПЭГОВ П-ОВА ЯМАЛ В ПРОЦЕССЕ ИХ КРИОГЕННОГО МЕТАМОРФИЗМА

Специальность 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель
Зав. лаб. инженерной геокриологии,
д.г.-м.н., Комаров И.А.

Москва - 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общая характеристика работы	4
Глава 1. Геокриологические условия п-ова Ямал	9
1.1 Краткие сведения о климатических условиях, орографии и геологическом строении	9
1.2 Геокриологические и гидрогеологические условия	13
1.3 Распространение, происхождение и химический состав засоленных мерзлых пород и криопэгов	18
Глава 2. Методики экспериментального и расчетного определения фазового и химического состава, теплофизических характеристик, засоленных пород и криопэгов.....	25
2.1 Методика экспериментального определения коэффициента теплопроводности пород.....	25
2.2 Методика экспериментального определения фазового состава влаги и температуры начала замерзания пород	29
2.3 Методика экспериментального определения теплоемкости пород	33
2.4. Методика исследования химического состава водных вытяжек пород	37
2.5 Методика расчетного определения параметров фазового и химического состава поровых растворов засоленных пород и криопэгов с помощью программного продукта.....	39
Глава 3. Характеристика объектов исследования.....	44
3.1 Краткая характеристика исследуемых образцов пород.....	44
3.2 Краткая характеристика исследуемых проб криопэгов.....	61
3.3 Методика обработки исходной информации о химическом составе криопэгов и водных вытяжек засоленных пород.....	65
Глава 4. Закономерности изменения фазового и химического состава в процессе криогенного метаморфизма криопэгов п-ова Ямал	69
4.1 Существующие представления о криометаморфизации морской воды в диапазоне отрицательных температур.....	69
4.2 Закономерности изменения фазового и химического состава криопэгов в процессе их криогенного метаморфизма	72
4.3 Закономерности изменения фазового и химического состава в процессе криогенного метаморфизма засоленных пород.....	76

Глава 5. Методика прогноза температуры начала замерзания и фазового состава влаги криопэгов п-ова Ямал.....	88
5.1 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, плотности и рН криопэгов с помощью программного продукта	88
5.2 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, теплофизических свойств, плотности и рН криопэгов с помощью приближенных инженерных соотношений	94
Глава 6. Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги и теплофизических свойств засоленных пород п-ова Ямал.....	106
6.1 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, и теплофизических свойств засоленных пород с помощью программного продукта	106
6.2 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги и теплофизических свойств криопэгов с помощью приближенных инженерных соотношений	114
Выводы.....	129
Список литературы.....	133
Приложения (отдельный том)	

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Тематика работы направлена на решение одной из фундаментальных проблем геокриологии - выявления закономерностей криогенного метаморфизма поровых растворов пород и криопэгов морского типа засоления, в процессе изменения термобарических условий, включая промерзание-оттаивание. Выявление этих закономерностей позволит глубже понять природу и механизм преобразования фазового и химического состава этих рассолов, причем не только на качественном, но и на количественном уровне. Физическая картина процесса промерзания засоленных дисперсных пород сложна. Процесс образования кристаллов порового льда сопровождается вытеснением ионов растворенных солей в пленки незамерзшей воды, что приводит к увеличению концентраций ионов в поровом растворе, а при относительно невысоких скоростях промерзания возможен и захват ионов растущими кристаллами льда; миграцией воды и ионов за счет концентрационной диффузии и осмоса; кристаллизацией солей с образованием минералов - мирабилита, гидрогалита и др.; адсорбцией порового раствора на минеральной поверхности пород; ионным обменом и химическими реакциями.

Под криогенным метаморфизмом природных вод мы понимаем совокупность физико-химических процессов, включающих такие явления как кристаллизация воды и плавление льда, осаждение и растворение солей, удаление и поглощение газов, изменение состояния солевых равновесий, образование ячеек льда с включенным в структуру рассолом, перераспределение солей между твердой и жидкой фазами воды. Промерзание песчаных пород сопровождается, как правило, частичным отжиманием порового раствора из зоны кристаллизации и его концентрированием. Процесс криогенного концентрирования может приводить к образованию линз высокоминерализованных отрицательно-температурных подземных вод – криопэгов.

Термин «криопэг» имеет в литературе неоднозначное толкование. Наиболее употребительным является, введенное Н.И. Толстихиным определение: «..Криопэги (криогалинные воды) – природные соленые воды с отрицательными температурами». В такой трактовке этот термин рассматривается нами.

Сложности и многообразие химического состава природных засоленных растворов, крайне затрудняет экспериментальное исследование процессов криогенного метаморфизма при различных термобарических условиях. Так в лабораторных условиях подробно исследован этот процесс только для морской воды. Натурные определения химического состава водных вытяжек и проб криопэгов носят, как правило, единичный (за сезон) и фрагментарный характер. Это обуславливают целесообразность применения для исследования и прогноза изменения величин соответствующих характеристик других методов, в первую очередь, современных методов тер-

модинамического моделирования. Используемая методика и программный продукт, адаптированный для решения указанных проблем, являются абсолютно оригинальными, наиболее полно и адекватно, на сегодняшний день, отражающими характер протекающих в поровых растворах засоленных пород и криопэгах процессов преобразования их фазового и химического состава. Они не имеет аналогов в зарубежной и отечественной практике.

Выявление закономерностей криогенного метаморфизма позволяет разработать, более обоснованные, методики проведения прогнозных и эпигнозных (палеорекострукции) оценок температурного и водно-ионного режима засоленных пород, определяющего состояние и эволюцию ряда районов криолитозоны России (зоны шельфа северных морей, приморские низменности), которые в настоящее время интенсивно осваиваются, в первую очередь, как газо- и нефтеносные районы (п-ов Ямал, шельф Северных морей и т.д.). Для реализации таких моделей необходима информация по температуре начала замерзания засоленных пород и криопэгов, температурной зависимости содержания незамершей воды и льда, теплофизических свойств, плотности, рН. Несомненна и практическая значимость работы, связанная с возможностью оценки устойчивости оснований инженерных сооружений, возводимых на засоленных грунтах, которые могут вмещать криопэги. В частности, при воздействии минерализованных вод на мерзлый грунт происходит растворение содержащегося в нем льда, вследствие чего мерзлый грунт переходит в охлажденное состояние. По этой причине криопэги представляют большую опасность для свайных фундаментов, возводимых в области распространения многолетнемерзлых грунтов, поскольку в дальнейшем может произойти потеря несущей способности опор. Учет минерализации пород актуален при прогнозе эксплуатационного режима вблизи инженерных сооружений с периодическим выбросом или аварийным сбросом технологических растворов (очистные сооружения, хвостохранилища и т.д.). Инфильтрация загрязненного поверхностного стока, аварийные утечки, – все это приводит к таким нежелательным явлениям, как образование техногенных надмерзлотных таликов, развитие осадки грунтов, потеря несущей способности свай и других деформаций фундаментов, повышенная коррозии металлов подземных коммуникаций и т.д.

Цель и задачи исследования. Выявление закономерностей и разработка методики прогноза изменения фазового и химического состава, теплофизических характеристик засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал в зависимости от термобарических условий.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Изучить современное состояние вопроса о закономерностях изменения фазового и химического состава поровых растворов и криопэгов, теплофизических свойств в породах с морским типом засоления;

2. Проанализировать геокриологические и гидрогеологические условия района п-ова Ямал;
3. Освоить методику экспериментальных лабораторных исследований и получить экспериментальные данные по оценке температуры начала замерзания, содержанию незамерзшей воды, теплоемкости и коэффициенту теплопроводности засоленных пород для ряда районов п-ова Ямал;
4. Провести отработку и калибровку программного продукта для оценки изменения фазового и химического состава, плотности, рН и других характеристик рассолов при разных термобарических условиях. Разработать методику подготовки исходной информации по химическому составу водных вытяжек и проб криопэггов для реализации термодинамического моделирования;
5. Выявить особенности криогенного метаморфизма поровых растворов засоленных пород и криопэггов п-ова Ямал;
6. Разработать методику прогноза температуры начала замерзания, содержания незамерзшей воды, теплоемкости и коэффициента теплопроводности для криопэггов и засоленных пород и провести сопоставление с экспериментальными данными;
7. Выработать научные рекомендации для создания региональных (п-ов Ямал) или отраслевых нормативных документов для оценки температуры начала замерзания, фазовому составу и теплофизическим свойствам засоленных пород.

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

1. Проведена калибровка и отработка последней версии программы «FREEZBRINE», для оценки изменения фазового и химического состава, плотности, рН и других характеристик рассолов при разных термобарических условиях. На ее основе предложена методика оценки изменения фазового и химического состава поровых растворов засоленных пород и криопэггов при охлаждении и промерзании, включая методику подготовки данных стандартных химических анализов водных вытяжек и проб криопэггов. Методика является оригинальной, не имеющей аналогов в зарубежной и отечественной практике.
2. Выявлены закономерности протекания процессов криогенного метаморфизма поровых растворов засоленных пород и криопэггов. Предложены новые гипотезы о специфике и стадийности протекания этих процессов, качественный и количественный характер которых, а также механизм, отличается от такового для морской воды из-за наличия карбонатов, бикарбонатов и т.д.;
3. Используя данные о химическом составе проб с помощью термодинамического моделирования впервые сделан прогноз изменения фазового и химического состава, плотности, рН для 48 криопэггов п-ова Ямал, с общей минерализацией от 5 до 150 г/л, расположенных на

различных геоморфологических уровнях (лайды, террасы, поймы), для рассолов солончаков с минерализацией от 36 до 350 г/л.

4. Используя данные о химическом составе водных вытяжек и натуральных экспериментальных данных, с помощью термодинамического моделирования впервые сделан прогноз изменения температуры начала замерзания и содержания незамерзшей воды засоленных пород п-ова Ямал для диапазона концентраций порового раствора от 0,8 до 40 г/л. Проведенное сопоставление с данными натуральных опробований показало их удовлетворительную сходимость.

5. Используя результаты термодинамического моделирования, методы статистической обработки опытных опробований, предложены расчетные экспресс-методики (приближенные соотношения) для оценки температуры начала замерзания, содержания незамерзшей воды, теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал.

Практическое значение работы. Разработаны научные рекомендации для составления региональных (п-ов Ямал) и отраслевых нормативных документов по оценке количества незамерзшей воды, температуры начала замерзания, плотности, рН и теплофизических характеристик криопэгов и засоленных пород. Они составлены в полном соответствии с идеологией и формой представления приложения Б (Физические и теплофизические характеристики многолетнемерзлых грунтов), введенного в 2013 году СП.25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

Выявление закономерностей криогенного метаморфизма позволяет разработать более обоснованные модели прогноза температурного и водно-солевого режима пород, что важно для оценки устойчивости оснований инфраструктуры, интенсивно осваивающихся газо- и нефтеносных месторождений п-ов Ямал, возводимых на засоленных грунтах, которые могут вмещать криопэги.

Защищаемые положения

1. Закономерности изменения фазового и химического состава поровых растворов засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал в процессе криогенного метаморфизма, выявленные с помощью термодинамического моделирования, которое, в отличие от ранее полученных на основе анализа данных по промораживанию морской воды результатов, позволяет учесть специфику химического состава и степень минерализации растворов, выявить четыре характерные стадии протекания процесса в диапазоне отрицательных температур и предельные концентрации раствора, когда процесс криогенного метаморфизма протекает в отсутствии промерзания за счет перераспределения жидкой и твердой фаз.

2. Методика прогноза температуры начала замерзания, содержания твердой и жидкой фаз, плотности, рН и теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал, раз-

работанная на основе результатов термодинамического моделирования с использованием данных о химическом составе проб и водных вытяжек порового раствора.

3. Экспресс-методики прогноза температуры начала замерзания, содержания твердой и жидкой фаз, плотности и теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал, разработанные на основе результатов термодинамического моделирования, статистической обработки литературных данных и полученных экспериментальных результатов, представленных в форме аналитических зависимостей, которые позволяют использовать их в качестве научных рекомендаций для создания соответствующих региональных и отраслевых нормативных документов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы изложены в 6 публикациях, включая 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Они доложены на 3 международных и всероссийских конференциях (Салехард, 2012; Томск, 2012; Сеул, Южная Корея, 2014), а также на Ломоносовских чтениях (Москва, 2011, 2013, 2014).

Личный вклад автора. Получение экспериментальных результатов исследования засоленных пород п-ова Ямал в лаборатории НПО «Криос» (для 87 образцов по теплофизическим свойствам пород, 50 анализов химического состава водных вытяжек). Участие в калибровке и отработке версий программного продукта «FREEZBRINE». Разработка методики адаптации данных реализации программного продукта.

Структура и объем работы. Работа объемом 139 страниц, состоит из введения, шести глав, выводов и списка использованной литературы из 90 наименований. Она проиллюстрирована 45 рисунками и 42 таблицами. К работе дано приложение, которое содержит 125 страниц, включая 133 цветных рисунка и 50 таблиц, представляющих фактический материал и его первичную обработку.

1. Геокриологические условия п-ова Ямал

1.1 Краткие сведения о климатических условиях, орографии и геологическом строении

1.1.1 Орогидрография. Полуостров Ямал расположен на крайнем северо-западе Западно-Сибирской плиты. Протяженность полуострова с юга на север около 670 км, а с запада на восток – до 250 км. Естественные границы Ямала на юге – широтный отрезок долины р.Оби, на востоке – Обская губа, на севере и западе – Карское море и Байдарацкая Губа (Трофимов, 1975).

Полуостров представляет собой плоскую, расчлененную в различной степени аккумулятивную низменную равнину. Абсолютные отметки меняются от 0-2 м до 100-120 м. Рельеф имеет ступенчатое строение, понижаясь от осевых районов к периферии полуострова. Крупнейшие орографические элементы рельефа - Северо-Ямальская возвышенность и Ямальская низменность (Геокриология..., 1989) Вся территория в целом плоская и холмистая, изрезана речной и овражной сетью, заболочена, заозерена, разбита полигональными трещинами. Наибольшая густота расчленения территории речной и овражной сетью - на севере и западе Ямала. Реки, как правило, мелководны, они относятся к бассейну Карского моря и его заливов – Байдарацкой и Обской губ. Наиболее крупные реки – Яхадыха, Холяха, Иондеяха, Сядорьяха, Пыякояха, Пухучаяха, Тиутейяха, Харасавэй, Сеяха, Мордыха. Питание рек осуществляется в основном за счет поверхностных вод (талые воды весной, атмосферные осадки и таяние снежников летом). Уровень паводковых вод достигает 4 м. Равнинность территорий и особенности климата (испарение меньше выпадающих осадков) обусловили большую заозеренность территории. Заозеренность территории равна 10%, увеличиваясь с севера на юг, особенно резко возрастает на юге. Озера различны по площади - от нескольких квадратных метров до десятков квадратных километров, они нередко располагаются группами. Происхождение озер различное - термокарстовые, пойменные, остаточные (Трофимов, 1975). Для всей территории характерна сильная заболоченность. Болота развиты и на междуречьях, и в долинах рек, и в котловинах спущенных озер - хасырях. Преимущественно распространены арктические минеральные и торфяно-минеральные низинные болота (Шумилова, 1968).

1.1.2. Климатические условия. Для полуострова Ямал характерен, в основном, морской арктический климат, для средней его части - морской субарктический климат. Климат территории полуострова суровый, зима длится до 9-9,5 месяцев. Среднегодовые температуры воздуха меняются от -8 - -9°С на юге до -11 - -11,5°С на севере. Среднемесячные амплитуды

температур изменяются в пределах от 34°С до 44°С. Теплый период на севере региона короткий и длится не более 3-х месяцев, среднемесячные температуры самого теплого месяца не превышают +10°С. Годовое количество осадков для большей части территории более 400 мм в год. Летние осадки представляют собой длительные моросящие дожди, в конце лета – со снегом. Снег выпадает в конце сентября. Максимальная мощность снежного покрова в мае (до 50 см), минимальная июне-июле (0-6см). Максимальные скорости ветра зафиксированы на побережье Карского моря. Средняя месячная скорость ветра на побережье зимой 7-9 м/сек. Полуостров Ямал находится в пределах тундровой зоны. С севера на юг выделяются подзоны арктических тундр, мохово-лишайниковых тундр, кустарниковых тундр и лесотундры (Трофимов, 1975).

1.1.3. Геологическое строение. В геологическом строении территории выделяются палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения. Палеозойские залегают на небольшой глубине только в Приуральской части территории, а на остальной части полуострова – на глубинах в несколько сотен или тысяч метров. Среди них выделены девонские и каменноугольные отложения. В девонских отложениях выделены породы нижнего, среднего и верхнего отделов. Нижне- и среднедевонские отложения выделяются в лаборовскую свиту и развиты широко в северной части бассейна р. Щучья. Средне- и верхнедевонские отложения обнажаются также в долине р. Ензорьяха. Они объединяются в наупейскую свиту. Выходы каменноугольных отложений известны в районе среднего течения р. Сибилейсе и по его притоку Алавка. Породы выделены в сибирейскую свиту. Палеозойские породы в восточном направлении погружаются и перекрыты толщей мезозойско-кайнозойских отложений (Трофимов, 1975).

Мезозойские и раннекайнозойские образования также залегают значительно ниже уровня моря, среди них выделены образования триасового, юрского и мелового возраста. Триасовые отложения вскрыты в Лаборовской котловине, юрские - на глубинах более 700 м в профиле Салехард – Яр-Сале. Меловые отложения были обнаружены на юге и в центральной части полуострова на глубинах 300 м и более. Меловые отложения выделены в особый Ямальский тип разреза и представлены образованиями обоих отделов меловой системы (Геологическое строение и прогноз..., 1968).

Кайнозойские отложения развиты очень широко. Они представлены палеогеновыми и четвертичными отложениями. Отложения палеоцена, мощностью до 100 м, представлены прибрежно-морскими фациями с характерным переслаиванием алевритов, алевритистых глин и песков. Четвертичные отложения покрывают всю территорию полуострова Ямал. Мощность меняется от первых десятков метров до 250-300 м. Отложения представлены глинами,

суглинистыми и песчаными разностями (рис. 1-1), имеющими морской генезис. (Трофимов, 1975)

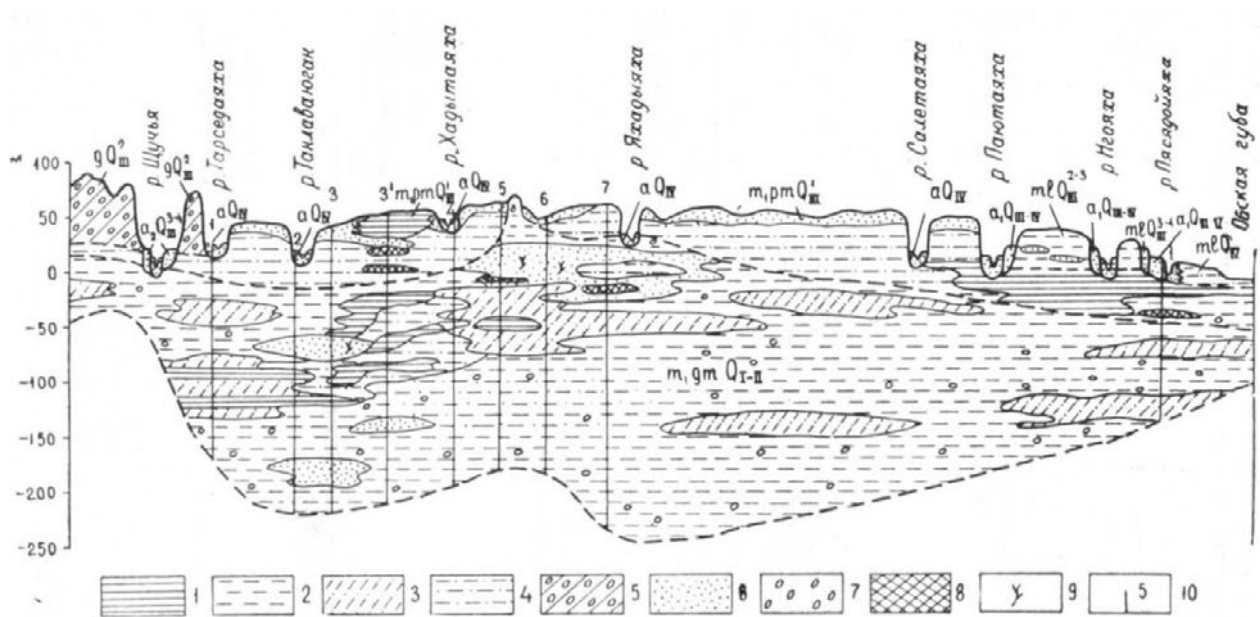


Рис.1-1 Геологический разрез южной части полуострова Ямал по линии фактории Щучье – пос. Новый Порт (Трофимов, 1975): 1 – глины, 2 – суглинки, 3- супеси и суглинки сильнопылеватые, 4- супеси и суглинки, 5 – моренные суглинки и супеси с гравием, галькой и валунами, 6- пески, 7 – гравий и галька, 8 – горизонты, обогащенные органикой, 9 – растительные остатки, 10 - скважины

Большая часть разреза четвертичных отложений выделена в ямальскую серию и казанцевскую свиту. Морские отложения слагают серию верхнеплейстоценовых – голоценовых морских террас. В Приуральской части территории выделяется комплекс верхнеплейстоценовых (зырянских) ледниковых образований. Отложения ниже- и среднеплейстоценового возраста, выделенные Г.И. Лазуковым и И.В. Рейниным (1961) в ямальскую серию, имеют мощность до 300 м. Литологические особенности толщи позволили расчленить осадки на три свиты: полуйскую, соответствующую первым этапам трансгрессии, казымскую и салехардскую, отвечающую максимальному этапу развития морской трансгрессии в среднеплейстоценовое время. Верхнеплейстоценовые отложения имеют широкое распространение и представлены образованиями казанцевской свиты, ледниковыми отложениями зырянского оледенения, морскими, лагунно-морскими и озерными отложениями третьей и второй террасы, а также аллювиальными отложениями второй надпойменной террасы. Верхнеплейстоценовые – голоценовые отложения имеют неширокое, фрагментарное распространение и представлены морскими, лагунно-морскими и озерными отложениями

первой террасы и аллювиальными отложениями первой надпойменной террасы. Среди голоценовых отложений В.Т. Трофимовым (Трофимов, 1975) выделены осадки морской современной лайды, лагунно-морской лайды, отложения пойм рек, озер и болотные образования.

1.2 Геокриологические и гидрогеологические условия

1.2.1 Геокриологические условия. Современные представления о криолитозоне полуострова Ямал изложены в трудах В.В. Баулина (Баулин, 1985, Баулин и др., 1979), В.Т. Трофимова (Трофимов, 1986, Трофимов, 1977, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980), во втором томе «Западная Сибирь» пятитомника «Геокриология СССР» (Геокриология..., 1989) и других работах. В качестве основных характеристик ММП рассматриваются, как правило, их площадное распространение, температура, мощность, сплошность по разрезу, криогенное строение, гидрогеологические условия, макрольдистость, интенсивность проявления различных криогенных процессов и явлений.

Основной особенностью геокриологических условий полуострова Ямал, во многом определяющей весь комплекс инженерно-геологических условий, является сплошное распространение многолетнемерзлых пород. Они встречаются на всей территории, начиная от северной оконечности Ямала до южных его границ. Их температура, криогенное строение, мощность толщ, мощность слоя сезонного протаивания и промерзания существенно неодинаковы в разных частях территории. Это связано с тем, что многолетнемерзлые породы сформировались и развивались под влиянием большого числа природных факторов, различных в разных районах Ямала. Решающее влияние на многие параметры мерзлотных условий оказали зональные, в первую очередь, климатические факторы природных условий, а также история геологического развития территории в верхнем плейстоцене и голоцене. Региональные геологические факторы, в частности, тектоническое строение территории лишь осложняют мерзлотные особенности территории (Трофимов и др., 1986). Единого взгляда на мощность мерзлой толщи п-ва Ямал не существует; по данным различных исследователей максимальная ее величина составляет более 500 м (Баулин, 1985), 450 – 500 м (Геокриология..., 1989), более 300 м или приближается к этой величине (Трофимов, 1977, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980). Большинство авторов признают зависимость мощности ММП от возраста и генезиса геоморфологического уровня, в пределах которого эти породы сформировались, в связи с чем максимальные мощности ММП приурочены к наиболее древнему геоморфологическому уровню Ямала – салехардской равнине, расположенной в осевой части полуострова. В пределах казанцевской морской равнины, второй и третьей морских террас, лагунно-морских и надпойменных террас мощность ММП приводится в интервалах 150 – 300 м (Геокриология..., 1989, Трофимов и др., 1986, Трофимов, 1977, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980) или как достигающая 500 м (Баулин, 1985). Меньшие значения мощности ММП (50 – 150 м) характерны для участков пойм рек, а также для западных и северных районов, примыкающих к

Карскому морю. Наименьшие мощности (менее 50 м) мерзлых пород приводятся для лайды и приустьевых частей пойм рек (Геокриология ..., 1989, Трофимов и др., 1986, Трофимов, 1977, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980).

По мнению ряда исследователей на молодых геоморфологических уровнях (поймы, лайды, низкие террасы) севера Западной Сибири продолжается процесс многолетнего промерзания пород (Баулин, 1985, Геокриология СССР. Западная Сибирь..., 1989).

Одним из важных факторов, определяющих мощность ММП, признается тектоническое строение территории, причем важное значение имеет как общий тектонический план (глубина погружения фундамента, его возраст), так и наличие локальных структур. Влияние последних неоднозначно и зависит от присутствия в них газовых залежей. По мнению В.В. Баулина (Баулин, 1985), в сводовой части структур третьего порядка при отсутствии газовой залежи наблюдается уменьшение мощности ММП; наличие газовой залежи приводит к увеличению мощности мерзлых пород, но при условии, что залежь расположена на глубинах, не превышающих определенные значения (для севера Ямала эти значения 1100 – 1200 м).

Таким образом, мощность многолетнемерзлых пород в пределах подавляющей части полуострова составляет 200-300 м. В целом мощность мерзлых толщ в западных, северо-западных и северных районах Ямала, прилегающих к Карскому морю, существенно ниже по сравнению с мощностью их вдоль побережья Обской губы. Наиболее мощные мерзлые толщи (свыше 300 м) распространены в пределах возвышенной, осевой части полуострова.

Для геокриологических условий п-ва Ямал характерно сплошное распространение, нарушаемое подрусловыми и подозерными таликами, как правило – несквозными. -Мощность ММП закономерно снижается в северо-западном направлении от Обской губы и от древних геоморфологических уровней (350-400 м в пределах салехардской морской равнины) к более молодым (10-20 м на лайде Карского моря). Аномально низкие мощности приурочены к зонам глубинных разломов и связаны с пространственной неоднородностью теплотоков из недр. Сквозные талики развиты под акваторией Обской губы и Карского моря. Они развиты и под наиболее крупными озерами Ямала, имеющими мощность в несколько десятков или даже сотен квадратных километров и глубины до 30-50 м. Несквозные талики развиты гораздо шире (в том числе и под озерами). Мощность их под руслами рек изучена лишь в южной части полуострова Ямал. Она изменяется от 4-8 до 20-30 м и в целом возрастает по мере увеличения реки и ее глубины. В более северных районах (Новый Порт – Мыс Каменный) мощность подрусловых таликов обычно составляет 5-7 м. Под руслами мелких рек и ручьев талики не формируются (Геокриология..., 1989, Инженерно-геологический..., 1996, Трофимов и др., 1986).

Зональность температурного режима ММП связана с геолого-структурными, геоморфологическими, геоботаническими и климатическими особенностями территории.

Определяющими факторами являются характер напочвенных покровов и условия снегонакопления. Температура пород на уровне нулевых годовых амплитуд изменяется от $-0,1 \div -10^{\circ}\text{C}$ в пределах низких уровней на юге до $-8 \div -10^{\circ}\text{C}$ на высоких водораздельных поверхностях в центральной и северной частях полуострова.

Наиболее низкие среднегодовые температуры мерзлых пород (до -10°C) отмечены в пределах арктической и лишайниковой тундр севернее широты пос. Тамбей. Изменение среднегодовых температур многолетнемерзлых пород с севера на юг обусловлено постепенным увеличением теплообеспеченности территории и увеличением мощности растительного покрова от 6-8 до 15-20 см, а часто и более, а также сменой мохово-лишайниковой растительности мохово-кустарниковой на юге, где высота кустарников достигает 0,5-0,7 м, что в значительной степени способствует накоплению снега почти такой же мощности (Баулин, 1985, Геокриология..., 1989, Трофимов и др., 1986).

Криогенное строение ММП полуострова определяется мерзлотно-фациальными условиями осадконакопления и развития территории в плейстоцен-голоцене. Верхняя часть разреза сложена высокольдистыми сингенетически промерзавшими породами с широким распространением сегрегационных и полигонально-жильных льдов. Максимальные мощности синкриогенных толщ приурочены к отложениям третьей и второй морских и лагунно-морских террас. Эпикриогенными толщами, для которых более характерны инъекционные льды и ледцемент, сложены поверхности салехардской и казанцевской морских равнин центрального и северного Ямала, а также все геоморфологические уровни южнее северной границы типичных тундр.

Отличительная особенность полуострова - широкое развитие в верхней части разреза полигенетических мономинеральных льдов, образующих крупные залежи площадью до 10-15 км² и мощностью более 25-30 м. Наиболее крупные залежи льда приурочены к отложениям III морской террасы в центральной и западной частях полуострова. Важной чертой Ямала является повсеместная засоленность отложений, связанная с инфильтрацией морских вод в слаболитифицированные дисперсные породы во время позднечетвертичных морских трансгрессий. В отложениях различного генезиса по всему разрезу широко развиты напорные криопэги с минерализацией до 80-110 г/л. (Дубиков, Иванова, 1990, Дубиков, Иванова, 1996, Дубиков, 2002, Инженерно-геологический ..., 1996, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980)

Одной из наиболее важных характеристик геокриологических условий территории является формы и интенсивность проявления криогенных процессов, которые на полуострове весьма разнообразны и многочисленны. Здесь широко развиты склоновые процессы (криогенные оползни и сплывы), морозобойное растрескивание и образование повторно-жильных льдов, криогенное пучение грунтов, термокарст, термоэрозия и термоабразия.

Характеристика этих процессов и возникших вследствие их развития явлений (форм рельефа) приводится в многочисленных источниках (Баулин, Чернядьев, 1979, Инженерно-геологический..., 1996, Трофимов и др., 1986, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980).

1.2.2 Гидрогеологические условия п-ова Ямал, как один из важнейших факторов, определяющих инженерно-геокриологические особенности территории, изучены весьма слабо. Водонапорная система содержит несколько водоносных комплексов, разделенных регионально выдержанными водоупорами. В инженерно-геокриологическом отношении интерес представляют два верхних гидрогеологических комплекса, поскольку они попадают в сферу хозяйственной деятельности при освоении месторождения и в них наиболее четко выражена взаимосвязь мерзлотных и гидрогеологических условий.

Первый гидрогеологический комплекс сложен песчано-глинистыми породами палеоген - четвертичного возраста. Они могут являться как водовмещающими, так и водоупорными.

Второй гидрогеологический комплекс представлен глинистыми и нетрещиноватыми кремнистыми породами и линзами песчаного материала палеогенового и верхнемелового возраста, слагающими мощную относительно водоупорную толщу, содержащую в себе отдельные водоносные горизонты.

По отношению к ММП подземные воды Ямала подразделяются на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные. Сведения о надмерзлотных и межмерзлотных водах приводятся в ряде литературных источников (Геокриология..., 1989, Инженерно-геологический..., 1996, Трофимов и др., 1986, Трофимов, 1977). К первым относятся воды сезонноталого слоя и воды несквозных таликов.

Воды сезонноталого слоя залегают на глубине 0,2 – 1,0 м, питаются за счет атмосферных осадков и таяния подземного льда. Воды характеризуются малой минерализацией и гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-кальциевым или гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-магниевым составом.

Воды несквозных таликов распространены под руслами рек и озерами. Мощность водоносного горизонта от нескольких метров до десятков метров. Воды слабо минерализованы, по химическому составу близки к водам сезонноталого слоя.

Межмерзлотные воды на полуострове вскрыты отдельными скважинами; информация об их характеристиках ограничена. Приводятся сведения о высокой минерализации вод (до 90 г/л), их хлоридно-натриево-, хлоридно-натриево-магниевом или гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-магниевом составе. Высказываются предположения об отсутствии связи вод с морем и залегании водоносных слоев в виде замкнутых линз.

Сведения о подмерзлотных водах Ямала, залегающих на больших глубинах, крайне ограничены. В литературе признается факт их наличия, высказываются предположения о

приуроченности водоносного горизонта к песчаным отложениям ямальской серии (Геокриология..., 1989, Трофимов и др., 1986), дается приблизительная оценка его мощности.

1.3 Распространение, происхождение и химический состав засоленных мерзлых пород и криопэггов

1.3.1 Распространение засоленных мерзлых пород и криопэггов. По данным Г.И. Дубикова и Н.В. Ивановой (рис. 1-2), область повсеместного распространения засоленных мерзлых грунтов и криопэггов Западной Сибири располагается севернее широты пос. Новый Порт на Ямале (Дубиков, Иванова, 1991). В этом районе мерзлые породы засолены на всю глубину. Верхняя часть криогенной толщи (мощностью 150-250 метров) содержит соли в количестве меньшем, чем равновесная с температурой концентрация. Широко развиты криопэги с более высокой концентрацией солей. Южнее указанной широты распространены слабозасоленные и незасоленные морские четвертичные отложения. Нижележащие палеогеновые высокодисперсные глины отличаются заметным засолением.

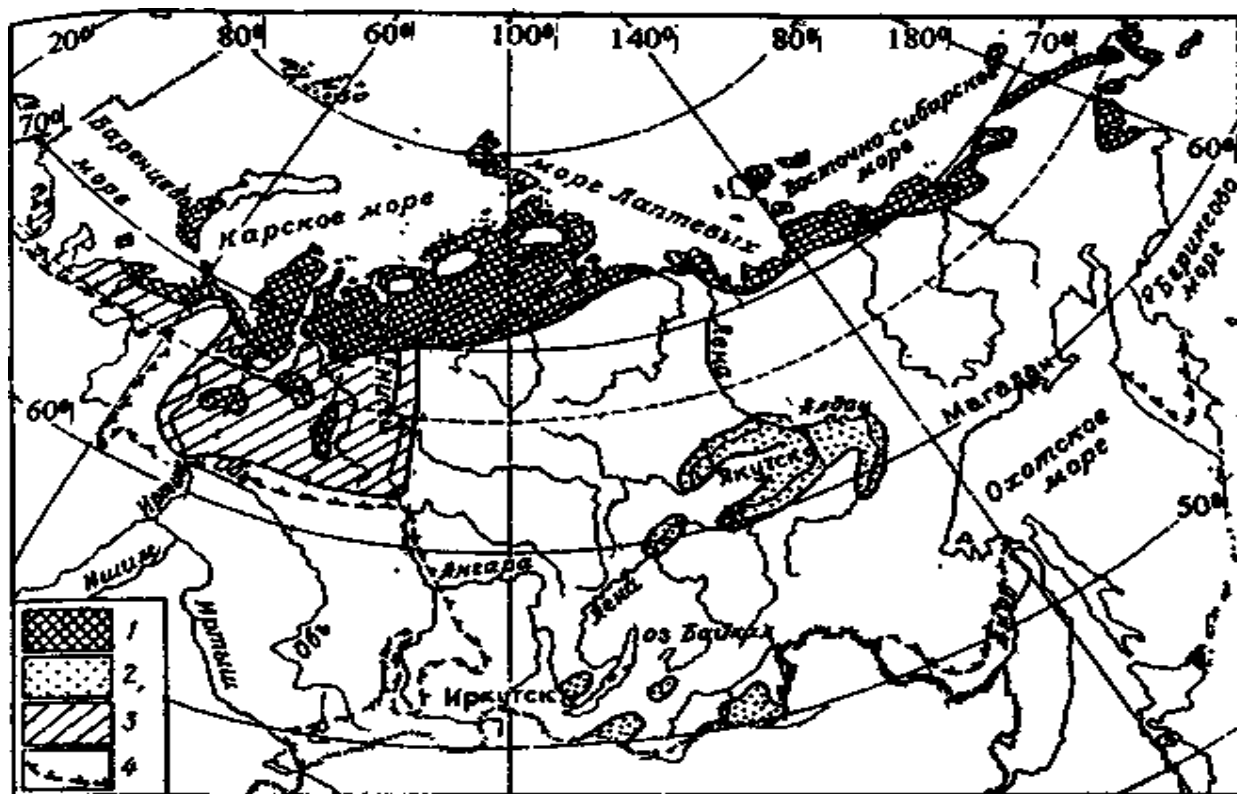


Рис.1-2 Карта распространения засоленных пород (Дубиков, Иванова, 1991)

1 — морской тип засоления с поверхности; 2 — континентальный тип засоления; 3 — области плейстоценовых морских трансгрессий; 4 — граница многолетнемерзлых пород

В регионах Арктического побережья засоленные породы — это четвертичные плейстоценовые и голоценовые отложения различных генетических типов, среди которых преобладающими являются морские. Фактические данные о распространении засоленных мерзлых пород Арктического побережья России приведены в таблице 1-1.

Данные о засолении мерзлых пород Арктического побережья России. (Дубиков, 1991, Велли, 1982, Данилов, Аксенов, Яркин, Брушков, 1998 и другие)

Район	Характеристика пород	Место отбора	Засоленность, %
Европейская территория России	Морские и аллювиальные отложения	Хайпудырская губа	0-0.3
		р. Сарембой-Яха	0.1-0.2
		пос. Пионерный	0.1
		пос. Амдерма	0.1-1.5
		о. Колгуев	0.2-0.8
		р. Печора, низовье	0.1-0.2
Западная Сибирь	Морские, аллювиальные – морские, аллювиальные, озерные и солифлюкционно-делювиальные отложения.	Бованенковское ГКМ	0.03-2.1
		о-ва Шараповы Кошки	до 2.4
		Северный Ямал	0.5-2.0
		Южный Ямал	0.2-0.5
		Мыс Харасавэй	0.2-0.4
		оз. Ней-то	0.2-0.6
		Обско-Пурское междур.	0.05-0.1
		пос. Диксон	0.5-1
Гыдан, оз. Мерку-то	0.4-1.2		
	р. Сухой Полуи	0.6	
Восточная Сибирь	Морские отложения Элювиальные отложения Озерные отложения Аллювиальные отложения	п-ов Чукотка	0.2
		лагуна Рыпильхин	1.5-3
		м. Шмидта	до 1
		г. Певек	0.1-0.5
		г. Анадырь	0.2-0.5
		дельта р. Лена	0.1
		Ванькина губа	0.4-1.2
		устье Алазеи	0.2-1.0
		Халлерченская тундра	0.8-2.0
		г. Анадырь	0.3
		п-ов Чукотка	0.1-0.2
п-ов Чукотка	до 0.1		

Данные о распространении засоленных мерзлых грунтов на Европейском севере ограничены. Так как морские четвертичные отложения в многолетнемерзлом состоянии на Кольском полуострове практически отсутствуют, возможность засоления мерзлых толщ там невелика. Морские многолетнемерзлые породы, содержащие соли, на Югорском полуострове хорошо изучены для пос. Амдерма. Многолетнемерзлые породы представлены серо-голубыми суглинками с большой примесью органического материала. Как правило, засоление суглинков изменяется в пределах от 0.1 до 1.5 %, практически везде увеличивается с глубиной. Наиболее часто встречающееся значение – 0.3-0.8 %. Состав солей близок к составу солей морской воды

В целом для Ямала характерно увеличение содержания солей в мерзлых породах с юга на север полуострова в среднем от десятых долей процента до 1-1.5 %.

1.3.2 *Распространение криопэггов.* Наличие криопэггов характерно для всей криолитозоны полуострова Ямал. Они залегают на разной глубине в виде изолированных линз,

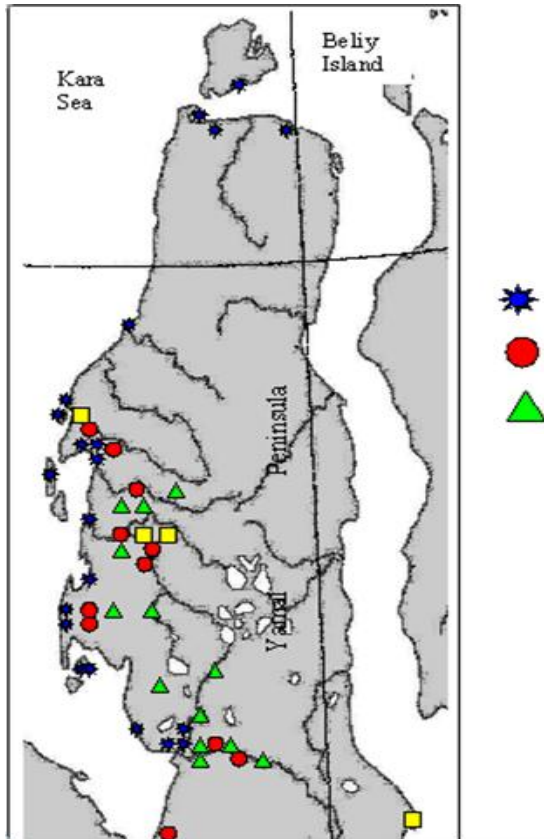


Рис. 1-3 Распространение криопэггов на различных геоморфологических уровнях на территории п-ова Ямал:

1- лайды, 2 – поймы, 3 - террасы

Карта составлена Стрелецкой И.Д.,

Крицук Л.Н.

не имеющих связи друг с другом, с поверхностными и подземными водами.

Расположение криопэггов показано на схематической карте на рис. 1-3. Основная часть исследованных криопэггов приурочена к западной и юго-западной частям п-ова Ямал. На лайде Карского моря и Байдарацкой губы (а также в приустьевых частях рек, впадающих в них) криопэги залегают практически повсеместно на глубинах от 0,5-3 до 8-10 м (вероятно, есть и более глубокое их залегание). Линзы криопэггов здесь приурочены к прослоям охлажденных органогенных илов и заиленных песков и супесей мощностью до 1,5 м. Криопэги широко распространены на поймах средних рек как на пляжах и косах, так в центральных и тыловых частях поймы, где они приурочены к днищам древних и осушенным частям современных озер. При бурении скважин под мостовой переход под рекой Сеяха (Мутная) изолированные линзы криопэггов были встречены под руслом реки. Глубина залегания

пойменных криопэггов изменяется от 3-5 до 10-20 м (в русле реки Сеяха - 30 м). В пределах речных террас залегающие близко к поверхности земли криопэги связаны преимущественно с днищами современных и древних спущенных озер - хасыреев, а также, по-видимому, с подозерными и подрусловыми таликами. Вместе с тем, в районах широкого развития мощных залежеобразующих подземных льдов линзы криопэггов неоднократно вскрывались на пологих склонах холмов, с зарослями высоких ивняковых кустарников (Крицук, 2010).

На геологическом разрезе (Стрелецкая, Лейбман, 2002) показана толща морских казанцевских отложений, содержащих мощную залежь пластового льда, подстилаемую многочисленными линзами высокоминерализованных вод (криопэггов) (Рис. 1-4). Толща в целом засолена, однако, как видно на рисунке, в глинистой части разреза, несмотря на высокую соленость глин, криопэги в них отсутствуют – все ионы солей, отжимаемые при кристаллизации воды, адсорбируются и удерживаются активной поверхностью минеральных частиц грунта. В то же время в песчаной части разреза линзы криопэггов многочисленны, а поровые растворы обессолены. Такое явление объясняется малоактивной поверхностью песчаных частиц, которая приводит к вытеснению ионов солей и скапливанию их в замкнутых непромерзающих зонах.

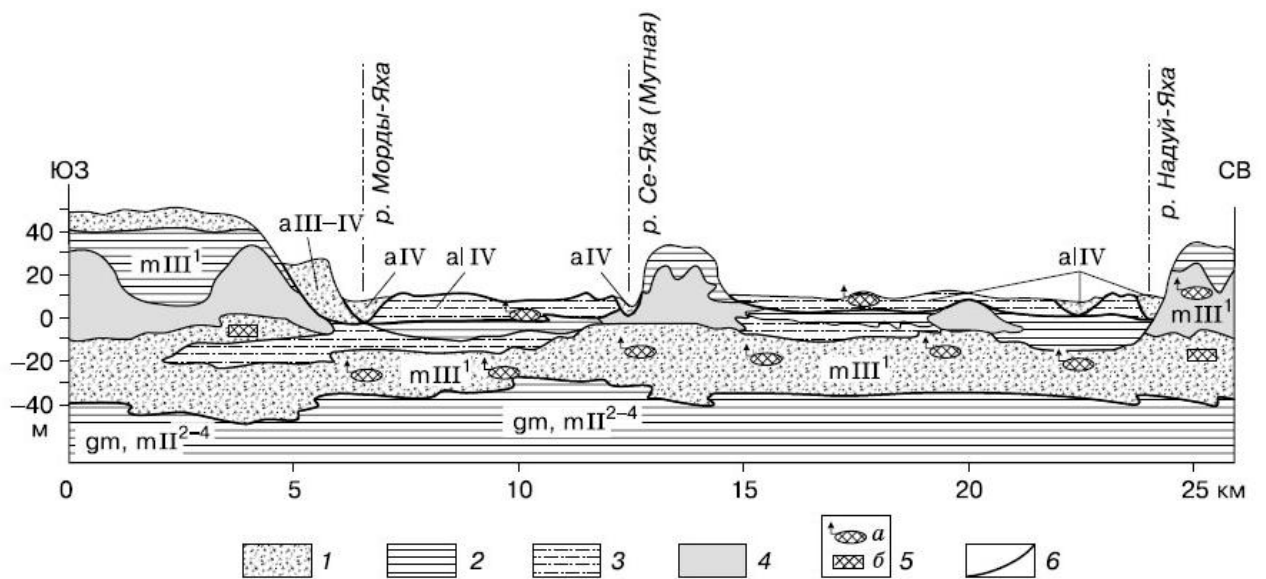


Рис. 1-4 Схематический разрез четвертичных отложений Центрального Ямала с линзами криопэггов и пластовыми льдами (Стрелецкая, Лейбман, 2000): 1 – пески; 2 – глины; 3 – переслаивание песков, суглинков и глин; 4 – пластовый лед; 5 – линзы криопэггов (а – установленные, б – предполагаемые); 6 – граница комплекса с пластовым льдом.

1.3.3 Происхождение засоленных мерзлых пород арктического побережья. Засоленные мерзлые четвертичные породы Арктического побережья, имеют, как правило, морское происхождение и относятся к числу сингенетических мерзлых толщ.

Соли, содержащиеся в морских осадках, в условиях их проникновения в мерзлый массив пород, частично выносились за пределы формирующих толщ, а частично перераспределялись в них. Промерзание песчаных пород сопровождается отжиманием порового раствора из зоны кристаллизации вниз по разрезу и его концентрированием. Тем не менее, содержание солей в сингенетических песчаных мерзлых толщах, как правило, ниже, чем

в первичном морском осадке. Для глинистых толщ характерен процесс перемещения ионов солей с поровым раствором к границе промерзания.

Засоленность пород может иметь различную природу. Легкорастворимые соли, которые попадают в осадок вместе с захваченной водой, определяют седиментационную засоленность. Однако, при выходе пород из под уровня моря может происходить как разбавление их поверхностными водами, так и повышение концентрации за счет диффузионного перемещения солей или других процессов, приводящих к вторичному засолению. Изменение засоленности пород может также происходить в следствие процессов криометаморфизма, приводящего к перераспределению солей по разрезу (Дубиков, 2002).

1.3.4 Происхождение криопэггов. Криопэги представляют собой соленые воды с отрицательной температурой, образующиеся в результате физико-химических процессов под воздействием криогенного метаморфизма. Соленые воды морского генезиса в настоящее время обнаружены как в субаэральных структурах, в пределах арктических равнин, затапливаемых морем в периоды трансгрессий моря в четвертичном периоде, так и в субмаринных структурах в пределах современного шельфа морей Северного Ледовитого океана.

Известно, что на протяжении плейстоцена и голоцена эпохи трансгрессий морей Северного Ледовитого океана неоднократно сменялись их регрессиями. В периоды трансгрессий морские воды затапливали огромные территории в пределах равнин, приуроченных к участкам, на которых преобладали слабые тектонические опускания. Начиная с плейстоцена при осушении морских акваторий происходило охлаждение и частичное промерзание донных отложений, поры которых были заполнены морскими водами. Дальнейшее охлаждение пород уже в субаэральных условиях приводило к криогенному метаморфизму пород и подземных вод морского генезиса, и как следствие, к формированию и последующему сохранению криопэггов.

1.3.5 Химический состав поровых растворов и криопэггов. Основные ионы в составе водных вытяжек засоленных пород располагаются в той же последовательности, что и для морской воды : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. Однако, в химическом составе засоленных пород с заэвтектическими концентрациями доля сульфатов сопоставима с долей хлоридов и даже может преобладать. Минерализация вод может достигать 350 г/л в силу интенсивного процесса криогенного концентрирования в верхних горизонтах.

По своему химическому составу криопэги близки к морским водам, их минерализация составляет 10-250 г/л, состав хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов. Засоленность верхних придонных слоев шельфа северных морей сопоставима со степенью минерализации морской воды. Они имеют морской тип засоления, для которого характерно

следующее соотношение концентраций ионов: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$.
Количественное соотношение ионов, как правило существенно не меняется.

Выводы к главе 1

1. Полуостров Ямал расположен на крайнем северо-западе Западно-Сибирской плиты. Полуостров представляет собой плоскую, расчлененную в различной степени аккумулятивную низменную равнину. Рельеф имеет ступенчатое строение. Для всей территории характерна сильная заболоченность и заозеренность. Для полуострова Ямал характерен, в основном, морской арктический климат, для средней его части - морской субарктический климат.

2. В геологическом строении территории выделяются палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения. Среди палеозойских выделены девонские и каменноугольные отложения. В девонских отложениях - породы нижнего, среднего и верхнего отделов. Нижне- и среднедевонские отложения выделяются в лаборовскую свиту. Палеозойские породы перекрыты толщей мезозойско-кайнозойских отложений, среди которых выделены образования триасового, юрского и мелового возраста. Меловые отложения выделены в особый Ямальский тип разреза. Кайнозойские представлены палеогеновыми и четвертичными отложениями. Большая часть разреза четвертичных отложений выделена в ямальскую серию и казанцевскую свиту.

3. Полуостров Ямал относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Среднегодовая температура пород Ямала в среднем изменяется от $-2 \div -5^0$ на юге Ямала до $-6 \div -10^0$ на севере. По условиям формирования мерзлые породы относятся к полигенетическим. До глубины 5 – 15 м они представлены высокольдистыми сингенетическими образованиями, ниже залегают эпигенетически промерзшие отложения, для которых характерно снижение льдистости с глубиной. Полуостров Ямал относится к районам с интенсивным проявлением криогенных процессов. Здесь широко развиты склоновые процессы, морозобойное растрескивание и образование повторно-жильных льдов, криогенное пучение, термокарст, термоэрозия и термоабразия. Гидрогеологические условия полуострова изучены слабо. Наиболее детально исследованы надмерзлотные воды; ограниченными являются сведения о межмерзлотных водах и практически отсутствует информация о подмерзлотных водах.

4. Условия нахождения засоленных пород и криопэгов неоднородны: с севера на юг сокращается площадь, занятая ММП, повышается их температура, увеличиваются глубина

сезонного протаивания и прерывистость мерзлой толщи в разрезе. Температура ММП на глубине слоя годовых теплооборотов изменяется от 0 - -0.5°C на южной границе криолитозоны до -10 - -11°C на побережье арктических морей и островах (зона арктической тундры). По своему химическому составу криопэги близки к морским водам, их минерализация составляет 10-110 г/л, состав хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов. Основные ионы в составе водных вытяжек засоленных пород располагаются в той же последовательности, что и для морской воды : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$.

2. Методики экспериментального изучения температуры начала замерзания, фазового и химического состава и теплофизических свойств засоленных пород

2.1 Методика экспериментального определения коэффициента теплопроводности пород

2.1.1 Существующие методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности пород. На практике используется большое количество разных методов исследования. Это связано с различием пород по строению, составу и внешним условиям. При выборе метода нужно обращать внимание, в полевых или лабораторных условиях проводится определение, на грунтах естественного сложения или на грунтовых пластах, достаточно ли одной характеристики или требуется моделирование внешних условий.

Нашей целью является изучение теплопроводящих свойств засоленных пород. Экспериментальные данные в этом направлении рассматриваются в работах Барковской Е.Н., Бровка Г.П., Комарова И.А., Смирновой, Н.Н., Мотенко, Р.Г., Кроника Я.А. и Лосевой, С.Г., Молочушкина Е.Н. и Гаврильева Р.И., Пускова В.Е., Степанова А.В., Шейкина И.В., Весг Braun, Musgra Anil, Erika Brian и др.. Эти исследования проводились как с помощью стационарных, так и с помощью нестационарных методов.

В основе стационарных методов лежат решения уравнения теплопроводности обычно при граничных условиях I или II рода (заданы и поддерживаются постоянными во времени либо температура, либо интенсивность теплового потока на поверхности образца породы). Преимуществами стационарных методов определения теплопроводных свойств засоленных пород являются простота и строгость теоретического обоснования, возможность определения характеристик как при положительной, так и при отрицательной температуре, включая область температур, в которой происходят интенсивные фазовые переходы. Недостатками – необходимость учета при определенных условиях переноса тепла конвекцией поровых растворов для дисперсных пород, относительно долгая продолжительность испытания, сложности конструктивного оформления и методической реализации метода, в особенности при нахождении характеристик мерзлых пород.

При исследованиях мерзлых дисперсных грунтов рекомендуется определять коэффициент теплопроводности мерзлого грунта методом стационарного режима по ГОСТ 26263-84. При практической реализации метода, когда исследуемый образец имеет конечные размеры, необходимо, чтобы поток тепла распространялся в одном направлении поперек пластины, а боковые утечки были достаточно малы. Этого можно достигнуть соответствующим

выбором размеров образца (толщина во много раз меньше его поперечных размеров) либо использованием охранных колец, предотвращающих боковой отвод тепла от исследуемого образца, расположенного в центре. Использование охранных колец значительно усложняет конструкцию установки и увеличивает время установления стационарного режима в силу необходимости согласования величины нагрева на нескольких нагревателях. Теоретический анализ температурных полей в одномерном варианте для бесконечной пластины и в случае двумерной задачи, когда на торцевых поверхностях реализуются граничные условия I рода (постоянство температуры), а на боковой поверхности происходит теплообмен по закону Ньютона, показал, что если у ограниченной пластины диаметр в 3-4 раза больше ее толщины, то расхождение температур в центре неограниченной и ограниченной пластин в среднем составляет около 2% (Комаров, 2003).

Нестационарные методы характеризуются тем, что определение теплофизических характеристик производится в условиях меняющегося во времени температурного поля. Установка позволяет учесть внешнее давление. К недостаткам метода относятся сравнительная сложность отладки лабораторной установки и значительное время, необходимое для установления стационарного режима и на проведение единичного опыта. Для засоленных пород это может быть источником ощутимой погрешности. (Лабораторные методы..., 1985). Для этих методов характерно достаточно короткое время проведения эксперимента. Относительная простота аппаратной реализации ряда модификаций методов позволяет использовать их для серийных испытаний в тех случаях, когда достаточно усредненных значений теплофизических характеристик в определенном интервале температур. Для влажных дисперсных пород, кроме этого, малое время эксперимента позволяет пренебречь эффектами, связанными с влагопереносом под действием градиента температуры.

Проведенный анализ показывает, что для всего спектра талых и мерзлых пород различного генезиса и возраста, включая засоленные породы, наиболее предпочтительными для опробования в лабораторных условиях являются стационарные методы, обеспечивающие широкий охват типов горных пород как при положительной, так и при отрицательной температурах, включая диапазон температур, в котором происходят интенсивные фазовые переходы.

2.1.2 Методика экспериментального определения коэффициента теплопроводности стационарным режимом, модификация пластины. Определение коэффициента теплопроводности мерзлых и талых грунтов выполняется стационарным методом при помощи устройства (рис. 2-1) для определения коэффициента теплопроводности грунтов. Методики заключаются в использовании оригинальных датчиков теплового потока, вмонтированных в металлические корпуса теплообменников. Такая конструкция позволяет в достаточной степени

усреднять температурное поле в плоскостях измерений и защищать датчики теплового потока и температуры от механических и физико-химических повреждений.

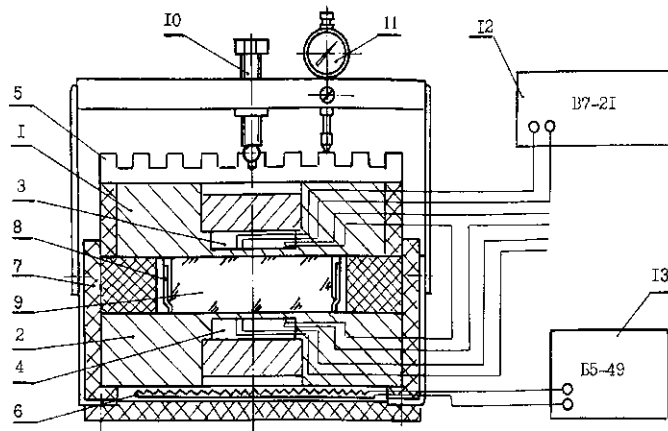


Рис. 2-1 Схема устройства для определения коэффициента теплопроводности грунта: 1, 2 - теплообменники; 3, 4 - датчики теплового потока; 5 - радиатор; 6 - нагревательный элемент; 7 – теплоизоляция; 8 – кассета; 9 - образец исследуемого грунта; 10 - прижимной винт; 11 - индикатор часового типа; 12 - вольтметр цифровой; 13 - источник постоянного тока

Основными элементами устройства являются теплообменники из дюралюминия Д-16 1 и 2 в форме плоских дисков. В корпусах теплообменников расположены специальные датчики теплового потока 3 и 4, а также датчик разности температур верхнего и нижнего теплообменников. Верхний теплообменник 1 находится в тепловом контакте с воздушным радиатором 5, а нижний контактирует с проволочным нагревателем 6. Боковая поверхность теплообменников, а также нижняя часть теплообменника 2 защищены теплоизоляцией из оргстекла 7. Между теплообменниками располагается кассета 8 с исследуемым грунтом 9.

Для установки кассеты 8 с образцом исследуемого грунта 9 теплоизоляционный корпус нижнего теплообменника 2 поворачивается вокруг одной из стоек устройства после подъема верхнего теплообменника 1 с помощью прижимного винта 10. Следует отметить, что в настоящее время в ИПИПРЭ НАН Беларуси разработано несколько вариантов устройства для определения коэффициентов теплопроводности грунтов, которые несколько отличаются по конструкции прижимного приспособления.

Для теплоизоляции наружной поверхности кассеты между теплообменниками помещено кольцо из деформируемого материала (поролон). Регистрация сигналов датчиков теплового потока и разности температуры, а также питание нагревателя осуществляется с помощью серийных приборов цифрового вольтметра В7-21 (12) и источника постоянного тока Б5-49 (13).

В начале эксперимента заполненная исследуемым грунтом кассета, уплотненная и заглаженная с торцевых сторон, помещается на нижний теплообменник, здесь же укладывается теплоизолирующее кольцо из поролона. Верхний теплообменник плотно прижимается с помощью винта.

Собранная конструкция помещается в термостатируемую камеру и подается на нагреватель напряжение (15-35) В с таким расчетом, чтобы установившаяся разность температур теплообменников составляла (2-4) °С. Спустя 3-4 часа после начала термостатирования фиксируются с интервалом 30-40 минут величины сигналов датчиков теплового потока и разности температур. При изменении величин регистрируемых сигналов не более чем на 2 мВ за 30 минут и соответствии тепловых потоков на верхнем и нижнем теплообменниках с точностью до 15% стационарное тепловое состояние считается достигнутым и зафиксированные величины сигналов датчиков полагаются в расчет коэффициента теплопроводности.

После проведения опыта замеряется отсчет на реперных точках для определения высоты образца. Рассчитывается коэффициент теплопроводности по формуле

$$\lambda = K \frac{f \cdot \varepsilon_{q1} + \varepsilon_{q2}}{\varepsilon_{\Delta T}} h, \quad (2.1)$$

где ε_{q1} и ε_{q2} – соответствующие величины сигналов нижнего и верхнего датчиков теплового потока в стационарном тепловом режиме; f – отношение величины сигнала датчика теплового потока верхнего теплообменника к соответствующему сигналу нижнего теплообменника в стационарном режиме; $\varepsilon_{\Delta T}$ – величина сигнала датчика разности температур теплообменников; K – тарировочный коэффициент; h – высота эталона.

2.2 Методика экспериментального определения фазового состава влаги и температуры начала замерзания пород

2.2.1 Существующие методики экспериментального определения фазового состава влаги и температуры начала замерзания пород. Методы исследования фазового состава воды в мерзлых породах многочисленны. На рис. 2-2 приведена классификация методов определения фазового состава влаги в мерзлых породах.

Анализ различных методик дана в работах (Комаров, 2003, Ершов и др., 2004, Ершов и др., 1979). Из этого анализа следует, что для засоленных пород наиболее предпочтительным является калориметрические методы. Калориметры подразделяются по способу подвода тепла (периодический, непрерывный, импульсный, адиабатический, монотонный и т.д.) или по способу проведения эксперимента (нагревания – охлаждения, сканирования и т.д.).



Рис. 2-2 Классификация методов определения фазового состава влаги в мерзлых породах (Комаров, 2003) .

Жидкостный изотермический калориметр используется для определения количества незамерзшей воды. Метод основан на измерении теплового эффекта, возникающего при оттаивании (частичном или полном) мерзлой породы. Суммарное количество тепла, пошедшее на нагревание образца мерзлого грунта, складывается из теплоты плавления и теплоты, затраченной на повышение температуры воды и скелета грунта. Поскольку полная теплоемкость калориметра известна, то, зная изменение температуры калориметрической жидкости, в которой находится образец, можно определить фазовый состав воды в мерзлых породах. Калориметрическое определение содержания незамерзшей воды в мерзлой породе

основано на измерении льдистости, а жидкая фаза находится по разности между общим содержанием воды и установленным количеством льда. Теплота фазового перехода лед-связанная вода в порах грунта принимается равной теплоте фазового перехода лед-свободная вода, а теплоемкость связанной воды – теплоемкости свободной воды.

Данный метод обеспечивает достаточно высокую точность и является распространенным методом исследования фазового состава влаги мерзлых пород в научно-исследовательских работах. Считается эталонным методом определения содержания незамерзшей воды и льда для глинистых пород в диапазоне температур от $-0,5$ до -10°C . Недостаток метода в большой его трудоемкости и использовании дорогого и нестандартного оборудования.

Адиабатический калориметр с непрерывным подводом тепла позволяет определять удельную теплоемкость скелета грунта одновременно с изучением фазового состава влаги, что ускоряет процесс исследования грунта. Для исследования в лабораторных условиях данный калориметр является наиболее приемлемым.

2.2.2 Методика экспериментального определения температуры начала замерзания калориметрическим методом. Температура начала замерзания определяется с помощью установки, представленной на рис. 2-3, которая состоит из массивного металлического корпуса с крышкой, в котором размещены четыре кассеты для исследуемого материала. В нижней части кассет расположены измерительные элементы, регистрирующие температуру образца. Датчики нулевой температуры выведены в гильзу в нижней части корпуса, который стыкуется с ноль-термостатом с помощью ограничительных колец.

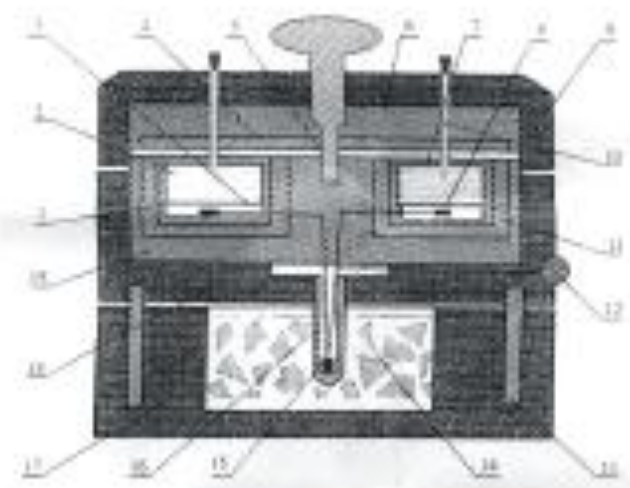


Рис. 2-3 Схема установки для определения температуры начала замерзания грунтов: 1 – кассеты для образцов; 2 – исследуемый образец; 3 – корпус датчиков температуры; 4 – изолятор; 5 – прижимной винт; 6 – крышка корпуса; 7 – крышка кассеты; 8 – датчики температуры; 9 – изолятор крышки корпуса; 10 – инициатор кристаллизации; 11 – изолятор кассеты; 12 – выходной разъем; 13 – ограничительное кольцо; 14 – смесь лед-вода; 15 – датчики нулевой температуры; 16 – гильза датчиков нуля; 17 – ноль-термостат; 18 – изолятор корпуса; 19 – металлический корпус

Принцип работы установки основан на регистрации динамики изменения температуры исследуемого образца в ходе его охлаждения. Переохлаждение воды в ходе замерзания сводится к минимуму (не более $0,1-0,3$ °С) за счет применения в данной установке инициаторов кристаллизации. Регистрация и регулирование температуры происходит с использованием компьютерной системы.

Эксперимент начинается с заполнения кассет, расположенных в корпусе установки 19 исследуемым материалом 2, кассеты закрываются крышками 7. Нуль-термостат 17 заполняется приготовленной из дистиллята смесью лед-вода и стыкуется с теплоизоляцией корпуса. При этом гильза 16 с датчиками нулевой температуры 15 погружается в смесь лед-вода.

Устройство, не закрытое крышкой 6, помещается в термостатируемую камеру, температура которой предварительно установлена на $5-8$ градусов ниже предполагаемой температуры начала замерзания. Крышка располагается рядом с устройством. Инициаторы кристаллизации помещаются также в камеру.

Через 1-2 часа регистрируется изменение температуры в устройстве, и после понижения температуры до $+2 - +3$ °С корпус установки закрывается крышкой 6, которая фиксируется винтом 5. При понижении температуры до $0,3-0,6$ °С через отверстия в крышке 6 вставляются инициаторы кристаллизации.

Температура начала замерзания определяется по характерным точкам на термограмме исходя из тарировочных характеристик установки (1 °С соответствует 191 микровольт).

2.2.3 Методика экспериментального определения количества незамерзшей воды калориметрическим методом. Определение количества незамерзшей воды во влажных грунтах осуществляется в следующей последовательности. Калориметрический стакан заполняется исследуемым материалом не более, чем на 90% своего свободного объема и взвешивается. Калориметр термостатируется в морозильной камере при температуре $(-10 - -20)$ °С в течение $(10-12)$ часов. После этого включается компьютерная система регулирования и измерения температуры в адиабатическом режиме. Затем включается нагреватель калориметрического стакана, установив подаваемое напряжение порядка 10 В, что обеспечивает мощность разогрева около $0,15$ Вт. Такой мощностью разогревается калориметр до температуры $-0,5$ °С. Затем переходим на большую мощность разогрева, подав на нагреватель напряжение порядка 20 В, и доводим температуру калориметра до $+2-+2,5$ °С. После этого постепенно уменьшается мощность разогрева до первоначального значения, наблюдая за изменением темпа разогрева и не допуская значительного разбаланса разности температур в отрицательную сторону. При нарастании темпа подъема температуры калориметра отключается нагреватель калориметрического стакана и ожидается выход температуры калориметра на постоянное значение, которое в последствии будет зафиксировано, как конечная температура талого образца

t_1 . Для определения теплоемкости скелета грунта можно разогрев снова продолжить до повышения температуры калориметра на 3-6 °С, фиксируя установившееся значение температуры после отключения нагревателя. После окончания опыта образец исследуемого материала извлекается из калориметрического стакана и методом термостатной сушки определяется его влагосодержание.

Количество льда в образце рассчитывается на основании термограммы разогрева согласно формуле:

$$G = \frac{Q - (C_k + C_v G_v + C_{ск} G_{ск})(T_m - T_m)}{L - (C_v - C_l)/(T_o - T_m)} \quad (2.2)$$

где C_k – теплоемкость пустого калориметра, Дж/К; C_v – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); C_l – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·К); $C_{ск}$ – удельная теплоемкость скелета материала, Дж/(кг·К); $G_{ск}$ – масса скелета материала, кг; G_v – масса воды в образце, кг; L – теплота фазового перехода воды в лед, Дж/кг; T_t – температура талого материала, °С; T_m – температура мерзлого материала, °С; T_o – температура начала замерзания воды в образце, °С; Q – количество теплоты, необходимое для подвода к калориметру, чтобы его температура изменилась от T_m до T_t , Дж.

При расчете Q учитывается теплота Q_n выделенная нагревателем согласно формуле

$$Q_n = \int I_n^2 R_n dt, \quad (2.3)$$

где I_n – ток нагревателя, А; R_n – сопротивление нагревателя, Ом; τ - время разогрева, с.

Учитывается также интегральная теплота разбаланса Q_p за счет тепловых утечек и разбаланса системы регулирования температуры.

Относительное количество незамерзшей воды в материале рассчитывается по формуле:

$$W_n = (G_v - G_l) / G_{ск}. \quad (2.4)$$

При корректном определении тарировочных параметров погрешность определения количества незамерзшей воды составляет не более 1% от общего количества влаги в образце.

2.3 Методика экспериментального определения теплоемкости пород

2.3.1 Существующие методики экспериментального определения теплоемкости пород.

Для экспериментального определения величины теплоемкости в мерзлом грунте в основном используются методы калориметрии. Калориметры подразделяются по способу подвода тепла (периодический, непрерывный, импульсный) или по способу ведения опыта (смешения, нагревания – охлаждения, адиабатический и изотермический калориметры).

В лабораторной практике используется несколько модификаций калориметров для определения теплоемкости пород. Наиболее широко используемыми для получения информации по теплоемкости и теплотам фазовых переходов при отрицательных температурах являются *методы низкотемпературной адиабатической калориметрии*. Ввод энергии в калориметр обычно осуществляется периодическим или непрерывным способом. Низкотемпературные калориметры можно классифицировать исходя из объема использованных ампул: от калориметров малого объема (до 1 см³) до калориметров среднего и большого объема (более 25 см³). Различие в объемах незначительно сказывается на точности измерений (Комаров, 2003).

2.3.2 Методика экспериментального определения теплоемкости калориметрическим методом.

Определение величины теплоемкости осуществляется в адиабатическом калориметре, измерение и регулирование температур в котором выполняется с помощью компьютерной системы. Калориметр разработан и изготовлен в институте проблем использования природных ресурсов и экологии Национальной академии наук Беларуси (ИПИПРЭ НАНБ) г. Минска.

Нами в калориметре определяется удельная теплоемкость грунта при положительных температурах и зависимость количества незамерзшей воды от температуры в цикле оттаивания.

Принцип калориметрической установки в создании адиабатических условий или условий контролируемого теплообмена вокруг калориметрического стакана с исследуемым образцом. Данный калориметр отличается сравнительно большим калориметрическим стаканом, что позволяет исследовать более представительные образцы грунта.

Основными элементами калориметрической установки (рис.2-4) являются корпуса калориметра 1 и крышки 2, калориметрический стакан 3 с нагревательным элементом 4, охранный стакан 5, охранный нагреватель 6, крышка охрannого стакана 7, дополнительный охранный нагреватель 8, датчик температуры калориметрического стакана 9, датчики разности температур охрannого и калориметрического стаканов 10, диск экранирующий 11.

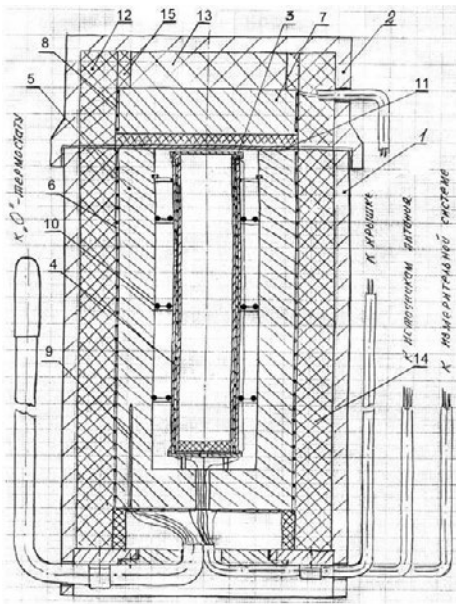


Рис.2-4. Схема калориметра: 1 – корпус калориметра в сборе; 2 – корпус крышки; 3 – стакан калориметрический в сборе; 4 – нагревательный элемент калориметрического стакана; 5 – стакан охранный; 6 – охранный нагреватель; 7 – крышка охранный стакана; 8 – дополнительный охранный нагреватель; 9 – датчик температуры калориметра; 10 – датчик разности температуры калориметрического и охранный стаканов; 11 – диск экранирующий; 12,13,14 – теплоизоляция; 15 – кольцо опорное

Калориметрический стакан состоит из гильзы, выполненной из нержавеющей стали и нагревательного элемента, выполненного из латунной трубки и проволочного нагревателя. При этом проволочный нагреватель расположен на внутренней поверхности латунной трубки и зафиксирован с помощью эпоксидной смолы. Система калориметрического стакана выполнена таким образом, что гильза входит в нагревательный элемент с зазором порядка 0,05 мм и это обеспечивает необходимый тепловой контакт. Гильза калориметрического стакана с нижнего торца закрывается резиновой заглушкой, а с верхнего – латунной крышкой. Внутренний диаметр гильзы калориметрического стакана составляет 20 мм, а длина его – 100 мм, что позволяет помещать в него до 30 мл исследуемого образца.

Для измерения температуры калориметра в корпус охранный стакана вмонтирована батарея из 5 медь-константановых термопар. Нулевые спаи термопар сведены в отдельный кабель, заканчивающийся металлическим наконечником, который помещается в термос, заполненный смесью дистиллированной воды со льдом.

Охранный стакан изготовлен из дюралюминия и имеет следующие размеры: внешний диаметр 68 мм, внутренний 34 мм и высоту 130 мм. На внешнюю поверхность охранный стакана и его крышку намотаны нагреватели 6 и 8 из манганиновой проволоки диаметром 0,25 мм. Между внешней поверхностью калориметрического и внутренней поверхностью охранный стаканов помещены датчики теплового потока в виде батареи медь-константановых термопар, помещенные на тонкие стеклотекстолитовые пластинки.

В торце крышки охранный стакана расположен экранирующий диск из латуни, отделенный от дополнительного охранный нагревателя слоем теплоизоляции из пенопласта.

Корпус калориметра 1 служит для создания равномерного слабоинтенсивного теплообмена по всей поверхности охранный стакана и крышки. Он выполнен двухслойным.

Слой, контактирующий с охранным стаканом, изготовлен из пенопласта и имеет толщину $d = 15$ мм. Внешний слой ($d = 6$ мм) изготовлен из стали.

Измерения и регулирования температуры калориметра осуществляются с помощью компьютерной системы с использованием компьютерного порта, выполненного в виде отдельного модуля, имеющего предусилитель, АЦП и ЦАП и соединенный с компьютером через принтерный порт (рис.2-5).

Система измерения и регулирования калориметра осуществляется по следующей схеме. На первый канал АЦП подается предварительно усиленный сигнал от датчика разности температуры калориметрического и охранныго стаканов. В зависимости от полярности этого сигнала, его величины и скорости его изменения на первый канал ЦАП передается управляющий сигнал и на его выходе появляется аналоговый сигнал, который подается на управляющий разъем стабилизированного источника Б5--45А, питающий охранный нагреватель калориметрического стакана.

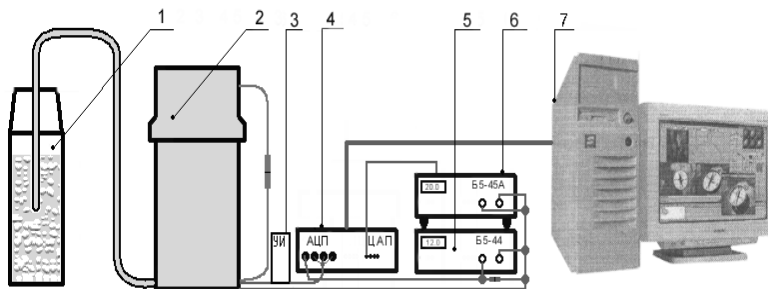


Рис. 2-5. Схема калориметрической установки: 1 – ноль-термостат; 2 – калориметр; 3 – блок усилителей постоянного тока; 4 – блок АЦП и ЦАП; 5 – источник питания калориметра; 6 – источник питания охранныго стакана; 7 – системный блок компьютера

Система регулирования температуры охранныго стакана организована таким образом, что направлена на поддержание нулевой разности температуры между калориметрическим и охранными стаканами и этим обеспечивает адиабатические условия для калориметрического стакана. При этом разбаланс температуры охранныго и калориметрического стаканов компьютерной системой интегрируется и записывается в таблицу данных.

На третий канал АЦП подается предварительно усиленный сигнал от основного датчика калориметра, расположенного в охранным стакане. Этот сигнал периодически записывается в таблицу данных. Следует отметить, что при нулевой разности температуры калориметрического и охранныго стаканов сигнал, фиксируемый на третьем канале, будет точно соответствовать температуре калориметрического стакана. Для того чтобы это соответствие сохранилось и при

разбалансировке регулируемой температуры в программу введены корректирующие параметры, учитывающие величину разбалансировки.

Для регистрации тока, питающего нагреватель калориметрического стакана от стабилизированного источника питания, на четвертый канал АЦП компьютерной системы с дополнительного сопротивления, последовательно включенного в цепь нагревателя, непосредственно подается разность напряжения. По величине этого сигнала оценивается текущая мощность нагрева калориметрического стакана и производится ее интеграция в соответствующую теплоту.

В процессе опытов компьютерная система периодически с интервалом в 100 секунд ведет регистрацию данных и графически визуализирует текущее состояние процесса на мониторе.

Определение удельной теплоемкости грунтов производится следующим образом. Калориметрический стакан заполняется определенным количеством исследуемого материала. Собранный калориметр помещается в термостатируемую камеру, температура которой устанавливается на 5-8 °С ниже минимальной температуры исследуемого диапазона. После понижения температуры калориметрического стакана до +(1-2) °С включается система поддержания адиабатических условий, через 20-30 мин фиксируется установившаяся температура в калориметре. После этого включается нагреватель калориметрического стакана, обеспечив мощность разогрева порядка 0,1 Вт. Разогрев калориметрический стакан с исследуемым образцом на (5-10)°С, нагреватель выключается и по истечении 20-30 минут фиксируется установившаяся температура.

Для получения зависимости удельной теплоемкости от температуры операцию разогрева необходимо провести в различных температурных диапазонах положительных температур.

После окончания калориметрических опытов извлекается исследуемый материал из калориметра и определяется его влагосодержание. Обработка результатов эксперимента производится по формулам

$$C_w = \frac{J^2 R_n \cdot \tau - C_k \cdot \Delta T}{G_w \cdot \Delta T} \quad (2.5)$$

где $C_{ск} = C_{yw}(1+W) - C_e \cdot W$, G_w – масса влажного грунта, кг; W – влагосодержание материала; ΔT – изменение температуры калориметра в цикле разогрева, °С; τ – продолжительность цикла разогрева, с; C_{yw} – удельная теплоемкость влажного материала, Дж/кг·К; $C_{ск}$ – удельная теплоемкость скелета материала, Дж/кг·К.

Обработка результатов эксперимента нами проводится с помощью компьютерной программы, которая использовалась для проведения опыта.

2.4. Методика исследования химического состава водных вытяжек пород

Для определения химического состава влаги в засоленных породах на данный момент применяется два метода:

- анализ поровых вод, извлеченных из пород
- анализ водных вытяжек

Для мерзлых вод основным методом изучения состава поровых вод является анализ водных вытяжек. Это объясняется сложностью отжатия поровой воды для грунтов с низким значением влажности. Также метод отжатия не используется для сильно-льדיстых грунтов, поскольку оттаявший лед сильно снижает исходное значение минерализации поровой влаги.

Анализ водной вытяжки начинается с приготовления самой водной вытяжки по ГОСТ 26423-85. Для этого набирается грунт в воздушно-сухом состоянии (навеска 1:5 - 100 гр.грунта к 500 мл. дистиллированной воды) и перемешивается 5 минут. Когда водная вытяжка готова, приступают к определению химического состава и рН.

Определение рН по ГОСТ 26423-85. Настройку рН-метра проводят по трем буферным растворам с рН 4,01, 6,80 и 9,18. Способ приготовления - фиксонал или стандарт-титрование. рН замеряется в растворе, который перед замером взбалтывается и отстаивается в течении 5 минут.

После определения рН в первую очередь определяются карбонаты (CO_3), бикарбонаты (HCO_3^-) и хлориды (Cl^-), так как хлориды испаряются. Титрование проводится в конических колбах.

Анализ на *карбонаты и бикарбонаты* проводится по ГОСТ 26424-85 в одном растворе. Для определения карбонатов и бикарбонатов добавляются индикаторы: для карбонатов (CO_3) – фенолфталеин, для бикарбонатов (HCO_3^-) – метилоранж.

Определение начинается с добавления индикатора (1-2 капли). Если в веществе есть CO_3 при добавлении фенолфталеина раствор приобретет малиновую окраску. Для определения концентрации раствор титруется разбавленным раствором 0,02н HCL до исчезновения окраски. В этой же пробе определяются бикарбонаты (HCO_3^-). При добавлении метилоранжа при наличии бикарбонатов раствор станет желтым. Для определения концентрации раствор также титруется раствором 0,02нHCL до перехода от желтой окраски к оранжевой.

Хлориды по ГОСТ 26425-85. Индикатором для определения хлоридов является K_2CrO_4 10% - хромовокислый калий 10%. Титрант для хлоридов — 0,02н AgNO_3 -азотнокислое серебро. Точную концентрацию раствора проверяют титрованием. Для этого отбирают 10 см³ раствора хлорида концентрации 0,01 моль/дм³ в коническую колбу, приливают 1 см³ раствора

хромовокислого калия и титруют раствором азотнокислого серебра до перехода окраски от желтой к красно-бурой. Титрование проводят три раза и для расчета точной концентрации используют среднее арифметическое результатов трех титрований.

Определение *жесткости* по ГОСТ 26428-85 (Ca^{2+} ; Mg^{2+}).

Аликвота на Ca^{2+} ; Mg^{2+} - 25 мл. В раствор добавляется 50мл дистиллированной воды. При определении Ca^{2+} раствор должен быть щелочным. Для этого в раствор добавляется 2мл 2-нормального NaOH. В водной вытяжке могут быть вещества, которые не определяются. Для нейтрализации ионов Mn добавляется гидроксидомин гидрохлорид. Чтобы убрать влияние Zn и Cu добавляется диэтилдитиокарбомат натрия. Для определения концентрации добавляется индикатор мурексид.

Титруют кальций раствором трилона Б до перехода окраски от розовой к сиреневой и регистрируют расход титранта по бюретке. Затем нейтрализуют оттитрованный раствор соляной кислотой, разбавленной 1:4, до перехода окраски в исходную (розовую). Прибавляют 5 см³ хлоридно-аммиачного буферного раствора и титруют магний раствором трилона Б до перехода окраски от розовой к синей. По окончании титрования регистрируют расход титранта.

Для определения *сульфатов* по ГОСТ 26426-85 готовится раствор из 20 см³ анализируемой вытяжки, дистиллированной воды 20-30 см³, 3 капли раствора метилового красного и соляной кислоты.

Стакан с разбавленной и подкисленной пробой вытяжки нагревают до кипения. К горячему раствору прибавляют 5 см³ раствора хлористого бария с массовой долей 10 %. Стакан накрывают часовым стеклом и помещают на кипящую водяную баню на 2-3 ч для отстаивания осадка.

Затем делают пробу на полноту осаждения сульфата бария. Для этого в прозрачный отстоявшийся раствор приливают несколько капель раствора хлористого бария с массовой долей 10 %. Затем приступают к фильтрованию. Осадок на фильтре промывают горячей дистиллированной водой, подкисленной соляной кислотой, до прекращения реакции на барий. Фильтр с осадком подсушивают на воронке и ставят в тигеле в холодную муфельную печь. Осадок прокаливают в течение 30 мин при температуре 700-750°C. Затем тигель охлаждают в эксикаторе и взвешивают с погрешностью не более 0,001 г.

Na⁺ и K⁺ определяются по разнице между суммой анионов и суммой катионов.

2.5 Методика расчетного определения параметров фазового и химического состава поровых растворов засоленных пород и криопэггов с помощью программного продукта

2.5.1 Существующие расчетные методы. Методики прогноза температуры начала замерзания и фазового состава засоленных пород и криопэггов обычно ограничены рассмотрением случая, когда поровый раствор можно условно рассматривать как бинарный (двухкомпонентный раствор $H_2O + NaCl$). В их основе лежат различные модификации криоскопической формулы из теории растворов с учетом и без учета изотонического коэффициента (Комаров, 2003, Пермяков, Романов, 2000). Они могут использоваться для прогноза характеристик пород морского типа засоления при относительно небольшой и средней степени минерализации поровых растворов пород. Для случая произвольной концентрации бинарного раствора методика определения температур замерзания и фазового состава влаги предложена в работах И.А. Комарова (Комаров, 2003, Комаров, 2001). Для криопэггов и рассолов засоленных пород, минерализация которых может достигать 250 г/л и более, необходим учет полиионного состава проб и возможности выпадения вновь образованных твердых фаз. В определенной степени это распространяется также на породы с континентальным и техногенным типом засоления.

Химический аспект моделирования поведения водно-солевых систем в области отрицательных температур сводится к расчету фазового состава образований различного валового химического состава характеризующихся определенной температурой и давлением. Используя модель К. Питцера (Pitzer, 1987), в лаборатории CRELL(США) для семикомпонентной системы $Na-K-Ca-Mg-Cl-SO_4-H_2O$ была разработана модель «FREZCHEM2» для вычисления химического равновесия между водными растворами электролитов, льдом и солями (Mironenko et al., 1997). Однако для анализа данных водных вытяжек пород и проб криопэггов кроме указанных семи компонентов необходимо учитывать наличие карбонатов, бикарбонатов, соединений железа и др., а также наличие газовой фазы H_2O , CO_2 , CH_4 и др. Реальная физическая картина природных процессов указывает на целесообразность учета: давления вышележащих пород; ситуации, когда порода (криопэг) обменивается каким-то компонентом с окружающей средой (режим открытой системы) и когда при промерзании из порового раствора породы (криопэга) выпадают вновь образованные твердые фазы солей, не переходящие в жидкую фазу при повышении температуры.

2.5.2 Методика моделирования фазового и химического равновесия поровых растворов засоленных пород и криопэггов. Указанных ограничений лишена разработанная модель

«FREEZBRINE» (Комаров, Мироненко, 2010; Мироненко, Поляков, 2009). В отличие от «FREZCHEM2», которая была откалибрована по экспериментальным данным (Nelson, Thompson, 1954), «FREEZBRINE» откалибрована по данным (Гиттерман, 1937). Она включает в себя следующие химические компоненты, которые могут быть образованы в системе: Раствор (23 компонента): катионы и анионы: Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃ и др.; нейтральные: H₂O(l), CaCO_{3,aq}, MgCO_{3,aq}, и др.; Твердые фазы (56 компонентов): H₂O(cr,l), NaCl·2H₂O, Na₂SO₄·10 H₂O, Ca SO₄· 2 H₂O, SYLVITE, MAGNESITE, CALCITE, DOLOMITE, SIDERITE и др.; Газы (8 компонентов): H₂O,g ,CH_{4,g} , CO_{2,g}, и др. (Комаров, Кияшко, 2012)

Равновесный состав системы при заданных температуре, давлении и валовом химическом составе определяется методом минимизации свободной энергии Гиббса при множестве линейных ограничений в виде системы уравнений баланса масс. Приведенная функция свободной энергии системы g , содержащей M твердых фаз, водный раствор (компоненты: вода и растворенные частицы) и L -компонентную газовую фазу

$$g = \frac{G}{R\theta} = \sum_{k=1}^M \mu_k^o n_k + (\mu_w n_w + \sum_{j=1}^J \mu_j n_j) + \sum_{l=1}^L n_l \mu_l, \quad (2.6)$$

где G – свободная энергия; n – мольное число компонентов; μ – химические потенциалы компонентов; μ_w – потенциал воды; μ_k^o – стандартный потенциал однокомпонентной твердой фазы k (соли или лед); R – универсальная газовая постоянная; θ – абсолютная температура °C; J и L – число соответственно растворенных и газовых частиц.

Уравнения для нахождения параметров уравнения 2.6 рассмотрены в работе Комарова И.А., Мироненко М.В. (Комаров, Мироненко и др., 2012). Задача расчета равновесного состава сводится к нахождению минимума функции (2.6), удовлетворяющему уравнению электронейтральности. Параметры, необходимые для расчета этих величин представляют собой предмет базы термодинамических данных для модели. Константы равновесия химических реакций (произведения растворимости, константы диссоциации и гидролиза, растворимости газов) и Питцеровские константы, для нее согласованы, частично получены заново и аппроксимированы как функция температуры Ж. Марионом (Marion, 2002).

Программа «FREEZBRINE» работает в режимах: «закрытые или открытые системы», «равновесная или фракционная кристаллизация». В режиме равновесной кристаллизации при изменении термобарических условий все ранее образованные фазы системы (лед, соли, раствор электролита) могут вновь взаимодействовать между собой. Фракционная кристаллизация – случай, когда мобильная фаза после частичной кристаллизации перемещается в другое место, пространственно отделяясь от ранее отложенных твердых фаз (либо раствор отделен от ранее

образованных солей коркой льда, которая мешает им взаимодействовать) т.е. выходит из материального баланса рассола.

При выбранных режимах модель позволяет рассчитывать серии равновесий : «промерзание - оттаивание» – расчет ведется в интересующем интервале температур, с заданным шагом её изменения при постоянном давлении, вычисления заканчиваются по достижении точки эвтектики (полная кристаллизация раствора); «испарение - конденсация» – расчет ведется при постоянных температуре и давлении, задается конечное содержание воды в граммах, а начальное содержание принимается равным 1000 г; «изменение давления» – расчет ведется в определенном интервале давлений с заданным шагом его изменения при фиксированной температуре.

Входные данные в программу: исходная общая минерализация и концентрация основных компонентов химического состава водной вытяжки порового раствора или пробы криопэга (Na, K, Ca, Mg, Fe, Cl, SO₄, HCO₃ и др.), полученные на основании химического анализа. Выходные данные включают информацию: содержание воды, ионов и солей в жидкой, твердой и газообразной фазах ; плотность и объемы фаз; pH растворов; масса в молях, моляльность, химический потенциал и др., которые рассчитаны для определенного интервала и заданного шага по температуре или давлению.

Предлагаемая модель не учитывает наличия в исследуемом рассоле органических примесей, сульфатредукцию (результат жизнедеятельности соответствующих бактерий) и окислительно-восстановительные химические реакции, типа восстановления сульфатов с образованием сульфидов и сероводорода. При низких температурах скорости взаимодействия растворов с минералами вмещающих алюмосиликатных пород малы по сравнению со скоростями установления водно-солевых и водно-газовых равновесий, а также с замерзанием или оттаиванием растворов, поэтому алюмосиликатные породы химически инертны.

Работа модели «FREEZBRINE» проверена на большом экспериментальном и тестовом материале. Сопоставление результатов, полученных по ней и модели «FREEZCHEM2» при аналогичном исходном химическом составе криопэга, также показало удовлетворительную сходимость с некоторыми различиями, связанными с разной калибровкой этих моделей.

С помощью модели «FREEZBRINE» были обработаны исходные натурные данные по составу 48 криопэгов п-ова Ямал, полученные для различных геоморфологических уровней (террасы, пойма, лайда), содержащие сведения о месте отбора криопэгов, глубине их расположения, общей минерализации, химическом составе (Крицук, 2010), а также исходные натурные данные по химическому составу водных вытяжек засоленных пород нескольких исследованных участков п-ова Ямал.

Алгоритм работы с программой - в приложении П.6

Выводы к главе 2

1. Проведенный анализ существующих экспериментальных методов определения теплофизических характеристик пород и их фазового состава показывает, что для всего спектра талых и мерзлых пород различного генезиса и возраста наиболее предпочтительными для опробования в лабораторных условиях являются: для определения коэффициента теплопроводности - стационарные методы, которые позволяют надежно определять коэффициент в области фазовых переходов для засоленных пород; для температуры начала замерзания, теплоемкости и фазового состава засоленных пород - методы адиабатической калориметрии и криоскопии.

2. Экспериментальное исследование температуры начала замерзания, фазового состава влаги и теплофизических свойств пород осуществлялось в лаборатории ОАО «Криос» на аппаратурной базе, разработанной в институте ИПИПРЭ Национальной Академии Наук Белоруссии (г. Минск).

3. Установка для определения коэффициента теплопроводности пород реализует метод пластины с коррекцией по эталонным телам, дающий аппаратурную погрешность не более 10%. Исследовались образцы пород ненарушенного сложения с природной влажностью и льдистостью, отбираемые из монолитов.

4. Адиабатический калориметр с непрерывным подводом тепла позволяет определять удельную теплоемкость скелета породы одновременно с изучением фазового состава влаги. Данный калориметр отличается сравнительно большим калориметрическим стаканом, что позволяет исследовать представительные образцы пород. Аппаратурная погрешность определения теплоемкости скелета не превышает 5%. При корректном определении тарировочных параметров погрешность определения количества незамерзшей воды составляет не более 3% от общего количества влаги в образце, однако в расчетах принимается, что теплота фазового перехода лед-связанная вода в порах грунта принимается равной теплоте фазового перехода лед-свободная вода, а теплоемкость связанной воды – теплоемкости свободной воды. Исследовались образцы пород ненарушенного сложения

5. Принцип работы установки для определения температуры начала замерзания основан на регистрации динамики изменения температуры исследуемого образца в ходе его охлаждения (криоскопический метод). Переохлаждение воды в ходе замерзания сводится к минимуму (не более 0,1-0,3 °С) за счет применения в данной установке инициаторов кристаллизации.

Температура начала замерзания определяется по характерным точкам на термограмме исходя из тарировочных характеристик установки (1°C соответствует 191 микровольт).

6. Для определения химического состава влаги в засоленных породах использовались стандартизованные методы работы с водной вытяжкой.

7. Натурные определения химического состава водных вытяжек засоленных пород и проб криопэгов носят, как правило, фрагментарный (одномоментный) характер. Это обуславливают целесообразность применения для выявления закономерностей и прогноза изменения их фазового и химического состава в зависимости от термобарических условий, современных методов термодинамического моделирования.

8. Предложенная методика, включающая адаптированный и откалиброванный программный продукт, способы обработки результатов исходных стандартных химических анализов проб и затем полученной информации, является целиком оригинальной, не имея аналогов в зарубежной и отечественной практике и позволяя наиболее полно и адекватно, на сегодняшний день, отразить характер, протекающих в поровых растворах засоленных пород и криопэгах, процессов криогенного метаморфизма.

3 Характеристика объектов исследования

3.1 Краткая характеристика исследуемых образцов пород

Объектом выполненных исследований являются засоленные дисперсные супесчаные и суглинистые породы. Исследования теплопроводности, температуры начала замерзания и количества незамерзшей воды проводились на породах ненарушенного сложения, полученные путем обработки монолитов.

В качестве образцов грунтов использовались пески, супеси и суглинки, отобранные из аллювиальных алV, озерных I III-IV отложений, а также из салехардской свиты среднего плейстоцена (сал mII2-4), казанцевских отложений (каз mIII1), являющимися верхним горизонтом мощной толщи ямальской серии.

По данным гранулометрического состава, грунты ненарушенного сложения представлены легкими и тяжелыми пылеватыми суглинками, супесями пылеватыми и песчанистыми, песками пылеватыми (по классификации дисперсных грунтов по гранулометрическому составу В.В. Охотина) (Таблица 3-2). Гранулометрический состав определялся в лаборатории НПО Криос по ГОСТ 12536-79 ситовым методом.

Влажность и плотность пород, а также определение границ текучести и раскатывания (таблица 3-1) проводилось по ГОСТ 5180-84. Влажность определялась методом высушивания до постоянной массы. Значения влажности для исследуемых песков изменяется в пределах от 0,23 до 0,32 д.е., для супесей - от 0,24 до 0,49 д.е., для суглинков - от 0,24 до 0,35. Граница текучести определялась пенетрацией конусом. Значения влажности на границе текучести для супесей 21,9...30,5 %, для суглинков 28,9...44,0 %. Граница раскатывания определялась методом раскатывания в жгут. Значения влажности на границе раскатывания для супесей 18,2...25,4 %, для суглинков 20,7...27,8 %. Число пластичности для супесей меняется в пределах от 2,5 до 6,5 %, для суглинков – от 7,8 до 16,9 %. Значения плотности для пород получены методом режущего кольца и изменяются для песков от 1,8 до 1,9 г/см³, для супесей от 1,6 до 2,0 г/см³, для суглинков от 1,8 до 2,0 г/см³.

Определение содержания незамерзшей воды в исследуемых образцах калориметрическим способом показало, что большее количество незамерзшей воды содержится в суглинках (рис. 3-1).

Закономерности изменения химического состава грунтов экспериментально изучались на грунтах нарушенного сложения. Химический состав исследованных грунтов на основе

данных водной вытяжки детально приведен для каждого образца в таблицах 3-3...3-8. Преобладающими анионами являются хлориды, а для некоторых проб - гидрокарбонаты, катионами – натрий и калий.

По степени засоленности породы характеризуются как слабо-, средне- и сильно засоленные. Степень засоленности песков изменяется от 0,05 до 0,32%, супесей – от 0,05 до 0,94 %, суглинков от 0,40 до 1,20 %.

Подготовка образцов нарушенного сложения: для исследования химического состава грунта доводились до воздушно-сухого состояния и после определения гранулометрического состава готовилась водная вытяжка по ГОСТ 26423-85.

Участок 1, 2, 3 расположены в районах Бованенковского, Южно-Тамбейского и Харасавейского месторождений соответственно. Характерные геологические колонки для скважин исследуемых участков представлены на рис. 3-2. Участок 4 расположен в районе оазиса Эхийн-Гол и представлял интерес как случай очень больших минерализаций (от 36 до 350 г/л)

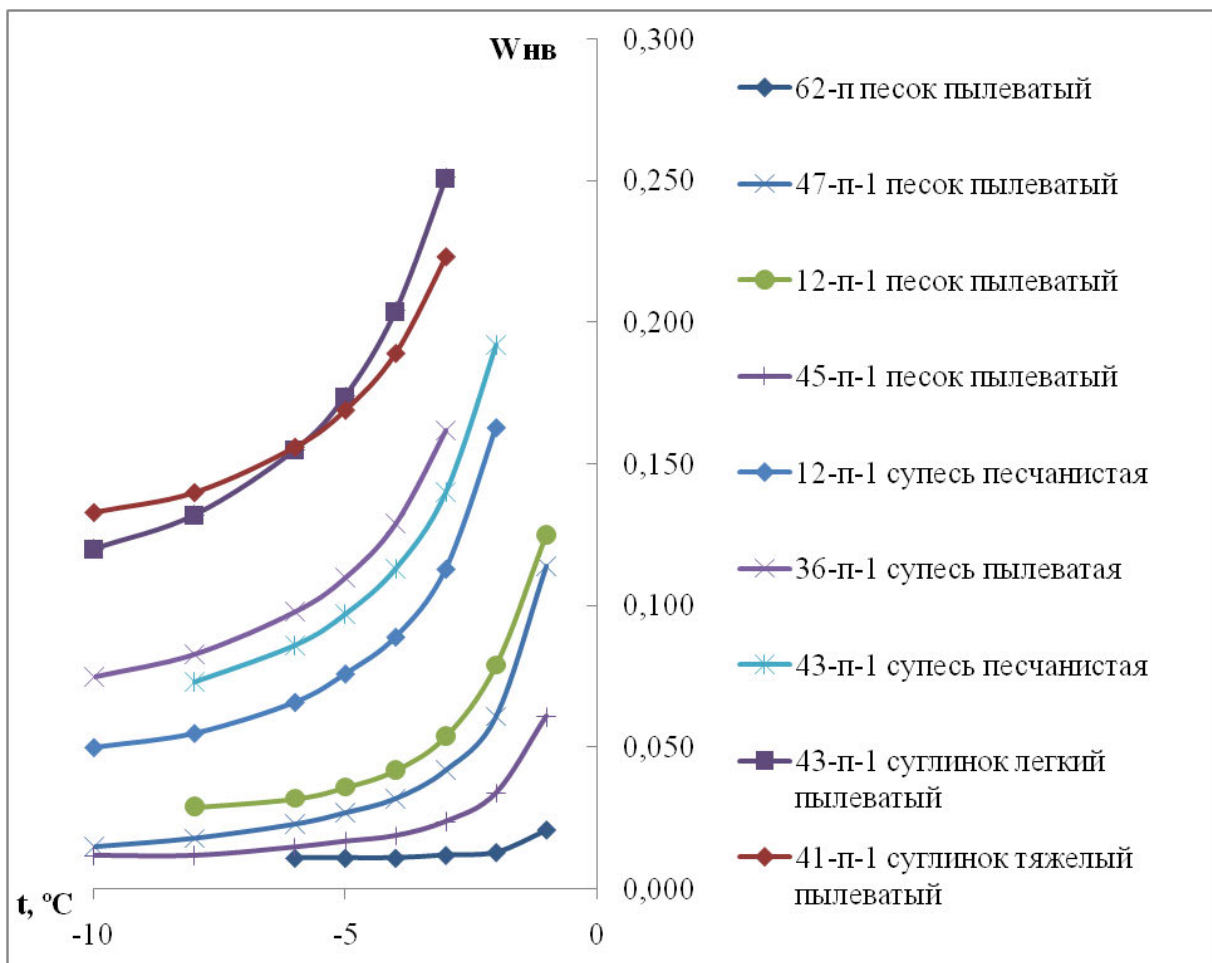


Рис. 3-1 Зависимость содержания незамерзшей воды в исследованных породах от температуры

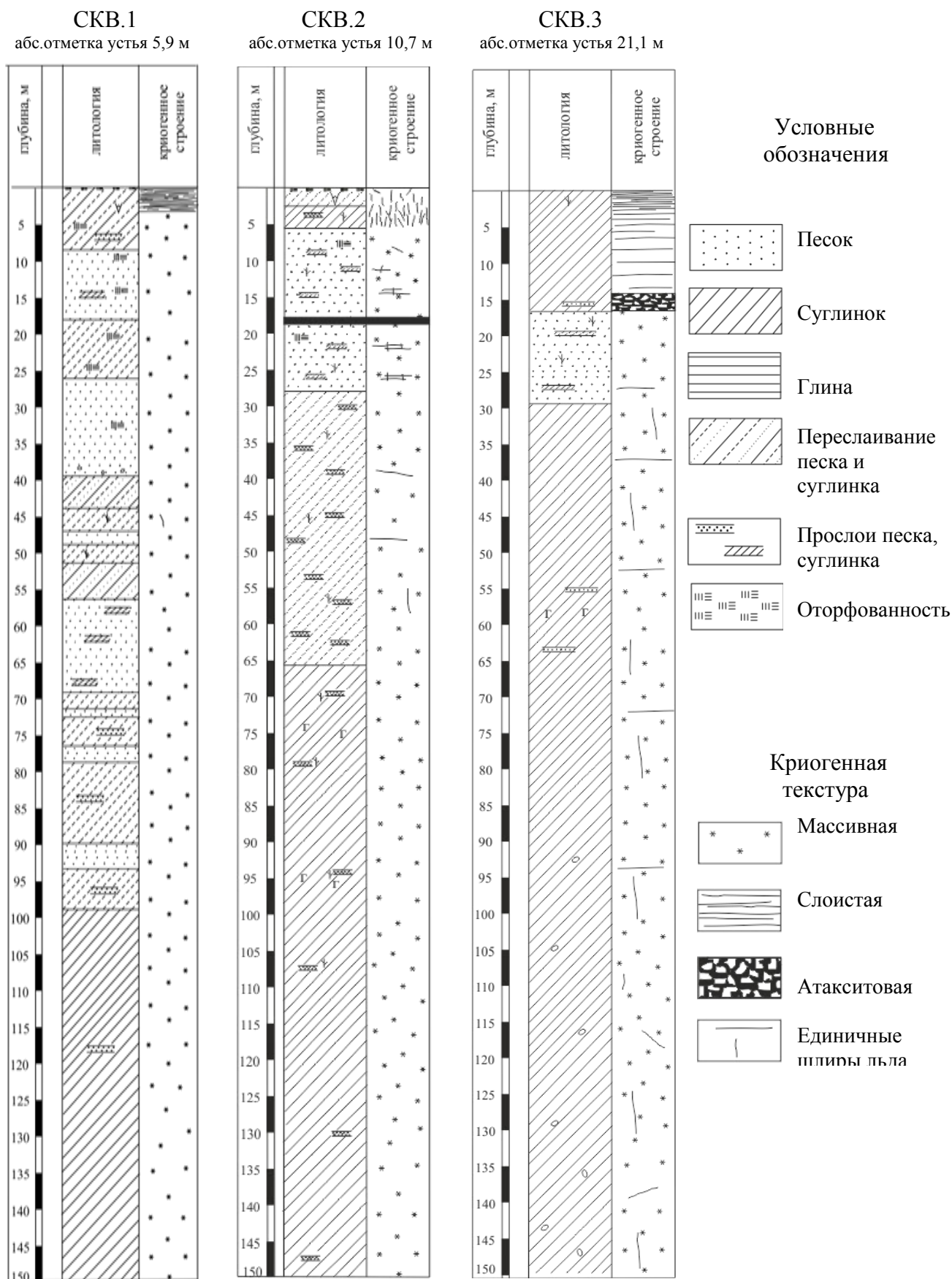


Рис. 3-2 Характерные геологические колонки для скважин исследуемых участков п-ова Ямал: скв.1 – Участок 1, скв.2 – Участок 2, скв.3 – Участок 3

Характеристика водно-физических свойств исследованных пород

№ пп	Интервал отбора, м		Геологический индекс	Наименование грунта	Влажность	Температура определения W_w , Т°С	W_w	Пластичность, %			Плотность, г/см ³		Степень засоленности D_{sal} , %	С ухой остаток, мг/л
	от	до						Влажность на границе текучести W_L	Влажность на границе раскатывания W_p	Число пластичности I_p	Частиц грунта p_s	плотность, г/см ³		
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
1	4,0	4,5	aIV	супесь пылеватая	0,28	-4	0,04	30,5	24,3	6,2	2,64	1,92	0,190	416
2	2,0	2,7	aIV	супесь пылеватая	0,49	-4	0,069	23,1	20,5	2,6	2,67	1,58	0,045	120
3	7,6	7,9	aIV	супесь пылеватая	0,46	-4	0,052	24,7	19,1	5,6	2,64	1,60	0,105	190
4	6,7	7,2	лпIV	супесь пылеватая	0,38	-4	0,05	30,0	24,4	5,6	2,64	1,69	0,13	268
5	2,1	2,4	лпIV	супесь пылеватая	0,35	-4	0,045	28,4	21,9	6,5	2,65	1,76	0,055	130
6	6,9	7,6	мIII ₁	песок пылеватый	0,23	-4	0,01				2,65	1,93	0,05	126
7	33,4	34,0	мIII ₁	песок пылеватый	0,25	-5	0,01				2,65	1,92	0,00	152
8	14,8	15,5	мIII ₁	песок пылеватый	0,28	-4	0,01				2,63	1,88	0,10	198
9	24,0	25,0	мIII ₁	песок пылеватый	0,27	-4	0,02				2,63	1,93	0,15	342

1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
10	14,0	15,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,25	-4	0,015				2,62	1,88	0,13	272
11	17,0	18,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,24	-4	0,05				2,64	1,90	0,110	260
12	30,0	31,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,25	-4	0,02				2,64	1,93	0,070	168
13	15,0	15,7	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,26	-4	0,01				2,64	1,88	0,071	120
14	30,0	31,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,24	-4	0,01				2,64	1,94	0,070	130
15	9,5	10,0	<i>m</i> Ш ₁	сулесь пылеватая	0,25	-4	0,07	25,5	20,7	4,8	2,65	1,94	0,285	580
16	15,0	16,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,32	-4	0,04				2,61	1,76	0,055	146
17	21,0	22,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,26	-4	0,03				2,64	1,84	0,225	492
18	30,0	30,6	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,24	-4	0,04				2,65	1,86	0,305	748
19	4,6	5,1	<i>m</i> Ш ₁	сулинок легкий пылеватый	0,35	-4	0,078	37,0	25,6	11,3	2,66	1,77	0,395	726
20	10,0	10,6	<i>m</i> Ш ₁	сулесь песчанистая	0,27	-4	0,044	23,8	18,4	5,4	2,68	1,89	0,095	236
21	16,0	17,0	<i>m</i> Ш ₁	сулесь песчанистая	0,28	-4	0,035	24,2	19,1	5,1	2,67	1,88	0,165	375
22	9,5	10,5	<i>m</i> Ш ₁	сулесь пылеватая	0,30	-4	0,061	28,3	22,4	5,9	2,66	1,88	0,115	261
23	30,0	31,0	<i>m</i> Ш ₁	песок пылеватый	0,26	-4	0,049				2,66	1,88	0,320	716

1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
24	24,0	25,0		супесь песчанистая	0,29	-4	0,051	27,9	25,4	2,5	2,63	1,88	0,425	1106
25	41,0	42,0	мП ₂₄	суглинок легкий пылеватый	0,29	-3	0,19	35,9	25,0	10,9	2,69	1,92	0,90	1996
26	80,0	81,0	мП ₂₄	суглинок тяжелый пылеватый	0,29	-3	0,19	41,6	27,8	13,8	2,70	1,92	1,15	2498
27	59,0	60,0	мП ₂₄	суглинок легкий пылеватый	0,26	-4	0,14	36,3	25,2	11,1	2,69	1,93	0,85	1940
28	149,0	150,0	мП ₂₄	суглинок тяжелый пылеватый	0,27	-4	0,14	38,8	25,1	13,7	2,70	1,94	0,95	2124
29	39,0	40,0	мП ₂₄	супесь пылеватая	0,24	-4	0,13	26,1	20,8	5,3	2,66	1,96	0,59	1372
30	79,0	80,0	мП ₂₄	суглинок тяжелый пылеватый	0,26	-4	0,14	37,2	24,6	12,7	2,69	1,90	1,20	2816
31	149,0	150,0	мП ₂₄	суглинок тяжелый пылеватый	0,27	-4	0,12	36,0	22,8	13,2	2,64	1,92	0,68	1360
32	79,0	80,0	мП ₂₄	суглинок легкий пылеватый	0,24	-3	0,20	28,9	20,7	8,2	2,66	1,94	1,00	2020
33	119,0	120,0	мП ₂₄	песок пылеватый	0,25	-3	0,02				2,64	1,86	0,18	384
34	148,0	149,0	мП ₂₄	суглинок легкий пылеватый	0,24	-3	0,21	30,6	22,4	8,2	2,67	1,95	0,90	1760

1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
35	39,0	40,0	$m\Pi_{24}$	супесь песчанистая	0,28	-3	0,14	26,5	21,2	5,3	2,65	1,90	0,495	1024
36	79,0	80,0	$m\Pi_{24}$	суглинок легкий пылеватый	0,26	-3	0,25	31,4	23,1	8,3	2,68	1,89	0,760	1908
37	148,5	149,5	$m\Pi_{24}$	суглинок тяжелый пылеватый	0,26	-3	0,22	38,5	25,4	13,1	2,67	1,96	0,805	1760
38	100,0	101,0	$m\Pi_{24}$	суглинок тяжелый пылеватый	0,31	-3	0,20	44,0	27,1	16,9	2,70	1,89	0,960	1830
39	79,0	80,0	$m\Pi_{24}$	суглинок легкий пылеватый	0,28	-3	0,155	31,8	22,3	9,5	2,70	1,92	0,640	1320
40	149,0	150,0	$m\Pi_{24}$	супесь пылеватая	0,25	-3	0,111	27,3	21,0	6,3	2,69	1,92	0,935	1300
41	69,4	70,5	$m\Pi_{24}$	суглинок легкий пылеватый	0,25	-3	0,193	31,5	23,7	7,8	2,68	1,96	0,745	1600
42	109,7	110,5	$m\Pi_{24}$	суглинок легкий пылеватый	0,26	-3	0,204	32,1	23,2	8,9	2,69	1,95	0,745	1556
43	149,0	150,0	$m\Pi_{24}$	суглинок легкий пылеватый	0,24	-3	0,169	32,0	23,2	8,8	2,68	1,96	0,800	1584

1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
44	39,0	40,0	$m\Pi_{24}$	суглинок легкий пылеватый	0,27	-3	0,179	34,5	23,5	11,0	2,69	1,89	1,015	2080
45	69,0	70,0	$m\Pi_{24}$	песок пылеватый	0,28	-3	0,062				2,65	1,84	0,160	460
46	110,0	111,0	$m\Pi_{24}$	суглинок тяжелый пылеватый	0,27	-3	0,235	40,1	26,7	13,4	2,70	1,98	0,925	1980
47	49,0	50,0	$m\Pi_{24}$	супесь песчанистая	0,27	-3	0,113	21,9	18,2	3,7	2,67	1,91	0,425	1000
48	90,0	91,0	$m\Pi_{24}$	песок пылеватый	0,24	-3	0,054				2,63	1,91	0,195	414

Таблица 3-2

Таблица гранулометрического состава исследованных пород

1	Альпитуда отбора, от	Альпитуда отбора, до	4	5	6	7	8	Гранулометрический состав, %											20	21	22	
								9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19				
						Суммарная весовая W _{tot} (среднее значение)	За счет незамерзшей воды W _w	> 10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005	Среднее значение плотности грунта	Степень заполнения пор S _r , дол.ед	Суммарная объемная льдистость itot, дол.ед.	
min	-2	-3	IV	алл.	песок пыл.	23,58	1	0	0	0	0	0	0,1	2,4	39	9,3	2,1	2,4	1,748	0,793	0,377	
max	4,7	4,5				31,77	2	0	0	0	0	0,4	0,5	34	74	47	2,1	2,4	1,96	0,911	0,453	
ср. знач						26,38	1,517					0,1	0,2	16	55	27	2,1	2,4	1,867	0,869	0,406	
min	-3,5	-1,9	IV	алл.	суглинок	33	4,8	0	0	0	0	0	0	0	2,7	46	30	21	1,668	0,916	0,401	
max	3,5	3,1				54,7	14,2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7	46	30	21	1,88	1	0,583
ср. знач						42,84	7,24														1,746	0,952
min	1,2	0,7	III-3	озерн.	суглинок	33,9	0	0	0	0	0	0	0	0	17	24	11	40		85,17		
max	3,5	3				36,74	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3	17	32	17	40		96,1	
ср. знач						35,32																90,63
min	-28,7	-29,2	III	морск	песок мелк.	23,2	1,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	72,5	4,6	1,4	0,0	3,1	1,8	0,9	0,3	
max	-16,0	-17,0				27,3	6,3	0	0	0	0,0	0,4	2,2	91,4	20,9	6,2	0,0	3,1	1,9	1,0	0,4	
ср. знач						25,4	3,0					0,2	0,8	79,3	15,8	4,2				1,86	0,93	0,37

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
min	-33,4	-34,0	III	морск	песок пыл.	20,0	0,8	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,5	18,0	2,9	0,0	0,0	1,6	0,7	0,3
max	2,4	1,4				89,5	12,1	0	0	0	0,4	0,5	8,0	74,4	74,8	53,8	0,0	0,0	2,0	1,0	0,5
ср. знач						27,8	3,61				0,01	0,06	0,61	37,0	42,9	18,1			1,85	0,92	0,37
min	-33,4	-34,0	III	морск	супесь	20,0	0,8	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,1	18,0	2,9	0,0	0,0	1,0	0,7	0,2
max	2,4	1,4				89,5	14,8	0	0	0	0,4	0,5	8,0	74,4	74,8	53,8	7,1	12,0	2,0	1,0	0,5
ср. знач						28,0	7,8				0,1	0,6	24,3	47,3	19,1	3,5	5,9	1,80	0,94	0,33	
min	-26,5	-26,9	III	морск	суглинок	21,6	6,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	58,1	18,1	19,2	1,5	0,8	0,1
max	6,1	-1,5				108,2	25,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	58,1	18,1	19,2	2,0	1,0	0,6
ср. знач						34,6	13,3												1,82	0,96	0,29
min	-124,3	-125,3	I-II (1)	морск	песок пыл	19,2	2,4	0	0	0	0,0	0,0	0,0	3,1	18,7	6,8	0,0	0,0	1,8	0,8	0,2
max	-32,0	-33,0				30,9	9,3	0	0	0	0,0	0,1	1,2	74,4	74,9	48,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,4
ср. знач						25,1	4,4						0,2	25,1	53,9	19,5			1,86	0,92	0,33
min	-112,0	-113,0	I-II (1)	морск	супесь	22,4	4,4	0	0	0	0,0	0,0	0,0	7,3	26,0	13,9	1,0	4,8	1,8	0,9	0,1
max	-35,0	-36,5				32,4	23,2	0	0	0	0,0	0,0	0,1	15,0	72,3	43,0	6,0	10,0	2,0	1,0	0,3
ср. знач						25,8	11,1						0,1	9,9	55,7	24,7	2,6	7,2	1,91	0,96	0,25
min	-117,0	-118,0	I-II (1)	морск	суглинок	21,9	10,6	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,8	0,1
max	-22,5	-23,0				29,1	21,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,3
ср. знач						27,5	16,6								0,3	12,0	41,4	15,3	31,0	1,90	0,96

Данные по химическому составу засоленных песков для Участка 1.

№ пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Cl	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	W, д.с.	Dsal, %	Cps, %
	от	до		% экв	% экв	% экв	% экв	% экв	% экв			
1	6,9	7,6	песок пылеватый	60,0	33,0	7,0	84,0	6,0	10,0	0,22	0,05	0,22
2	33,4	34,0	песок пылеватый	26	65	9	76	4	20	0,24	0,00	0,00
3	14,8	15,5	песок пылеватый	42	45	13	69	17	14	0,26	0,10	0,38
4	24,0	25,0	песок пылеватый	80	13	7	87	5	8	0,27	0,15	0,56
5	14,0	15,0	песок пылеватый	61	32	7	84	5	11	0,25	0,13	0,53
6	17,0	18,0	песок пылеватый	80	13	7	76	13	11	0,24	0,11	0,46
7	30,0	31,0	песок пылеватый	71	21	8	69	14	17	0,27	0,07	0,26
8	15,0	15,7	песок пылеватый	40	40	20	80	7	13	0,23	0,07	0,31
9	30,0	31,0	песок пылеватый	34	43	23	78	9	13	0,25	0,07	0,27
10	15,0	16,0	песок пылеватый	21	57	22	70	15	15	0,33	0,06	0,18
11	30,0	31,0	песок пылеватый	93	3	4	86	8	6	0,23	0,32	1,35
12	69,0	70,0	песок пылеватый	87	7	6	90	5	5	0,29	0,16	0,55
13	21,0	22,0	песок пылеватый	88	10	2	77	9	14	0,24	0,23	0,95
14	30,0	30,6	песок пылеватый	89	10	1	85	6	9	0,25	0,31	1,23
15	90,0	91,0	песок пылеватый	69	18	13	90	3	7	0,25	0,20	0,78
16	119,0	120,0	песок пылеватый	73	22	5	91	5	4	0,26	0,18	0,68

Данные по химическому составу засоленных супесей для Участка 1

№ пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	W, де.	Dsal, %	Cps, %
	от	до										
1	24,0	25,0	супесь песчанистая	93	4	3	89	6	5	0,26	0,43	1,64
2	2,0	2,7	супесь пылеватая	23	57	20	52	23	25	0,56	0,05	0,09
3	49,0	50,0	супесь песчанистая	91	5	4	94	3	3	0,26	0,43	1,62
4	9,5	10,0	супесь пылеватая	58	15	27	92	3	5	0,24	0,29	1,18
5	16,0	17,0	супесь песчанистая	86	12	2	87	5	8	0,27	0,17	0,62
6	39,0	40,0	супесь пылеватая	84	12	4	97	2	2	0,25	0,59	2,32
7	39,0	40,0	супесь песчанистая	81	13	6	95	2	3	0,28	0,50	1,78
8	10,0	10,6	супесь песчанистая	58	27	15	79	10	11	0,28	0,10	0,36
9	6,7	7,2	супесь пылеватая	31	52	17	79	10	11	0,33	0,13	0,39
10	7,6	7,9	супесь пылеватая	34	53	13	70	10	20	0,37	0,11	0,30
11	9,5	10,5	супесь пылеватая	53	33	14	84	4	12	0,33	0,12	0,37
12	4,0	4,5	супесь пылеватая	61	23	16	86	7	7	0,26	0,19	0,72
13	149,0	150,0	супесь пылеватая	86	10	4	96	1	3	0,26	0,94	3,44
14	2,1	2,4	супесь пылеватая	19	58	23	45	22	33	0,35	0,06	0,17

Данные по химическому составу засоленных суглинков для Участка 1

№ скв.	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	W, де.	Dsal, %	Cps, %
	от	до										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	39,0	40,0	суглинок легкий пылеватый	90	6	4	95	3	2	0,26	1,02	3,76
2	110,0	111,0	суглинок тяжелый пылеватый	86	9	5	95	2	3	0,29	0,93	3,14
3	79,0	80,0	суглинок тяжелый пылеватый	87	6	7	96	3	1	0,30	1,20	3,80
4	79,0	80,0	суглинок легкий пылеватый	87	9	4	96	2	2	0,28	0,76	2,65
5	100,0	101,0	суглинок тяжелый пылеватый	86	6	8	93	3	4	0,32	0,96	2,94
6	79,0	80,0	суглинок легкий пылеватый	84	14	2	95	2	3	0,28	0,64	2,25
7	148,5	149,5	суглинок тяжелый пылеватый	82	14	4	95	2	3	0,28	0,81	2,85
8	41,0	42,0	суглинок легкий пылеватый	91,0	8,0	1,0	95,0	3,0	2,0	0,30	0,90	2,96
9	80,0	81,0	суглинок тяжелый пылеватый	88,0	11,0	1,0	95,0	3,0	2,0	0,30	1,15	3,67
10	59,0	60,0	суглинок легкий пылеватый	69	26	5	92	4	4	0,25	0,85	3,30
11	149,0	150,0	суглинок тяжелый пылеватый	89	9	2	96	2	2	0,28	0,89	3,07
12	149,0	150,0	суглинок тяжелый пылеватый	84	10	6	96	2	2	0,22	0,68	3,07
13	79,0	80,0	суглинок легкий пылеватый	92	6	2	96	2	2	0,25	1,00	3,92

Таблица 3-5 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	148,0	149,0	суглинок легкий пылеватый	91	7	2	96	2	2	0,27	0,90	3,23
15	69,4	70,5	суглинок легкий пылеватый	89	7	4	95	3	2	0,25	0,75	2,87
16	109,7	110,5	суглинок легкий пылеватый	87	8	5	95	2	3	0,27	0,75	2,66
17	149,0	150,0	суглинок легкий пылеватый	81	14	5	95	2	3	0,25	0,80	3,07
18	4,6	5,1	суглинок легкий пылеватый	46	23	31	91	3	6	0,34	0,40	1,17

Таблица 3-7

Данные по химическому составу засоленных пород для Участка 3.

№пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Cl	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	W, де.	Dsal, %	Cps, %
	от	до										
				% экв								
1	22,5	23,1	песок	92	7,5	0,35	77,8	5,59	16,6	0,32	0,39	0,339
2	27,5	28,1	песок	80	18,7	1,55	73,6	6,22	20,2	0,23	0,19	0,120
3	35	35,6	суглинок	82	13,5	4,25	94,9	2,26	2,81	0,33	0,84	0,907
4	50,1	50,7	суглинок	76	11,2	13	92,5	3,83	3,66	0,35	1,34	1,450
5	69,8	70,4	суглинок	74	12,6	13,4	92	4,13	3,89	0,34	1,05	1,048
6	90	90,6	суглинок	62	14,5	23,4	91,8	4,09	4,09	0,29	0,89	0,869
7	120,1	120,7	суглинок	69	19,4	11,7	90,1	4,94	4,94	0,19	0,55	0,533
8	149,5	150,1	суглинок	63	25,4	11,7	89,9	5,07	5,07	0,18	0,48	0,506

Данные по химическому составу засоленных пород для Участка 2.

№ пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Cl	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺ +K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	W, де.	Dsal, %	Cps, %
	от	до										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14,7	15,3	песок	37	46	17	65	1	34	0,23	0,07	3,0
2	99,8	100,4	суглинок	88	6	6	94	2	4	0,25	0,93	35,9
3	179,4	180,0	суглинок	67	6	27	83	7	10	0,12	0,52	41,5
4	200,0	200,6	песок	79	8	13	67	8	25	0,18	0,15	8,3
5	9,5	10,1	песок	68	23	9	77	9	14	0,26	0,18	6,9
6	79,0	80,0	суглинок	86	11	3	94	1	5	0,23	0,84	35,2
7	330,0	331,0	суглинок	68	1	31	82	11	7	0,19	0,32	16,6
8	389,0	391,0	суглинок	66	1	33	80	11	9	0,20	1,29	60,6
9	2,4	2,7	песок	58	26	16	70	9	21	0,26	0,12	4,6
10	25,0	26,0	супесь	77	19	4	90	4	6	0,21	0,71	32,7
11	69,5	70,0	суглинок	87	11	2	92	4	4	0,22	1,11	48,0
12	110,0	111,0	суглинок	79	17	4	91	3	6	0,24	0,87	34,9
13	149,0	150,0	песок	62	14	24	41	24	35	0,25	0,12	4,8

В качестве сильно-минерализованных пород рассмотрены солончаки оазиса Эхийн-Гол – одного из наиболее изученных оазисов Монголии (Голованов, 2006). Исследование представляет интерес как случай заэвктетических по NaCl концентраций в засоленных породах.

Оазис расположен на юго-западе Монголии в крайнеаридной пустыне Заалтайская Гоби в водосборном бассейне бессточной Толи-Булакской котловины на подгорной равнине массива Цаган–Богдо. Подгорная равнина сложена песчано-щебнистыми пролювиальными отложениями. Климатические условия отличаются резкой засушливостью и контрастностью. Осадков выпадает менее 50 мм в год и только в теплый период года. Высокие летние температуры воздуха (от +20°C до +58°C) сменяются выхолаживанием (от -20°C до -50°C) в зимнее время. Отрицательная температура воздуха сохраняется с ноября по март. При полном отсутствии зимних осадков это приводит к глубокому и интенсивному промерзанию почв, которое проникает на глубину до 1,5 метров. Основное описание условий изложено в работе (Кияшко, Комаров, Голованов, 2014)

Почвенные растворы солончаков (табл. 3-8) были получены методом отпрессовывания, анализ проводился по стандартной методике анализа водной вытяжки. В солончаковых водах содержание сульфатов одного порядка с содержанием хлоридов и даже в ряде проб превосходит его. Преобладающим катионом является натрий.

Химический состав почвенных растворов солончаков оазиса Эхийн-Гол (Панкова и др., 2004).

Числитель - мг-экв/л, знаменатель - г/л

Мелп	Глубина, см	Влажность, %	Щелочность		Cl-	SO4--	Ca++	Mg++	Спектральный		Минерализация, г/л
			CO3--	Общая в HCO3--					Na+	K+	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Солончак. Разр. 4											
1	2-7	10,94	Нет	15,60	4740	673,5	13,99	352,72	4785,0	179,20	297,1
				0,95	142,2	32,38	0,28	4,23	110,05	6,99	
2	7-12	12,51	Нет	11,92	4530	1419,6	5,99	307,75	5763,7	121,60	346,0
				0,73	135,9	68,25	0,12	3,69	132,56	4,74	
3	12-25	11,58	0,5	6,66	3320	2029,2	10,99	281,77	5220,0	89,60	324,7
			0,01	0,41	99,6	97,56	0,22	3,38	120,06	3,49	
4	25-50	14,37	Нет	6,95	1638	677,2	30,61	137,75	2172,8	42,49	136,0
				0,42	49,15	32,57	0,61	1,65	49,96	1,66	
5	50-85	19,14	Нет	3,48	580,0	331,8	33,47	64,95	793,9	12,80	53,8
				0,21	17,40	15,95	0,67	0,78	18,26	0,50	
Солончак. Разр. 46.											
6	3-10	23,70	23,15	83,95	3183,48	2679,12	15,52	183,03	5621,94	340,73	385,59
			0,69	5,12	111,42	124,00	0,33	2,20	129,20	13,32	
7	10-20	64,30	7,45	43,42	1650,0	1576,39	19,80	229,80	3347,96	153,48	222,57
			0,22	2,65	57,75	75,79	0,40	2,76	77,00	6,00	
8	20-40	20,60	3,48	19,87	513,60	891,80	28,92	120,90	1287,01	28,65	94,91
			0,10	1,21	17,98	42,87	0,58	1,45	29,60	1,12	
9	40-80	26,00	Нет	3,18	328,80	245,50	30,92	27,98	513,06	10,23	36,65
			Нет	0,19	11,51	11,80	0,62	0,33	11,80	0,40	

3.2 Краткая характеристика исследуемых проб криопэгов п-ова Ямал

Для анализа информации использовались данные Крицук Л.Н. (Крицук, 2010); Стрелецкой И.Д. (Стрелецкая, Лейбман, 2002) и Фотиева С.М. (Фотиев, 1999), Трофимова В.Т. (Трофимов, 1975). Исходные данные приведены в таблицах 3-9...3-11. Разделение по геоморфологическому уровню целесообразно принять в соответствии с принятым в работе Л.Н. Крицук (Крицук, 2010): лайдовый, пойменный и террасовый типы. В основе этого разделения лежат условия залегания и генетические признаки.

На лайде криопэги имеют слабый напор либо безнапорны; их химический состав практически идентичен составу морской воды, а минерализация значительно выше (80-112 г/л) (таблица 3-9). Значения рН, в основном, кислые. Глубина расположения линз криопэгов от 1,6 до 9,8 м.

Криопэги широко распространены на поймах воды слабонапорные. В химическом составе преобладают ионы хлора (до 97-100 %). Сульфаты (в отличие от криопэгов лайдового типа) в пойменных криопэгах либо вообще отсутствуют, либо составляют незначительный процент, а содержание иона Na^+ колеблется в больших пределах (от 34 до 87 %-экв.) за счет резкого возрастания (до 42 %-экв.) ионов Mg^{+2} . Минерализация проанализированных пойменных криопэгов изменяется от 6,02 до 91,9 г/л, что свидетельствует о различии их генезиса либо разной степени криогенной метаморфизации (таблица 3-11). Среда кислая, у большинства криопэгов значения рН ниже 7. Криопэги зафиксированы на глубинах от 5,8 до 12 м.

В пределах речных террас воды напорные, бессульфатные, в различной степени минерализованы (от 6,2 до 43,5 г/л) (таблица 3-10). Наледная разгрузка криопэгов этого типа была установлена на правом берегу реки Сеяха. Значения рН от 6,2 до 8,2. Глубина залегания от 2,5 до 11 м.

Исходные данные для криопэггов расположенных на лайдах п-ова Ямал.

	Место отбора (лайды)	Глубина линз криопэггов, м	УГВ, м (над ур.моря)	М, г/л	Формула Курлова						рН
					Cl	SO4	HCO3	NaKa	Mg	Ca	
1	О-в Белый	-	-	111,8	97	2	1	76	21	3	6,8
2	Мыс Хаесале	-	-	83,4	96	3	1	76	20	4	6,9
3	Острова Шараповы Кошки	-	-	93,2	91	8	1	76	20	4	-
4	Мыс Бурунный	-	-	103	90	9	1	78	19	2	-
5	Пос Харасавей	3,5	1,2	31,3	90	10	0	96	4	0	-
6	Мыс Харасавей	3,2	1,4	80	90	9	1	78	19	3	-
7	О-в Литке	4,6	1,5	72,8	94	4	2	76	21	3	7,2
8	О-в Литке	2	1	74,9	95	10	1	73	23	4	6,4
9	О-в Литке	2	1,5	101	94	5	1	78	19	3	6,2
10	Побережье бухты Шарапов Шар	3,8	0,6	71,1	97	3	0	94	5	1	-
11	Побережье бухты Шарапов Шар	9,8	1,2	98,3	95	5	0	85	13	5	-
12	Побережье бухты Шарапов Шар	4,2		79,8	94	6	0	78	18	4	-
13	Побережье бухты Шарапов Шар	1,6		35,3	54	46	0	77	19	4	-

Исходные данные для криопэггов расположенных на террасах п-ова Ямал.

	Место отбора (террасы)	Глубина линз криопэггов, м	Глубина линз криопэггов, м	М	Формула Курлова						рН
					Cl	HCO ₃	SO ₄	NaKa	Mg	Ca	
1	Междуречье р.Нябы и Седаты-Яха	11	3,5	32,7	93	7	0	77	20	3	7,5
2	Склон долины р.Се-Яха	9	7	43,5	98	2	0	72	24	4	-
3	Терраса озера Халевто	>10	5	49,4	99	1	0	68	26	6	-
4	Склон морской террасы	7,7	4	27,6	99	1	0	77	20	3	7
5	Склон морской террасы (верхняя часть)	2,5	2,5	19,7	95	1	4	80	17	3	6,8
6	Склон морской террасы	6,1	4,2	26,1	98	1	1	79	18	3	8,2
7	Склон морской террасы	>10	7,2	41,6	99,7	0,3	0	66	27	7	6,2
8	Склон морской террасы	>10	5	6,2	92	4	4	81	15	4	6,5
9	Склон морской террасы (нижняя часть)	5	3,8	28,4	99	1	0	69	28	3	6,6
10	II морская терраса, хасырей	9,4	5,7	47,34	99	1	0	47	31	22	-
11	Междуречье р.Морды-Яха, Юмбыто-Яха	5,4	3,3	31,3	99	1	0	53	29	18	-
12	Склон II морской террасы, водораздел	7,9	6,8	37,2	100	0	0	64	26	10	-
13	Склон III морской террасы	9,2	4,5	50	100	0	0	85	15	0	-
14	Склон III морской террасы рек Надуйяха, Те-Суце	3,5	3	59,6	99	0	1	37	32	31	-

Исходные данные для криопэггов расположенных на поймах п-ова Ямал.

	Место отбора (поймы)	Глубина линз криопэггов, м	УГВ, м (над ур. моря)	М, г/л	Формула Курлова						pH
					Cl	HCO ₃	SO ₄	NaKa	Mg	Ca	
1	Древняя пойма р.Пекхансе	5,8		9,1	89	11	0	87	10	3	7,1
2	Отмель р. Ёркута-Якха	6,5		63,7							-
3	Низкая пойма р.Марре-Салле	>12		91,9	97	3	0	77	21	2	6,8
4	Низкая пойма р.Марре-Салле	7		86,4	99	1	0	70	27	2	6,9
5	Пойма р.Марре-Салле	10		69,7	100	0	0	63	30	7	5,3
6	Пойма р.Явар-Яха	6,8		47,6	100	0	0	69	22	9	5,3
7	Пойма р.Явар-Яха	10,1	1,2	83,8	99,0	1	0	59	33	8	6,4
8	Древняя пойма р.Надуй-Яха		1,4	6,02	100	0	0	42	42	16	2,8
9	Пойма р.Надуй-Яха		1,5	48,8	99	1	0	34	32	17	4,8
10	Пойма р. Морды-Яха	7,3	1	53,7	96	4	0	72	25	3	-
11	Отмель р. Морды-Яха	6	1,5	81,1	98	2	0	76	22	2	-
13	-		0,2	64,8	100	0	0	87	13	0	-
14	Пойма р.Харасавей	8,1	0,8	50,2	97	2,6	0,4	72	25	3	-
15	Пойма р. Хальмер-Яха	8,6	0,6	107	92	1	7	72	25	3	-
16	Пойма р.Хард-Яха	8,2	1,2	23,25	99	1	0	76	19	5	-

3.3 Методика обработки исходной информации о химическом составе криопэггов и водных вытяжек засоленных пород

3.3.1 Методика обработки исходной информации по химическому составу криопэггов.

Для расчета в программе необходимо ввести данные по химическому составу в моль/кг. Как правило, данные минерализованных вод криопэггов, получаемые в лаборатории, представлены трех возможных размерностях: г/л, мг-экв/л, экв-%

Химический состав минерализованных вод криопэггов определяется по ГОСТ 26449.1-85, 26449.2-85. Используя известные зависимости различных форм выражения химического состава, можно получить формулу перехода от экв-% к моль/кг

$$\text{мг-экв/л} = \frac{\text{мг/л}}{\text{ат.вес}} \quad (3.1)$$

$$\text{Экв-}\% = \frac{\frac{\text{мг-экв}}{\text{л}}}{\sum_{\text{кат-ан}}} \times 100 = \frac{\frac{\text{мг}}{\text{л}}}{\sum_{\text{кат-ан}} \text{ат.вес}} \times 100 \quad (3.2)$$

Т.о. для каждого элемента

$$\text{г/л} = \frac{\sum_{\text{кат-ан}} \text{экв}\% \times \text{ат.вес}}{100} \quad (3.3)$$

Сумма всех элементов в г/л численно равна минерализации. Зная минерализацию, можно определить единственное неизвестное в формуле:

$$\sum_{\text{кат-ан}} = \frac{M}{\sum_{\text{всех эл-тов}} \left(\frac{\text{экв}\% \times \text{ат.вес}}{100} \right)} \quad (3.4)$$

Зная эту величину, можно рассчитать значение любого катиона или аниона в г/л.

Для программы необходимо иметь все значения в моль/кг. Формула перехода

$$\text{Моль/кг} = \frac{\text{г/л}}{\text{ат.вес}} \quad (3.5)$$

Т.о для каждого элемента минерализованных вод криопэггов

$$\text{Моль/кг} = \frac{\sum_{\text{кат-ан}} \text{экв}\% \times \text{ат.вес}}{100 \times \text{ат.вес}} = \frac{\sum_{\text{кат-ан}} \text{экв}\%}{100}, \quad (3.6)$$

где $\sum_{\text{кат-ан}}$ определяется по формуле (3.4)

При вводе полученных данных в программу необходимо учитывать валентность элементов и обращать внимание на корректность округления. Для исключения ошибок следует проверять введенные данные на электронейтральность: сумма катионов равна сумме анионов.

В таблице 3-12 приведен пример перевода исходных данных по химическому составу для минерализованных вод криопэггов в экв-% в данные в моль/кг для ввода в программу.

Таблица 3-12

M, г/л	атом.вес	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na+K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	∑ ан- кат
		35,5	61	48	23	12	20	
91,9	экв-%	97	3	0	77	21	2	0,628
	моль/кг	1,567	0,048	0,000	1,244	0,339	0,032	
	в прогр.	1,567	0,048	0,000	1,244	0,170	0,016	

Все полученные данные для ввода в программу представлены в приложении 1 (П.1.1-П.1.3).

3.3.2 Методика обработки исходной информации о химическом составе водных вытяжек засоленных пород. При работе с водными вытяжками сложность представляла разработка методики пересчета лабораторных данных по суммарному содержанию солей в породе, на 100 грамм грунта в данные, действительные для 1 литра растворителя. Методики СНиП для исследования химического состава как для воды, так и для грунта очень похожи: проводится титрование при схожих катализаторах. Значит, данные для грунта можно использовать для получения данных для содержащейся в породе влаги.

Степень засоленности определяется в лаборатории по ГОСТ 26423-85. Порядок определения таков, что образец породы вначале помещают в сушильный шкаф, удаляя тем самым всю содержащуюся в ней влагу. Затем берут навеску грунта равную 100 гр, и растворяют ее в 1 литре воды. Получается, что все растворенные в грунтовой влаге соли при высушивании остались в породе, а при добавлении 1 л. воды растворились в ней.

В лабораторных условиях изучается вода с растворенными в ней элементами. Полученные значения содержания катионов и анионов даются на 100 гр изначально взятого грунта. Т.о. получается количество солей, изначально присутствовавших в исследуемой пробе грунта.

Для обработки данных по программе FreezeBrine необходимо знать содержание катионов и анионов во влаге исходной пробы, а не во всех 100 гр. грунта. Количество влаги в грунте характеризует параметр «влажность породы». Зная влажность и степень засоленности, можно найти концентрацию порового раствора:

$$C_{ps} = \frac{D_{sal}}{D_{sal} + W} \times 1000, \text{ г/л} \quad (3.7)$$

Чтобы произвести пересчет элементов, содержащихся на 100 гр. породы в элементы на литр растворителя (в данном случае, дистиллированная вода), была использована универсальная единица экв %. Содержание элементов в процентном соотношении одинаково как для 100 гр. навески грунта, так и для 1 литра растворителя. Используя полученные значения

концентрации порового раствора, и зная содержания элементов в экв-%, по формуле перехода (3.8) пересчитано содержание элементов в моль/кг для ввода в программу. В значении минерализации взята рассчитанная концентрация порового раствора.

$$\text{Моль/кг} = \frac{\text{экв}\% \times (C_{ps} / (\sum \text{всех эл-тов} (\frac{\text{экв}\% \times \text{ат.вес}}{100})))}{100} = \frac{\text{экв}\% \times C_{ps}}{\sum \text{всех эл-тов} (\text{экв}\% \times \text{ат.вес})}, \quad (3.8)$$

При вводе полученных данных в программу необходимо учитывать валентность элементов и обращать внимание на корректность округления. Для исключения ошибок следует проверять введенные данные на электронейтральность: сумма катионов равна сумме анионов.

Используя полученную формулу, для расчета в программе FREEZEBRINE были переведены из экв-% в моль/кг данные водных вытяжек 16 проб по пескам, 14 проб по супесям и 18 проб по суглинкам. Фрагмент полученных данных представлен в таблице 3-13.

Таблица 3-13

№ скв	Валентность			1	1	2	1	2	2	Σ ан-кат
	Атомный вес			35,5	61	48	23	12	20	
Глубина, м	Dsal, %	W, %	Cps, г/л	Cl	HCO ₃	SO ₄	Na+K	Mg	Ca	
1 6,9-7,6	0,05	22	2,27	60	33	7	84	6	10	0,0339
				0,0204	0,0112	0,0024	0,0285	0,0020	0,0034	
				0,0316	0,0000	0,0012	0,0285	0,0010	0,0017	
2 2,0-2,7	0,05	56	0,89	23	57	20	52	23	25	0,0123
				0,0028	0,0070	0,0025	0,0064	0,0028	0,0031	
				0,0099	0,0000	0,0012	0,0064	0,0014	0,0015	
6 79-80	0,64	28	22,35	84	14	2	95	2	3	0,3604
				10,7461	3,0775	0,3460	7,8740	0,0865	0,2162	
				0,3532	0,0000	0,0036	0,3423	0,0036	0,0054	

Все полученные данные для ввода в программу представлены в приложении 1 (П.1.4 - П.1.7).

Выводы к главе 3

1. В химическом составе водных вытяжек исследованных засоленных пород (пески, супеси, суглинки), характеризующихся различным гранулометрическим и химическим составом, степенью засоленности, преобладающими анионами являются хлориды, а для некоторых проб - гидрокарбонаты, катионами – натрий и калий.
2. Основная часть исследованных криопэггов приурочена к западной и юго-западной частям п-ова Ямал. Разделение по геоморфологическому уровню приняты в соответствии с разделением в работе Л.Н. Крицук: лайдовый, пойменный и террасовый типы. В основе этого разделения лежат условия залегания и генетические признаки. Минерализация исследуемых криопэггов составляет 10-110 г/л, состав хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов.
3. Для исследования закономерностей изменения фазового и химического состава, теплофизических характеристик с помощью моделирования в программе Freezebrine как для криопэггов, так и для засоленных грунтов, разработаны методы подготовки данных стандартного химического анализа для ввода в программу.
4. Исследуемые засоленные породы относятся к нескольким участкам, расположенным в районах различных месторождений п-ова Ямал.

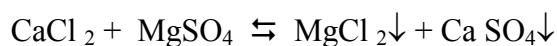
Глава 4. Закономерности изменения фазового и химического состава в процессе криогенного метаморфизма криопэгов п-ова Ямал

4.1 Существующие представления о криометаморфизации морской воды в диапазоне отрицательных температур

Под криогенной метаморфизацией химического состава природных вод понимается вся совокупность физико-химического преобразования состава растворенных газов, минеральных и органических веществ и состояния окислительно-восстановительных, кислотно-основных и водно-солевых систем в результате формирования и таяния льда и воздействия отрицательной температуры (Иванов, 1987). Криогенный метаморфизм морской воды протекает в широком температурном диапазоне от $-1,8^{\circ}\text{C}$ до -32°C .

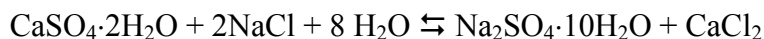
Закономерности формирования солевого состава и минерализации морской воды при последовательном вымораживании были выявлены К.Э. Гиттерманом (Гиттерман, 1937). Он проводил промораживание искусственно приготовленного раствора, соответствующего по химическому составу основным солям морской воды (по Фульду). Основываясь на полученных К.Э. Гиттерманом результатах, Б.А. Савельевым (Савельев, 1971) было рассчитано количество льда, остаточного рассола и солей в зависимости от температуры. Экспериментальные работы по промораживанию морской воды проводились также Рингером В.В. (Ringer, 1906), Нельсоном К.Х. и Томпсоном Т.Г. (Nelson, Thompson, 1954). Более поздние работы - Цуриков В.Л., Назинцев Ю.Л., Ричардсон С., Келлер Е. и др. - только уточняли данные, или по-другому их интерпретировали.

Результаты экспериментов по промораживанию морской воды различных авторов имеют существенные отличия. Так, согласно К.Н. Нельсону и Т.Г. Томпсону, полное выпадение всех солей в твердую фазу соответствует эвтектической температуре кристаллизации $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ около $-53,7^{\circ}\text{C}$, при этом выпадение KCl начинается при $-30,0^{\circ}\text{C}$, а выпадение $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – при $-37,9^{\circ}\text{C}$. По К.Э. Гиттерману температура полного выпадения всех солей равна $-36,0^{\circ}\text{C}$ соответствующая температуре выпадения хлористого магния. Хлористый кальций при этом в результате реакции обмена переходит в сернокислый кальций, который может выпадать при температуре $-17,0^{\circ}\text{C}$:



По данным К.Э. Гиттермана стадия десульфатизации кончается при температуре $-22,6^{\circ}\text{C}$, а затем концентрация Na_2SO_4 в жидкой фазе возрастает, достигая второго

максимума при $-35,6^{\circ}\text{C}$. Это явление связывается Б.А. Савельевым и Л.А. Жигаревым (Савельев, 1971, Жигарев, 1997) с регенерацией солей, а именно химическим взаимодействием гипса с хлористым натрием согласно реакции:



До температуры $-21,6^{\circ}\text{C}$ реакция протекает слева вправо, а ниже $-21,6^{\circ}\text{C}$ с момента кристаллизации NaCl в обратном направлении, что не приводит к накоплению мирабилита и хлористого кальция в рассоле.

Экспериментальные исследования авторов обладают одним общим недостатком, важным при рассмотрении криометаморфизма криопэггов: они игнорировали факт присутствия карбонатов, бикарбонатов и ряда других ионов солей в растворе. Рингер и Гиттерман исходили из того, что эвтектическая точка карбоната кальция равна $-1,9^{\circ}\text{C}$, т.е. очень близка к точке замерзания морской воды с соленостью 35‰ . При замерзании такой воды карбонат кальция должен кристаллизоваться вместе со льдом и, таким образом, карбонатов в рассоле не должно быть. Нельсон и Томпсон, замораживая природную морскую воду, просто не определяли содержание карбонатов.

Методика определения температуры формирования ионно-солевого состава криопэга, предложенная С.М. Фотиевым (Фотиев, 2009), базируется на экспериментальных данных К.Э. Гиттермана (Гиттерман, 1937). Исходя из анализа данных по промерзанию морской воды применительно к криопэгам морского генезиса С.М. Фотиевым предложено различать три стадии криогенного метаморфизма состава криопэга: 1 стадия – в интервале температур от 0 до $-1,8^{\circ}\text{C}$, охлаждение рассола без изменения его химического состава и минерализации; 2 стадия - в интервале температур от $-1,8$ до $-7,4^{\circ}\text{C}$, концентрирование рассола; 3 стадия – в интервале температур от $-7,4$ до $-22,5^{\circ}\text{C}$, десульфатизация обусловленная выпадением мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Основные граничные значения температуры между тремя выделенными стадиями это температура начала: кристаллизации льда; выпадения мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$); выпадения гидрогалита ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

С.М. Фотиев вслед за К.Э. Гиттерманом, а также К. Нельсоном и Т. Томсоном (Nelson, Thompson, 1954) считал, что практическое отсутствие бикарбонатов на всех трех стадиях криогенного метаморфизма – характерная закономерность криогенного преобразования солевого состава морской воды. Однако, в химическом составе криопэггов присутствуют карбонаты, бикарбонаты и т.д. (табл. 3-9...3-11).

Используя модель К. Питцера (Pitzer 1987) для расчета коэффициентов активности и активности воды, в лаборатории CRELL(США) для системы Na-K-Ca-Mg-

Cl-SO₄-H₂O была разработана программа, для вычисления химического равновесия между водными. Используя эту модель, в модификации программы «FREZCHEM2» в работах (Волков и др. 2005, Комаров и др. 2006) была предложена новая методика оценки температуры формирования ионно-солевого состава криопэггов морского генезиса по кривой десульфатизации (температурной зависимости концентрации сульфат-иона). Она позволяет на основании химического анализа пробы конкретного криопэга, с помощью моделирования восстановить величину минимального значения температуры, при которой произошло формирование ионно-солевого состава криопэга. Эта температура соответствует температуре начала кристаллизации мирабилита для каждой конкретной пробы криопэга и четко фиксируется на кривой десульфатизации. Причем для корректного определения температуры формирования ионно-солевого состава криопэга морского генезиса не обязательно знать исходный состав морской воды, из которой сформировался криопэг.

Согласно результатам проведенного Комаровым И.А., Волковым Н.Г. (Волков, Комаров и др., 2005) моделирования процесса промораживания криопэга с помощью программы FREZCHEM2 (рис. 4-1), повышение концентрации Na₂SO₄ в жидкой фазе в области температур ниже точки начала выпадения гидрогалита можно объяснить резким превышением скорости кристаллизации раствора над темпом десульфатизации. Из раствора выпадает в твердую фазу большая доля NaCl - соли, которая доминирует в нем, вследствие чего весовое количество Na₂SO₄ на 1 грамм раствора увеличивается. При дальнейшем понижении температуры скорости выравниваются, а затем темп десульфатизации начинает преобладать.

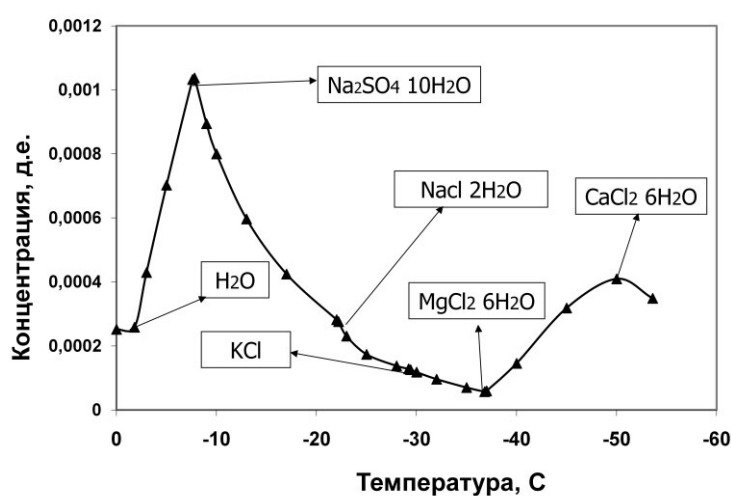


Рис. 4-1 Температурная зависимость изменения сульфат-иона (Волков, Комаров и др., 2005)

С помощью предложенной методики по кривой десульфатизации оценены температурные условия формирования ионно-солевого состава ряда криопэггов и поровых растворов засоленных пород п-ова Ямал.

4.2 Закономерности изменения фазового и химического состава криопэггов в процессе их криогенного метаморфизма

Сульфат-ион в исходном составе присутствовал во всех пробах криопэггов на лайдах, и лишь на нескольких – для криопэггов на поймах и террасах. По-видимому, формирование криопэггов на поймах и террасах проходило при низких отрицательных температурах. Криопэги на лайдах постоянно имели дополнительное питание сульфат-ионом за счет морской воды. Для криопэггов на лайдах выделены те же стадии криометаморфизма, что и для морской воды, с поправками на особенности формирования и условий рассолов. На рисунке 4-2 видно, что форма кривой десульфатизации для всех изученных нами криопэггов имеет вид, близкий к характерному для морской воды (рис. 4-3).

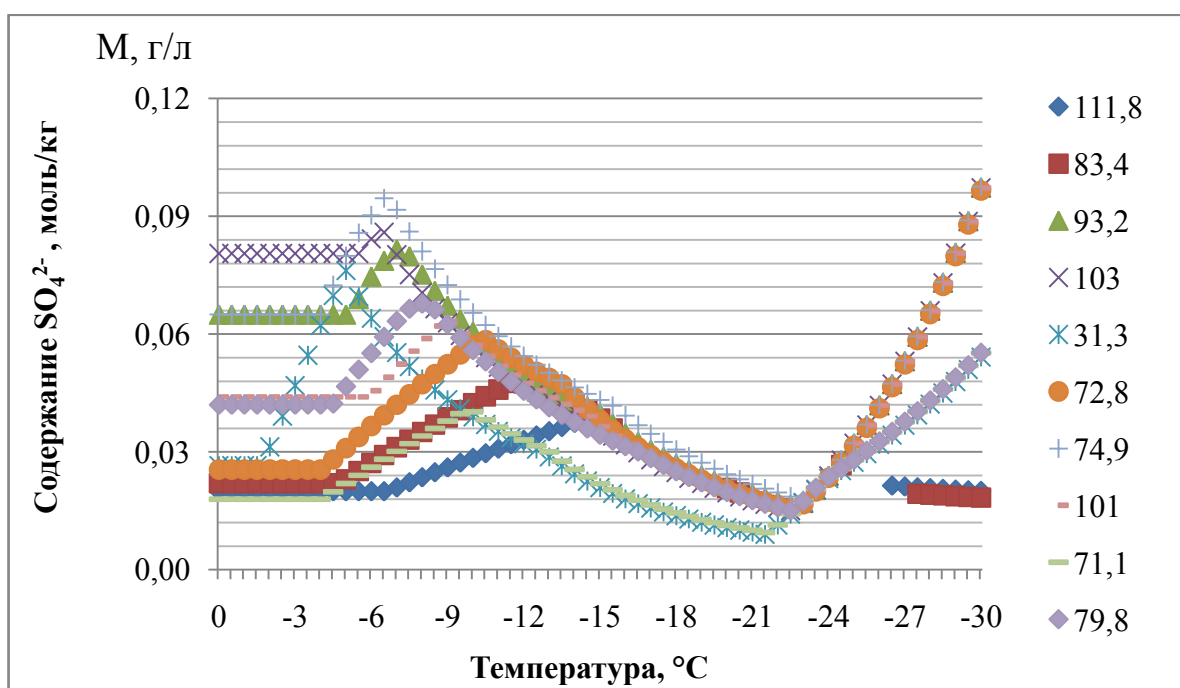


Рис. 4-2 Кривые десульфатизации для криопэггов разной минерализации на лайдах.

Цветом указана степень минерализации, г/л

1 стадия охлаждения криопэггов, характеризуется более низким значением температуры начала замерзания (от 0°C до -4...-6,6°C), что связано с более высокой минерализацией рассолов криопэггов (до 110 г/л) относительно концентрации морской воды (35г/л).

Для криопэггов кривая десульфатизации для 2-ой стадии близка к ее виду для морской воды. Различие состоит в том, что для криопэггов, находящихся в СТС эта стадия выделяется в диапазоне температур от -4,5°C до -7,5°C (рис. 4-4), а ниже СТС, но в слое годовых амплитуд – от -5,0°C до -14,0°C. Ниже слоя годовых амплитуд в исходном составе криопэггов сульфат-ион уже отсутствует. Вероятно, эти криопэги сформировались при низких отрицательных

температурах, в конце стадии их десульфатизации. Фиксируется также выпадение CaCO_3 , содержание которого в морской воде не велико. Кристаллизация CaCO_3 происходит только в том случае, если в исходном составе иона Ca^+ было достаточно много. В большинстве же случаев весь Ca^+ и HCO_3^- расходуется на образование доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

На 3 стадии – десульфатизации (от $-7,4^\circ\text{C}$ до $-25,0^\circ\text{C}$) на фоне постепенного промерзания криопэга, уменьшения содержания сульфат – иона, сопровождающегося образованием мирабилита, продолжается увеличение концентрации ионов Cl^- , Na^++K^+ и Mg^+ и общей минерализации. Следует отметить, что даже незначительное содержание бикарбонатов ($< 1\%$) в рассоле криопэгов на лайде, существенно деформирует температурную кривую десульфатизации (рис. 4-3)

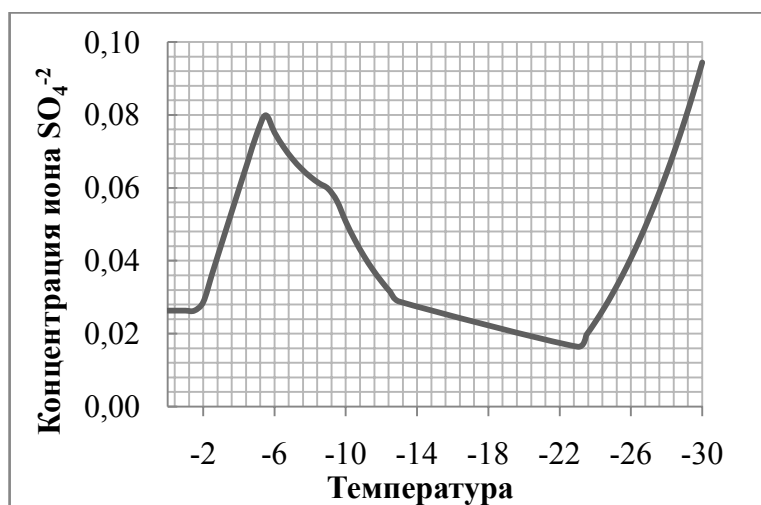


Рис. 4-3 Кривая десульфатизации для криопэга при наличии бикарбонатов.

Завершение третьей стадии обусловлено выпадением гидрогалита ($\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Этот эффект обуславливает выделение 4-ой стадии (ниже $-22,5^\circ\text{C}$), сопровождающейся ростом концентрации сульфат –иона, а также возможным выпадением гипса ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и магнезита (MgCO_3).

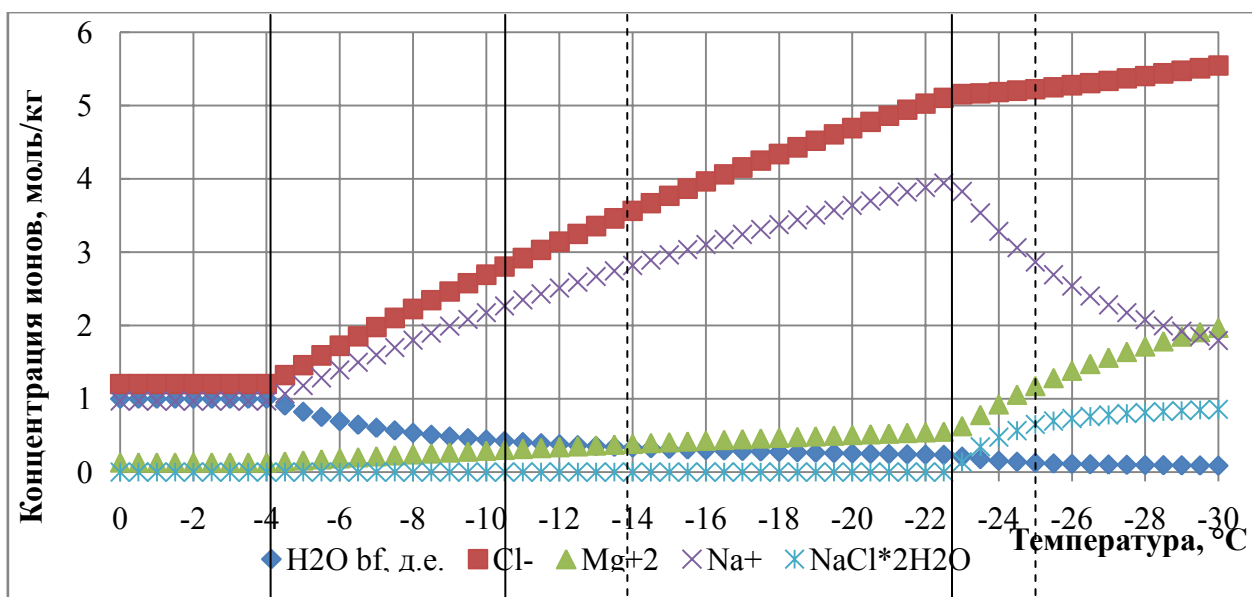


Рис 4-4-1 Изменение содержания ионов и солей, [C] более 0.1 моль/кг

Таблица 4-1. Стадии криометаморфизма для криопэггов на лайдах п-ова Ямал

I стадия	II стадия	III стадия		IV стадия	
		III.1	III.2	IV.1	IV.2
Охлажде-ние	Концентри-рование	$\uparrow \text{Na}^+$ $\uparrow \text{NO}_3^-$ $\uparrow \text{SO}_4^{2-}$	20-30 % криопэга в жидкой фазе	$\downarrow \text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	\downarrow Магnezит

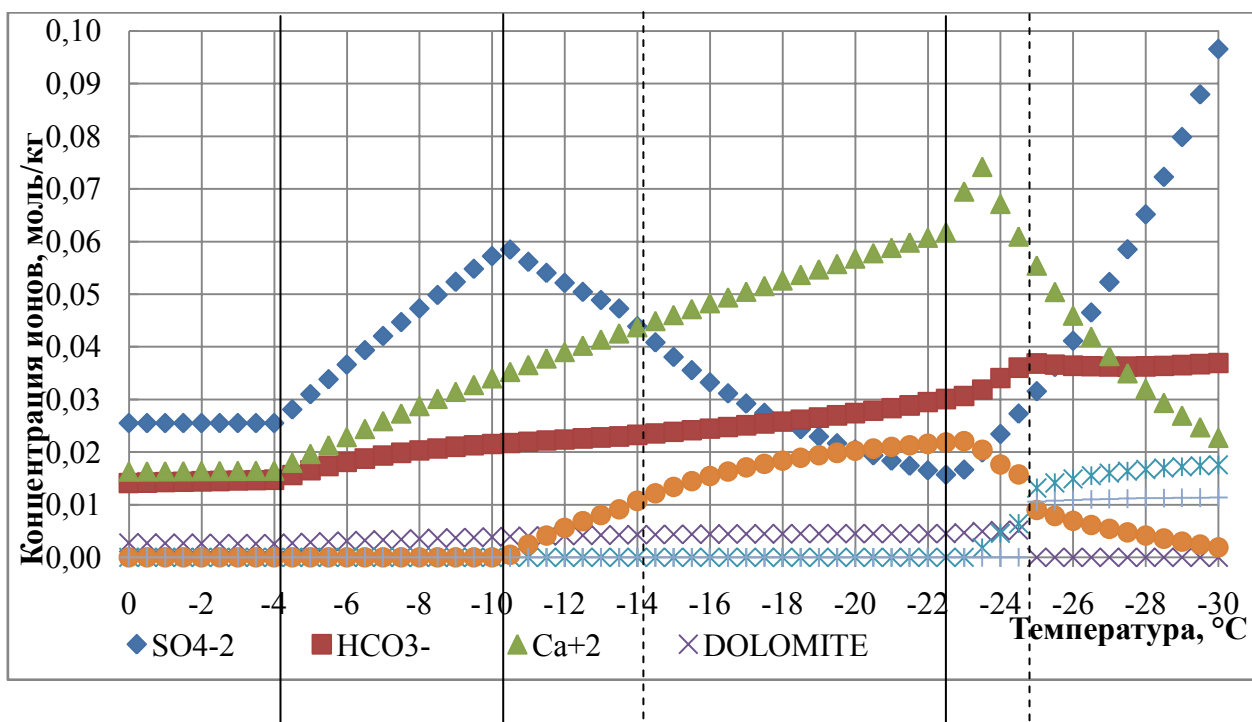


Рис 4-4-2 Изменение содержания ионов и солей, [C] менее 0.1 моль/кг

Процесс криоэоетаморфизма криопэггов п-ова Ямал, даже расположенных на лайде, отличается от характера его протекания в морской воде. Тем более это касается криопэггов континентального типа засоления (Кияшко, Комаров, 2012).

4.3 Закономерности изменения фазового и химического состава в процессе криогенного метаморфизма засоленных пород

4.3.1 *Закономерности изменения фазового и химического состава в процессе криогенного метаморфизма засоленных пород п-ова Ямал.* Засоленные породы п-ова Ямал имеют устойчивое по площади и в разрезе криогенной толщи хлоридное засоление (Дубиков, 2002). Засоление фиксируется до глубины 300 м и более и имеет морской генезис. Хлориды составляют до 95% общего содержания солей.

В слое годовых амплитуд засоленность пород имеет более низкие значения (до 0,05%), чем породы, расположенные в разрезе глубже 10 м (от 0,1% до 1,2%). Это обуславливает различие в концентрациях и типе засоления, а значит, и в сценариях криометаморфизма для двух выделенных групп пород.

Рассоление верхних горизонтов происходит за счет их протаивания и частичного разбавления поверхностными водами. Породы представлены аллювиальными $alIV$, озерными I III-IV и морскими $m III_1$ отложениями. Состав поровых вод до 4,6 м карбонатно-хлоридный натриевый, с глубины 4,0 м до 10,5 м - хлоридно-карбонатный натриевый. Процесс криометаморфизма засоленных пород для диапазона массива мощностью до 10-12 м, который включает слой сезонного оттаивания и годовых амплитуд, характеризуется выпадением гипса при достаточно высоких температурах (рис.4-5). Стадия десульфатизации наступает одновременно с выпадением гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (а не мирабилита, как это характерно для морской воды и криопэгов).

На глубинах от 10 до 150 метров засоленность пород достигает величины 1,2%. Породы преимущественно морского генезиса $m III_1$, $m II_{2-4}$. Соотношение катионов и анионов меняется относительно пород, расположенных на глубине до 10 м. Состав преимущественно хлоридно-натриевый. Четкая закономерность зависимости степени засоленности от глубины отсутствует – прослеживаются более засоленные пласты, и менее засоленные. Вероятно, распределение солей зависит от различных факторов, таких как дифференциация солей, состав пород, условия формирования.

При степени засоленности выше 0,1% криометаморфизм поровой влаги засоленных пород близок к таковому для криопэгов: также выделяется 4-ая стадия, а 3-я стадия делится на несколько подстадий (рис. 4-6).

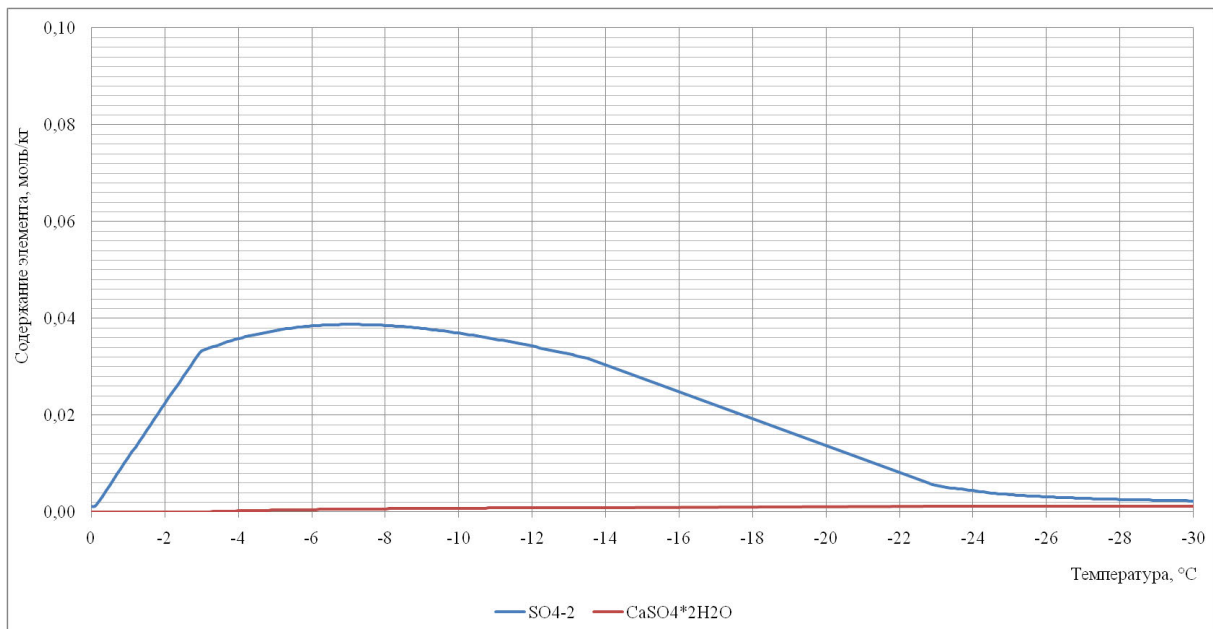
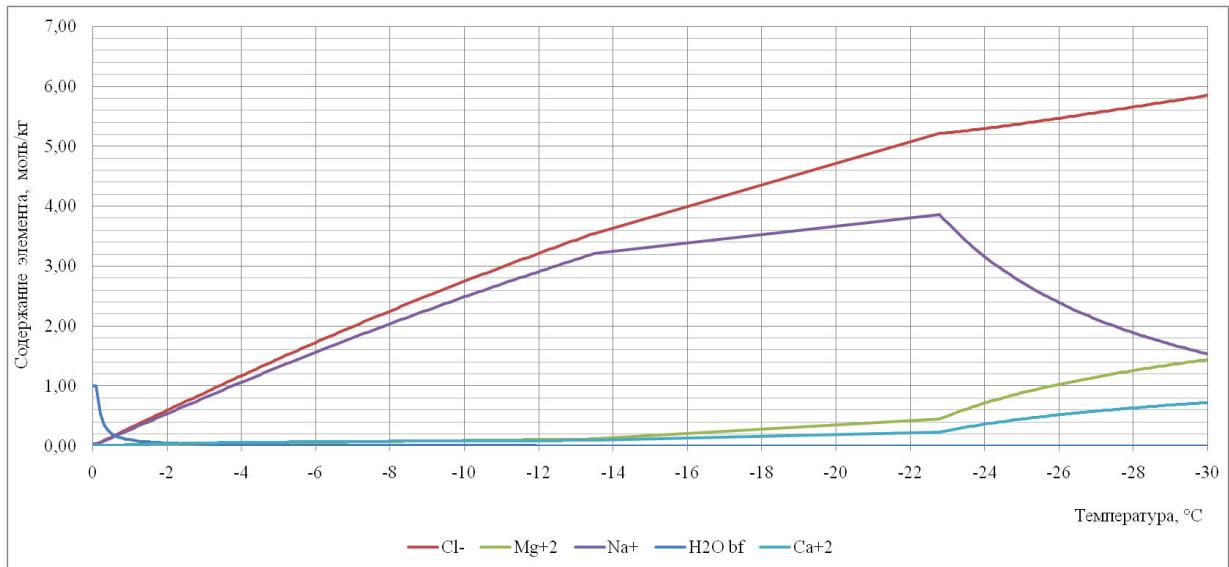


Рис. 4-5 Изменение содержания анионов, катионов и солей от температуры. Пески. Участок 1. Пески. Проба грунта №1 (6,9-7,6 м).

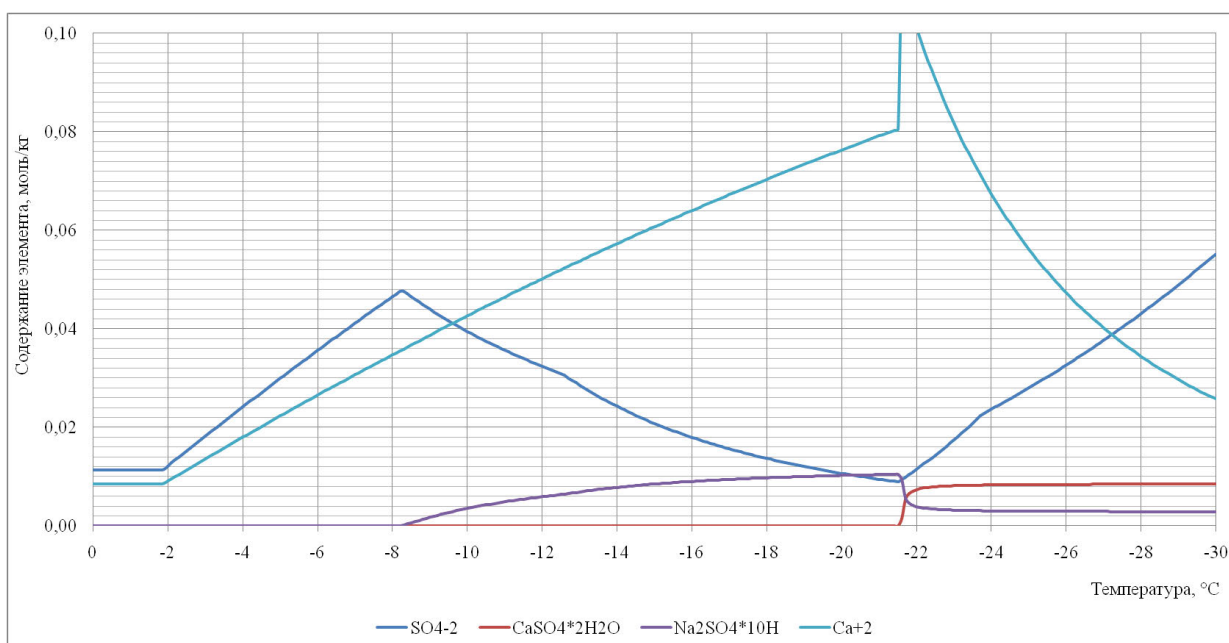
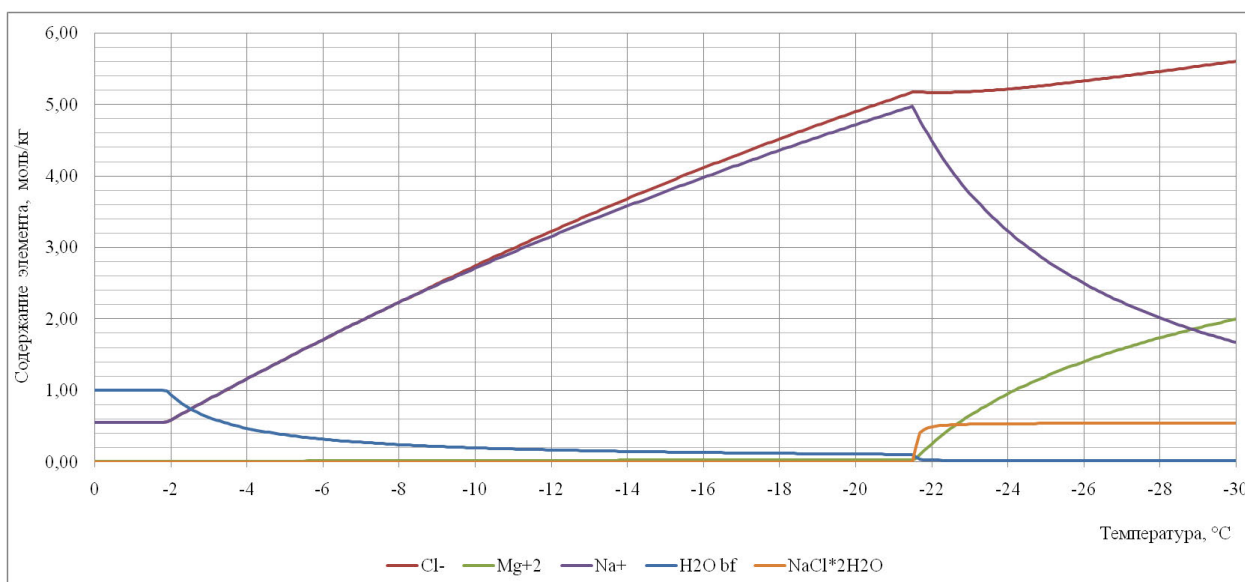


Рис. 4-6 Изменение содержания анионов, катионов и солей от температуры. Суглинки. Участок 1. Суглинки. Проба грунта №1 (39-40 м).

В отличие от криопэггов, в поровой влаге засоленных пород не образуется доломит и кальцит.

4.3.2 Закономерности изменения фазового и химического состава в процессе криогенного метаморфизма засоленных пород с заэвтектическими концентрациями по NaCl. Исследованные породы имели концентрации порового раствора до 38 г/л. Совершенно иной сценарий криометаморфизма характерен для сильно-засоленных пород, таких, как солончаки.

Солончаки испытывают интенсивное сезонное промерзание. В силу аридного характера климата и низких отрицательных температур воздуха в зимний период (до -30°C и ниже), в

верхних горизонтах может происходить интенсивный процесс криогенного концентрирования почвенных растворов солончаков. Солончаки образуются главным образом при типе водного режима, когда испарение выше выпадающего количества осадков. Такой режим чаще всего складывается в условиях засушливого климата при близком залегании минерализованных грунтовых вод, капиллярная кайма которых достигает верхнего горизонта почв. Часть воды при этом испаряется с поверхности почвы, часть идет на транспирацию растений, а соли концентрируются и выпадают в осадок в верхнем горизонте почвы. При достижении концентрации солей выше 0,8—1% образуется солончак.

Состав воднорастворимых солей в солончаках может быть весьма разнообразным, но в большинстве случаев эти соли представляют комбинации трех катионов — Na^+ , Mg^{++} и Ca^{++} и четырех анионов — Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} и HCO_3^- . Очевидно, что из них возможно образование следующих солей: NaCl , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , MgCl_2 , MgSO_4 , MgCO_3 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaCl_2 , CaCO_3 , CaSO_4 и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Гораздо реже встречаются в природе так называемые нитратные солончаки с содержанием KNO_3 и NaNO_3 с примесью NaCl , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, MgCl_2 , MgSO_4 и прочих солей. Емкость катионного обмена чаще всего составляет по всему профилю 10—20 мг-экв/100 г. В составе обменных оснований почв, засоленных натриевыми и магниевыми солями, преобладают соответственно натрий или магний. Реакция хлоридных и сульфатных солончаков - нейтральная или щелочная.

Отличительной чертой химического состава пород является осязаемое содержание сульфатов. Так в рассматриваемых солончаковых водах их содержание одного порядка с содержанием хлоридов и даже в ряде проб может его превосходить, кроме того, солончаки хлоридного и сульфатно-хлоридного типа отличаются высоким содержанием гипса. Соответственно, меняется характер и динамика изменения фазового и химического состава рассолов от температуры, т.е. сценарий процесса криометаморфизма.

Солончаки оазиса характеризуются исключительно высокой степенью засоления, хотя формируются за счет слабоминерализованных и даже пресных грунтовых вод. Минералогический анализ солей (Ямнова, 1990) показал разнообразие форм засоления (табл. 4-2).

Минералогический состав солевых новообразований сульфатного солончака

Глубина, см	Минерал					
	Галит, NaCl	Тенардит, Na ₂ SO ₄	Мирабилит, Na ₂ SO ₄ *10H ₂ O	Гипс, CaSO ₄ *2H ₂ O	Глауберит, CaSO ₄ *Na ₂ SO ₄	Бура, Na ₂ B ₄ O ₇ *10 H ₂ O
0-3	+	+++	-	-	-	+
3-10	-	+++	-	-	-	+
10-20	-	-	+++	+	++	-
20-40	-	-	-	++	-	-
40-80	-	-	-	++	-	-

+++ - много; ++ - средне; + - мало; - - минерал не обнаружен.

С помощью программы «FREEZBRINE» было исследовано и проанализировано 9 проб почвенных растворов солончаков оазиса Эхийн-Гол (табл.3-8), расположенных на глубинах до 85 см с концентрацией около или выше минерализации морской воды. В результате моделирования получены данные по содержанию основных анионов, катионов и солей для каждого значения температуры в выбранном интервале (от 0 до 30°C), а также сведения о фазовом составе рассола (количество твердой и жидкой фаз воды, в моль/кг). По полученным данным построены графики изменения химического и фазового состава солончаков от температуры. По характеру криометаморфизма солончаки предложено разделить на 2 основные группы с выделением подтипов.

Группа I (номер пробы по табл.2 №1,2,3): почвенные растворы с высокими концентрациями (297-345 г/л), насыщенные мирабилитом (Na₂SO₄ · 10H₂O).

За счет высокой концентрации раствора мирабилит выпадает до понижения температуры ниже нулевой отметки (рис. 4-7). Рассол не замерзает до температуры -21÷ -23°C. По форме кривой десульфатизации видно, что стадии охлаждения и десульфатизации проходят одновременно: при понижении температуры от 0 до -22°C содержание сульфатов в растворе последовательно снижается от 0,11 до 0,01 моль/кг. Это может происходить за счет его выпадения в составе мирабилита и в меньшей степени гипса.

Стадия концентрирования либо отсутствует, либо завершилась до начала стадии охлаждения, при положительных концентрациях. Ниже -22°C в растворе, за счет выпадения гидрогалита растет концентрация сульфатов от 0,01 до 0,1 моль/кг и проявляется пик ионов

кальция (0,035 моль/кг), концентрация которых идет на убыль ниже -25°C за счет выпадения гипса. Такое поведение анионов и катионов обуславливает выделение еще одной стадии криометаморфизма, характеризующейся увеличением концентрации сульфатов.

В этой группе выделено 2 типа процессов криометаморфизма:

Тип 1 (номер пробы по табл.2 №2):

Высокая концентрация (346 г/л), заэвтектичная по $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$: при $-12,1^{\circ}\text{C}$ раствор доходит до эвтектики (равновесие: кристалл NaCl + раствор $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и начинается вымерзание по эвтектике (рис. 4-7). Температура начала замерзания ($-21,7^{\circ}\text{C}$) ниже температуры выпадения гидрогалита ($-12,1^{\circ}\text{C}$) (таблица 4-3).

Тип 2 (номер пробы по табл.2 №1,3):

Также высокие концентрации (от 297 до 324 г/л), но по $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ доэвтектичные (рис. 4-8). Температура начала замерзания близка, но выше температуры выпадения гидрогалита (таблица 4-4):

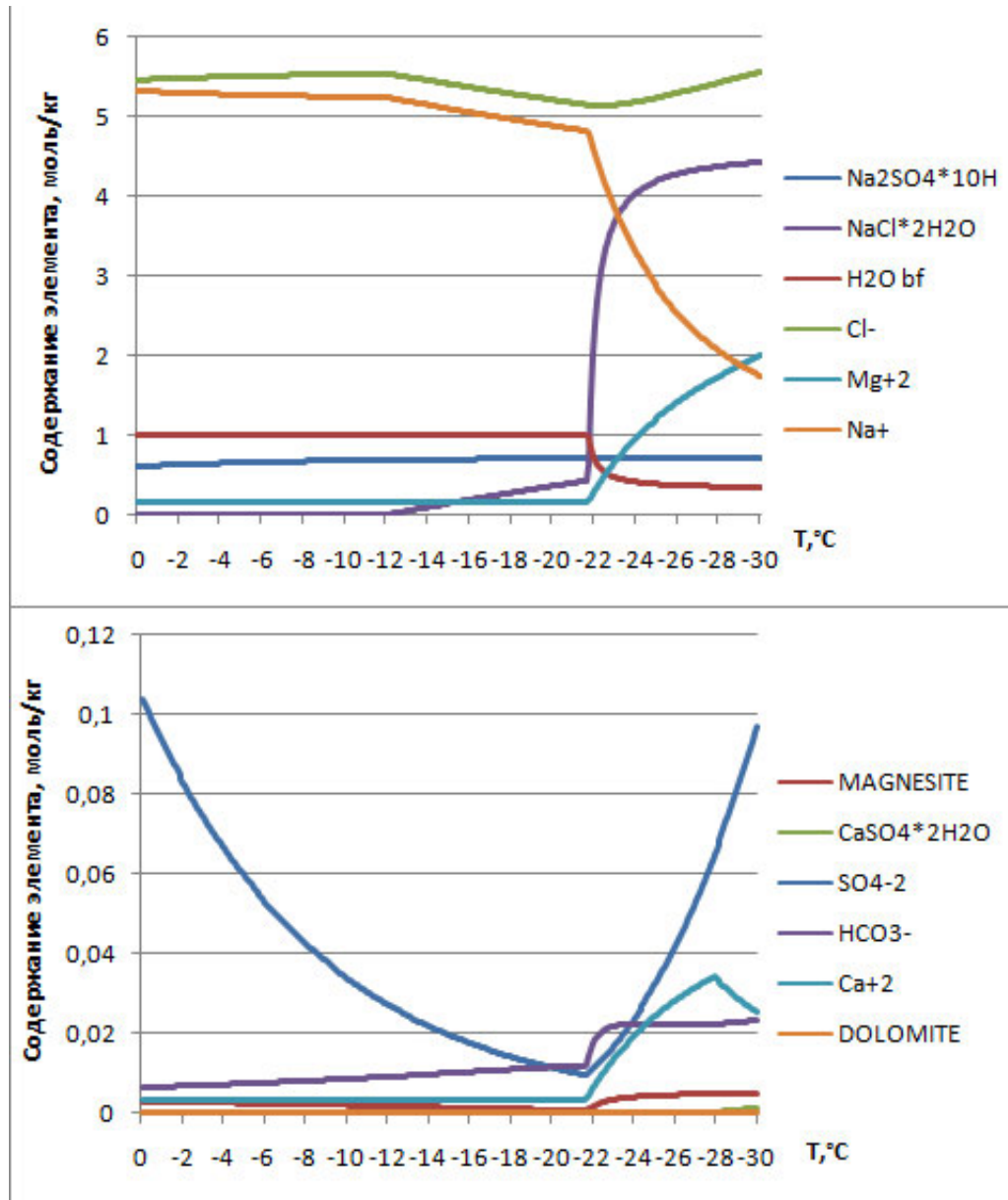


Рис. 4-7. Изменение состава почвенных растворов солончаков при промерзании. Группа I, тип 1. Содержание незамерзшей воды H₂O_{bf} дано в д.е.

Таблица 4-3

Соотношение температуры начала замерзания и выпадения гидрогалита для Группы I.

Тип 1

	Т _{нз} , °С	Т выпадения гидрогалита, °С
Проба №1 (M=297,1 г/л)	-21,7	-12,1

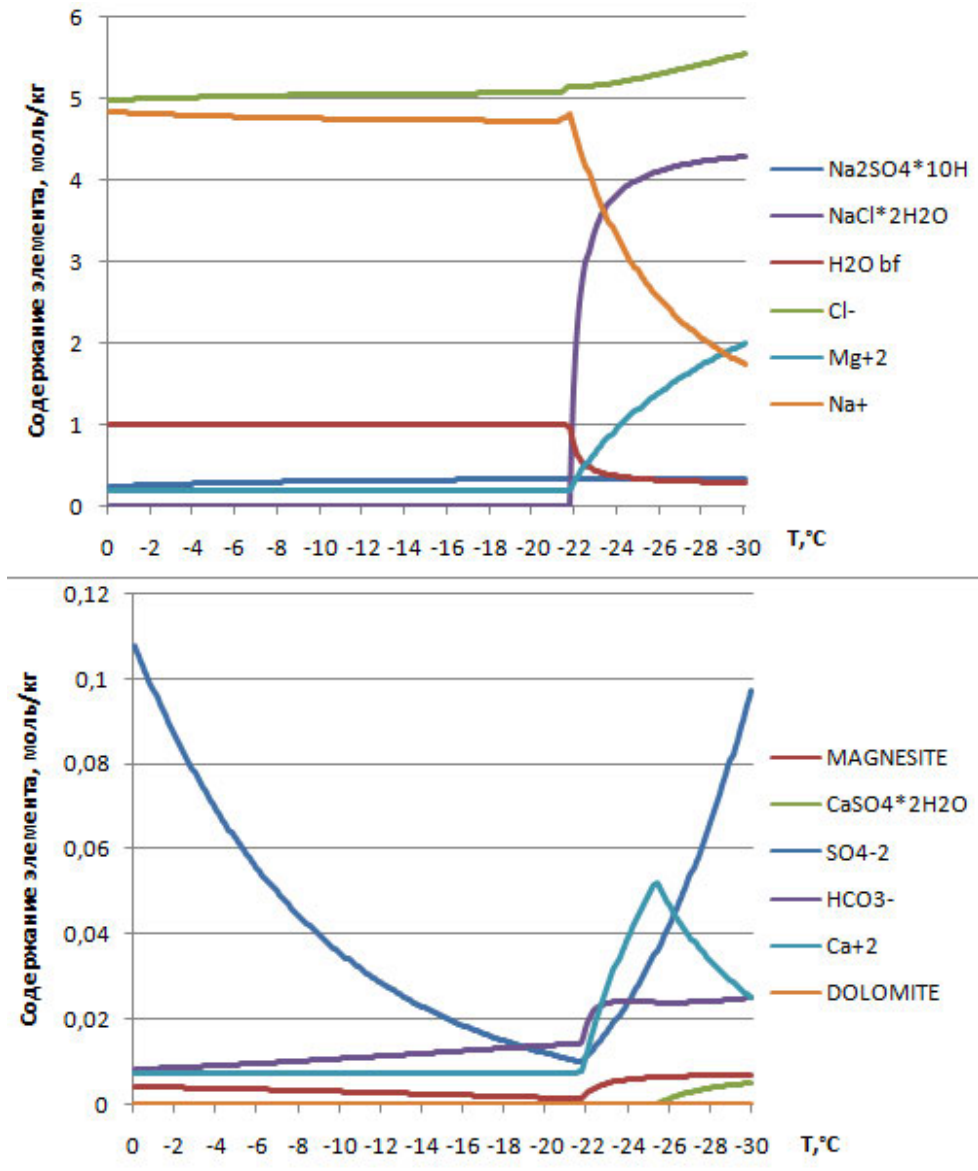


Рис. 4-8 Изменение состава почвенных растворов солончаков при промерзании. Группа I, тип 2. Содержание незамерзшей воды H₂O_{bf} дано в д.е.

Таблица 4-4

Соотношение температуры начала замерзания и выпадения гидрогалита для Группы I, Тип 2

	Т _{нз} , °С	Т выпадения гидрогалита, °С
Проба №1 (M=297,1 г/л)	-21,3	-21,8
Проба №3 (M=324,7 г/л)	-17,8	-21,8

Группа II (номера проб по табл.2 №4,5, 7,8,9): менее минерализованные (36-222 г/л) растворы.

Температура начала замерзания колеблется в пределах $-2 \div -7^{\circ}\text{C}$ и совпадает с температурой выпадения мирабилита. Для группы II (рис 4-9) видно, что количество незамершей воды ($\text{H}_2\text{O}_{\text{bf}}$) начинает снижаться, а количество мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) возрастать при одной температуре.

Форма кривой десульфатизации для Группы II близка к таковой для морской воды (Фотиев, 2009). Для солончаков Группы II выделяется стадия охлаждения от 0 до $-1,6^{\circ}\text{C}$, стадия концентрирования от $-1,6^{\circ}\text{C}$ до $-2,4^{\circ}\text{C}$, стадия десульфатизации от $-2,4^{\circ}\text{C}$ до $-21,9^{\circ}\text{C}$. Концентрация иона Ca возрастает (от 0,01 до 0,1 моль/кг) до $-21,9^{\circ}\text{C}$. При этой температуре в результате выпадения гидрогалита и связывания воды возрастают концентрации сульфата (от 0,011 до 0,096 моль/кг) и начинается выпадение гипса. Рост концентраций Mg (от 0,21 до 1,96 моль/кг) отчетливо проявляется ниже температуры кристаллизации гидрогалита, что коррелируется с образованием некоторого количества доломита (0,001 моль/кг). Характер изменения содержания катионов, анионов и солей меняется ниже температуры $21,9^{\circ}\text{C}$, что обуславливает выделение 4ой стадии криометаморфизма.

Для этой группы температура начала замерзания значительно выше температуры выпадения гидрогалита (таблица 4-5) :

В пробах этого типа появляется доломит. Интенсивность выпадения мирабилита сначала растет, а потом, после выпадения NaCl падает, добавляется выпадение кальцита и гипса (рис. 4-9).

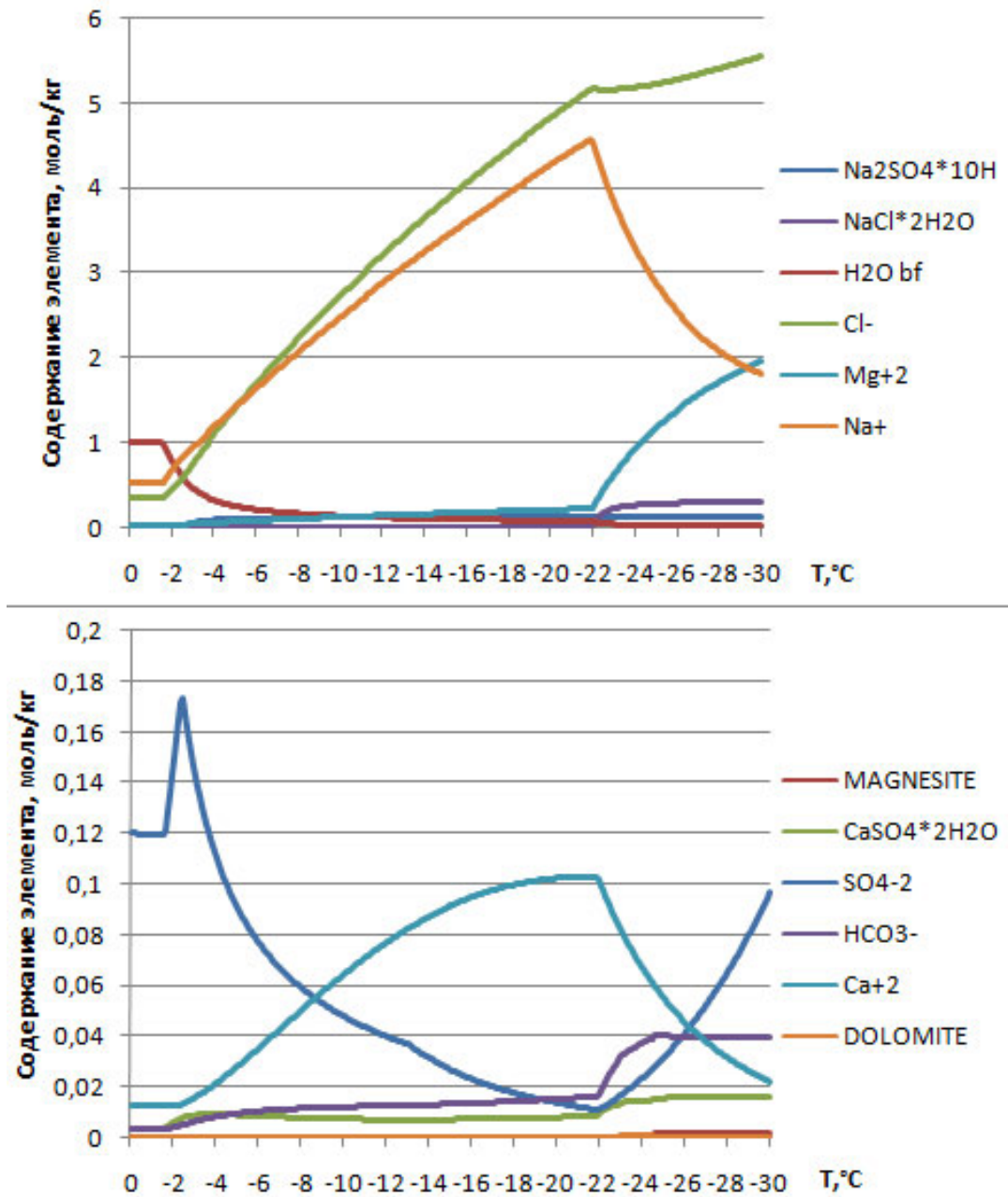


Рис. 4-9. Изменение состава почвенных растворов солончаков при промерзании. Группа II, тип 3. Содержание незамерзшей воды H₂O_{bf} дано в д.е.

Обобщенный результат по температурам образования солей для выделенных групп криометаморфизма представлен в таблице 4-6.

Таблица 4-5

Соотношение температуры начала замерзания и выпадения гидрогалита для Группы II

	Т _{нз} , °С	Т выпадения гидрогалита, °С
Проба №4 (М=136,0 г/л)	-6,6	-21,9
Проба №5 (М=53,7 г/л)	-2,5	-22,2
Проба №7 (М=222,6 г/л)	-9,6	-24,9
Проба №8 (М=94,9 г/л)	-2,7	-22,7
Проба №9 (М=36,6 г/л)	-1,6	-22,0

Таблица 4-6

Температура образования солей в солончаках
(по результатам моделирования)

Группа		I	II
Глубина, см		2-25	25-150
Минерализация, г/л		297-350	10-130
Т _{нз} , °С		-21 ÷ -23	-2 ÷ -7
Температура выпадения солей	NaCl·2H ₂ O	-21 ÷ -23	-21 ÷ -23
	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	-	-3 ÷ -7
	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-25 ÷ -27	-2 ÷ -5
	Magnesite	-21 ÷ -23	-21 ÷ -23
	Dolomite	-	-21 ÷ -23

Выводы к главе 4

1. Существующие взгляды о процессах изменения фазового и химического состава морской воды основаны на представлениях о трех стадийном характере процесса десульфатизации и не учтены возможное присутствие карбонатов, бикарбонатов и ряда других ионов. Однако, в исследованных пробах криопэггов и водных вытяжек засоленных пород указанные ионы присутствуют, что требует развития новых подходов с использованием математического моделирования.

2. Специфика сценария (стадийности) реализации процесса криометаморфизма поровых растворов и криопэггов зависит от величины исходной минерализации и водно-ионного состава. При рассмотрении процесса криометаморфизма наиболее информативным является анализ температурного изменения содержания сульфат-иона. Так, для криопэггов п-ова Ямал характерно наличие 4ой стадии ниже $-22,5^{\circ}\text{C}$, которая обусловлена выпадением гидрогалита, сопровождающимся ростом концентрации сульфат-иона, а также возможным выпадением гипса и магнезита. Даже незначительное содержание бикарбонатов в рассоле криопэггов существенно деформирует температурную кривую десульфатизации что позволяет в 3-ей стадии процесса выделить несколько подстадий, характеризующихся выпадением кальцита и гипса.

3. Процесс криометаморфизма поровых растворов засоленных пород зависит от степени засоленности: при степени засоленности выше 0,1% сценарий криометаморфизма качественно аналогичен таковому для криопэггов; при степени засоленности меньше или равно 0,1% - характеризуется в ряде случаев выпадением гипса, а не мирабилита т. е. катион кальция перехватывает анион SO_4 у натрия.

4. Процесс криометаморфизма поровых растворов засоленных пород существенно зависит от концентрации: с концентрацией от 40 г/л до 150 г/л качественный характер процесса протекает аналогично таковому для криопэггов, а количественно - со смещением температуры эвтектик гидрогалита, мирабилита, гипса по абсолютной величине; при концентрациях рассола 300 -350 г/л, которые являются заэвтектическими по $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, характерных для вод солончаков, процесс криогенного метаморфизма реализуется без промерзания, за счет относительного увеличения доли содержания твердой фазы к жидкой (до 20%) .

Глава 5. Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги и теплофизических свойств криопэгов п-ова Ямал

Методика прогноза характеристик криопэгов необходима для оценки температурного и водно-солевого режима массива пород, вмещающих криопэги. Предлагается методика для двух случаев, характеризующихся детализацией исходной информации о химическом составе и общей минерализации криопэга, а также наличием или отсутствием программного продукта:

1. Имеется информация о водно- ионном составе пробы криопэга, полученная в полевых или лабораторных условиях и программный продукт;

2. Имеется информация об общей минерализации криопэга, полученная в лабораторных или полевых условиях (полевая химическая лаборатория, методика оценки по электропроводимости пробы и т.д.). Программный продукт отсутствует. В этом случае для оценки характеристик криопэга предлагаются приближенные расчетные соотношения, которые могут быть использованы как научные рекомендации для создания региональных нормативных документов. В настоящее время такие документы отсутствуют.

5.1 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, плотности, рН и теплофизических свойств криопэгов с помощью программного продукта

5.1.1 Методика прогноза температуры начала замерзания. Работа с программой начинается с обработки данных, описанной в п. 3.3. Методика работы с программой дана в приложении 6 (П.6). На рисунке 5-1 представлен вид элемента файла RESULT, позволяющий найти температуру начала замерзания криопэга, концентрацию и тип ионов и солей в жидком и твердом состояниях, плотность и рН рассола, наличие газообразной фазы, термодинамические характеристики (мольность, моляльность, активность, коэффициент активности, химический потенциал и т.д.). Необходимым условием задания корректного валового химического состава пробы является выполнение уравнения электронейтральности (нулевой заряд системы). Программа автоматически контролирует соблюдение этого условия.

Для оптимизации времени счета следует вначале найти диапазон температур, в котором начинаются фазовые переходы в рассоле, путем задания температурного шага в 1 градус, а затем провести расчет для этого диапазона, с более дробным заданным шагом (обычно 0,1 или 0,01 градус).


```

-----
      TEMPERATURE  -6.70 C (266.45 K)  PRESSURE  1.013 bar

      ONE COMPONENT SOLIDS
N  PHASE          MOLE          -deltaG/RT  V, cm3
1  DOLOMITE       0.002077    -37.4396    0.134
2  H2O(cr,I)     0.447083    -0.0648     8.776
      VOLUME OF SOLIDS  8.909 cm3
      AQUEOUS SOLUTION
      IONIC STRENGTH  2.237
      OSMOTIC COEFFICIENT  0.9685

N  SPECIES        MOLE          MOLALITY     ACTIVITY     ACT. COEFF.  -del(G/RT)
1  Na+            0.15010E+01  0.15131E+01  0.86301E+00  0.5704       0.0000
2  Ca+2           0.27920E-01  0.28144E-01  0.62943E-02  0.2236       0.0000
3  Mg+2           0.20491E+00  0.20656E+00  0.46988E-01  0.2275       0.0000
4  H+             0.20812E-06  0.20980E-06  0.23307E-06  1.1109       0.0000
5  Mg(OH)+        0.15606E-07  0.15732E-07  0.13254E-07  0.8425       30.2878
6  Cl-            0.19150E+01  0.19304E+01  0.13461E+01  0.6973       0.0000
7  SO4-2          0.20000E-01  0.20161E-01  0.80208E-03  0.0398       0.0000
8  OH-            0.12434E-07  0.12534E-07  0.23139E-08  0.1846       35.0908
9  HCO3-          0.11639E-01  0.11733E-01  0.55309E-02  0.4714       -24.7319
10 CO3-2          0.12220E-04  0.12318E-04  0.43076E-06  0.0350       0.0000
11 HSO4-          0.12134E-07  0.12232E-07  0.75533E-08  0.6175       -3.6985
12 CO2,aq         0.41809E-02  0.42145E-02  0.65571E-02  1.5558       -40.1094
13 CaCO3,aq       0.33685E-05  0.33956E-05  0.33956E-05  1.0000       -7.1317
14 MgCO3,aq       0.11123E-04  0.11212E-04  0.11212E-04  1.0000       -6.3164
15 H2O(l)         0.55065E+02  0.55065E+02  0.93725E+00  0.0000       0.0000
      pH= 6.633
      DENSITY  1.0812  VOLUME 1020.480 cm3
      ELECTRONEUTRALITY -.376409852E-05
      FUGACITY OF WATER VAPOR OVER SOLUTION.3411E-02 bar
      FUGACITY OF WATER VAPOR OVER ICE .3411E-02

      BALANCE
comp.  DOLOMITE  H2O(cr,I)  AQUEOUS SOLUTI  TOTAL CALC.  TOTAL INPUT
O      0.012463  0.447083  55.188827  55.648374  55.648370
H      0.000000  0.894166  110.142575  111.036741  111.036740
Mg     0.002077  0.000000  0.204923  0.207000  0.207000
Ca     0.002077  0.000000  0.027923  0.030000  0.030000
C      0.004154  0.000000  0.015847  0.020001  0.020000
S      0.000000  0.000000  0.020000  0.020000  0.020000
Na     0.000000  0.000000  1.500999  1.500999  1.501000
Cl     0.000000  0.000000  1.915002  1.915002  1.915000
      61
-----

```

Рис. 5-1 Элемент файла RESULT

На рисунке 5-2 приведена зависимость температуры начала замерзания от общей минерализации для 12 криопэггов на лайдах п-ова Ямал, характеризующихся относительно схожим ионным составом проб, близким к морской воде. В области значений минерализации около 35 г/л температура начала замерзания для криопэггов близка к таковой для морской воды. Разница составляет 6%.

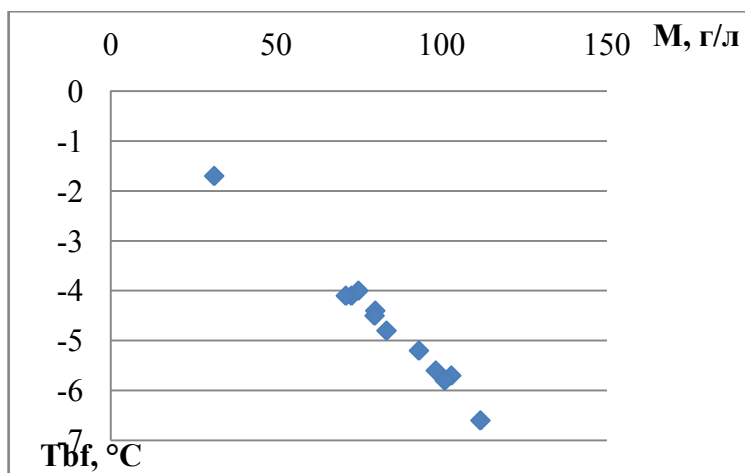


Рис. 5-2 Зависимость температуры начала замерзания от общей минерализации для криопэггов на лайдах

5.1.2 Методика прогноза фазового состава криопэга. Программный продукт позволяет рассчитывать содержание льда для каждого заданного температурного шага. На 5-3 представлен вид элемента файла MINMOLE, позволяющий найти температурную кривую содержания жидкой и твердой (лед) фазы криопэга (вторая колонка слева).

```

-----
EQUILIBRIUM CRYSTALLIZATION
MOLAL AMOUNTS OF SOLIDS
TEMPERAT  H2O(cr, I)  NaCl*2H2O  HALITE  MgCl2*6H2O  MgCl2*8H2O
0.00      0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.10     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.20     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.30     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.40     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.50     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.60     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.70     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.80     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-0.90     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.00     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.10     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.20     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.30     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.40     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.50     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.60     0.000000    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.70     0.058710    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.80     3.203216    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-1.90     5.972604    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.00     8.456867    0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.10     10.707425   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.20     12.744917   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.30     14.606730   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.40     16.308975   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.50     17.876130   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.60     19.318990   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.70     20.653673   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.80     21.893792   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000
-2.90     23.045425   0.000000    0.000000  0.000000    0.000000

```

Рис.5-3 Элемент файла MINMOLE

Чтобы получить значение льда в д.е., необходимо разделить на изначальный объем воды (для воды по умолчанию записано 55.508370 молей (1 кг), поскольку состав раствора задается на один килограмм воды). Чтобы получить количество незамерзшей воды в д.е. для каждого шага температуры, необходимо из начального общего объема (1) вычесть относительное количество льда (5.1):

$$W_{нв} = 1 - (W_{л}/55,5), \quad (5.1)$$

где $W_{нв}$ – количество незамерзшей воды, д.е., $W_{л}$ – количество льда, моль/кг

Зная количество незамерзшей воды для каждого шага, можно построить график. Наглядно получается, если строить точечный график с гладкими кривыми и маркерами.

На рисунке 5-4, в качестве примера, приведен вид кривой фазового состава для криопэга, расположенного на пойме, с минерализацией $M = 83,8$ г/л. Химический состав криопэга, представленный в виде формулы Курлова имеет вид $\frac{Cl^{199} HCO_3^{11}}{Na^{59} Mg^{33} Ca^8}$.

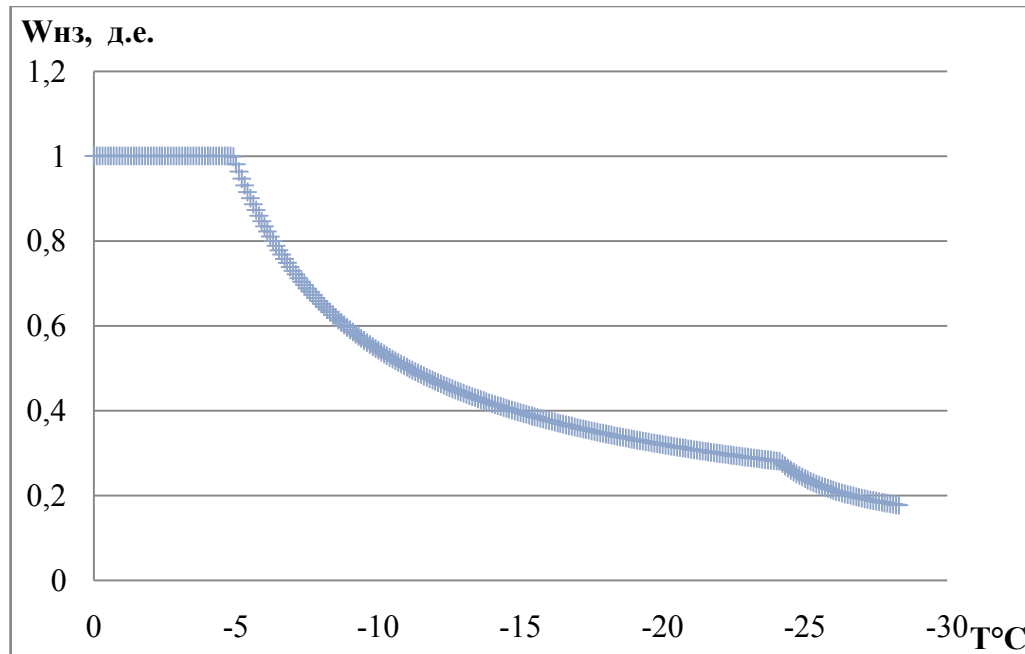


Рис. 5-4 Кривая фазового состава для криопэга, расположенного на пойме

Кривая фазового состава влаги для криопэгов имеет характер, близкий к таковому для морской воды с переломом при температуре -21 - -22 градуса. Это температура характеризует точку выпадения натрий-хлор.

Следует отметить что программа дает абсолютные значения содержания жидкой и твердой фаз, не учитывая долю возможного содержания жидкой фазы во льду образующимся в криопэге в процессе его промораживания. В криопэгах находящихся в слое годовых амплитуд, особенно вблизи поверхности, где отмечаются относительно высокие скорости промерзания, возможен захват льдом жидкого рассола. Структура такого льда похожа на структуру морского льда. В этом случае, для оценки объемного содержания жидкой фазы необходимо учитывать коэффициент захвата солей. Данные по коэффициенту захвата в зависимости от скорости промерзания даны в работе (Пермяков, Романов, 2000)

5.1.3 Методика прогноза плотности. На рисунке 5-1 представлен элемент файла RESULT, в котором содержится информация о значении плотности для заданных термобарических условий. На основании результатов обработки данных с помощью

программного продукта FREEZEBRINE получена зависимость (рис. 5-5) плотности криопэгов от минерализации для различных температур.

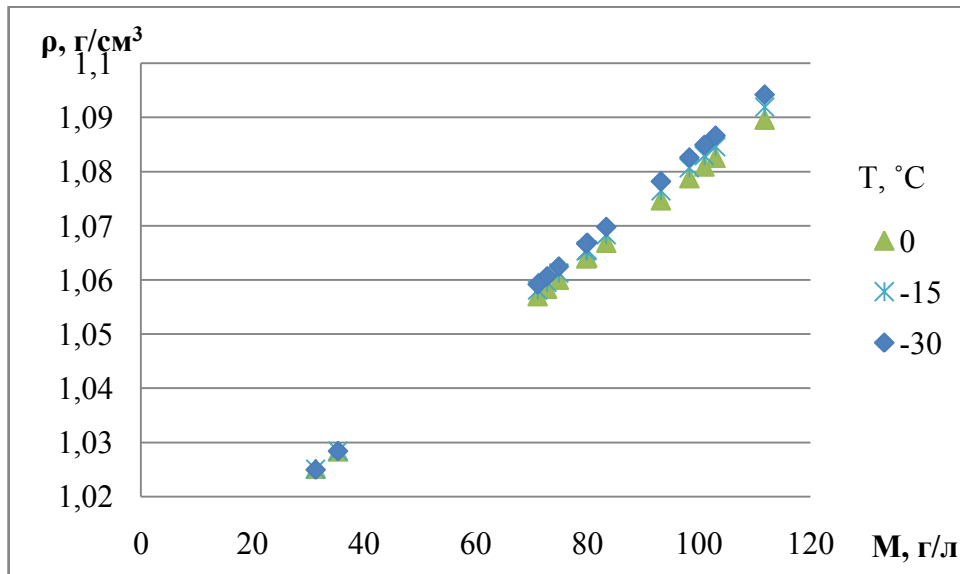


Рис. 5-5. Зависимость плотности криопэгов от минерализации для различных температур.

Исходя из результатов, полученных для криопэгов, значения плотности растут с увеличением минерализации. Зависимость значений плотности от температуры незначительна, что в целом соответствует данным по морской воде (рис. 5-6).

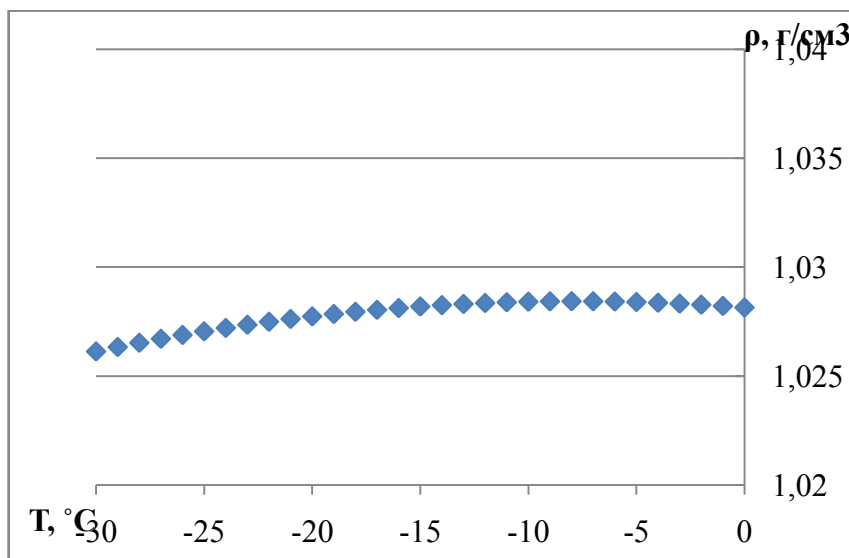


Рис. 5-6. Зависимость плотности морской воды от температуры

Значения плотности как для морской воды, так и для криопэгов от температуры изменяются в пределах до 1%.

5.1.4 Методика прогноза рН. Значения рН также можно получить в файле RESULT (рис. 5-1). Обработка с помощью программного продукта дает значения рН для каждого выбранного значения температуры и минерализации криопэга.

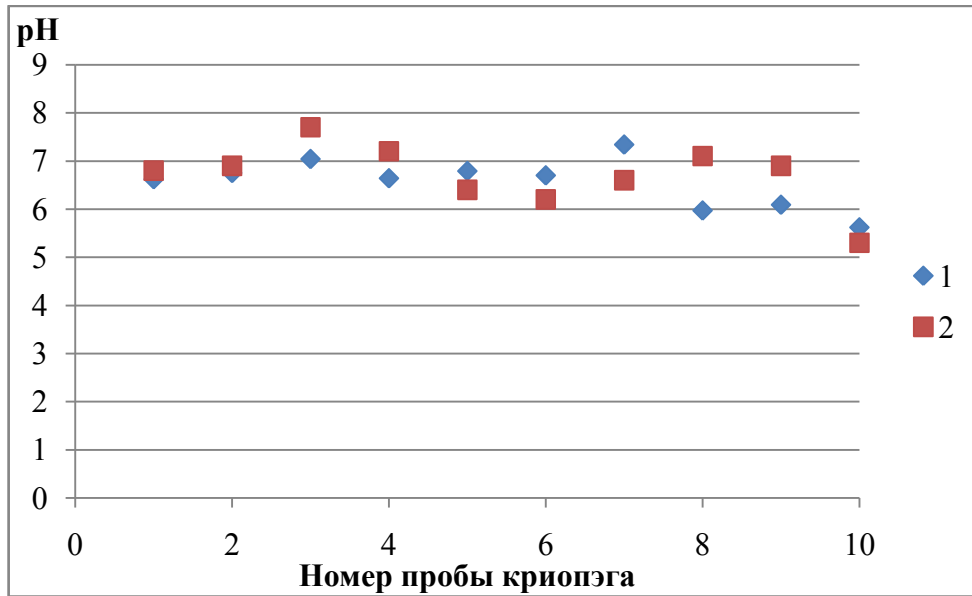


Рис. 5-7 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по рН для криопэгов: 1- расчетные значения, 2 - экспериментальные значения

Сопоставление натуральных данных по величине рН и рассчитанных по программе «FREEZBRINE», приведенное в таблице 5-1, показало их удовлетворительную сходимость (ошибка не превышает 16%), при этом соблюдается и качественное соответствие между показателями щелочная –кислотная среда.

Таблица 5-1

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по рН для криопэгов

Криопэги, расположенные на	№ пробы	Расчетные данные	Эсперим. данные	δ , %
Лайдах	1	6,62	6,8	2,6
	2	6,75	6,9	2,2
	5	7,04	7,7	8,6
	7	6,64	7,2	7,8
	8	6,79	6,4	-6,1
	9	6,7	6,2	-8,1
Террасах	9	7,34	6,6	-11,2
Поймах	1	5,97	7,1	15,9
	3	6,09	6,9	11,7
	4	5,62	5,3	-6,0

5.2 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, плотности, рН и теплофизических свойств криопэггов с помощью приближенных инженерных соотношений.

5.2.1 Методика прогноза температуры начала замерзания криопэггов. Для оценки температуры начала замерзания рассола (криопэга) нам представлялось целесообразным воспользоваться формулой Крюммеля (5.2), используемой в океанологии для вычисления температуры замерзания морской воды (Доронин, Хасин, 1975). Эта формула имеет вид степенной зависимости:

$$T = -10^{-3} (A S + B S^2 + C S^3) \quad (5.2)$$

где S - концентрация (соленность) морской воды, а коэффициенты имеют следующие значения $A=52,7$, $B=0,04$, $C=0,0004$.

Обработанные нами значения по криопэгам показывают, что значения коэффициента A отличаются для разных геоморфологических уровней расположения криопэга. Коэффициент B принимается такой же, как и для морской воды, коэффициент C можно принять равным нулю. Таким образом, расчетное соотношение принимает вид:

$$T_{bf} = -10^{-3} \cdot (X \cdot M + 0,04 \cdot M^2) \quad (5.3)$$

где X - коэффициент, зависящий от расположения криопэга: $X = 50,0$ для лайды; $X = 55,8$ для поймы; $X = 58,9$ для морских террас (Комаров, Мироненко, Кияшко, 2012).

Сравнение расчетных данных по температуре начала замерзания по программе и по расчетной формуле 5.3 проиллюстрировано на рисунке 5-8. Статистическая обработка показала, что данные при разделении по принципу лайды-террасы-поймы, укладываются в доверительный интервал $x \pm s$: $x_{cp} = 50,0$ и $s = 1,78$ – для лайд; $x_{cp} = 58,9$ и $s = 7,34$ – для террас; $x_{cp} = 55,75$ и $s = 2,74$ – для поймы. Для всех данных в целом $x_{cp} = 57,14$ и $s = 11,42$ (рис. 5-9)

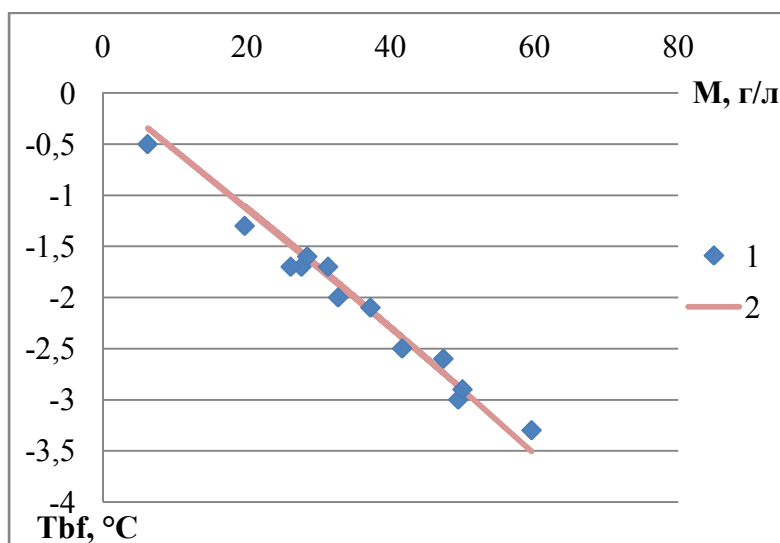


Рис. 5-8 Сопоставление расчетных данных по температуре начала замерзания T_{bf} для морских террас: 1- по программе, 2 – по формуле 5.3

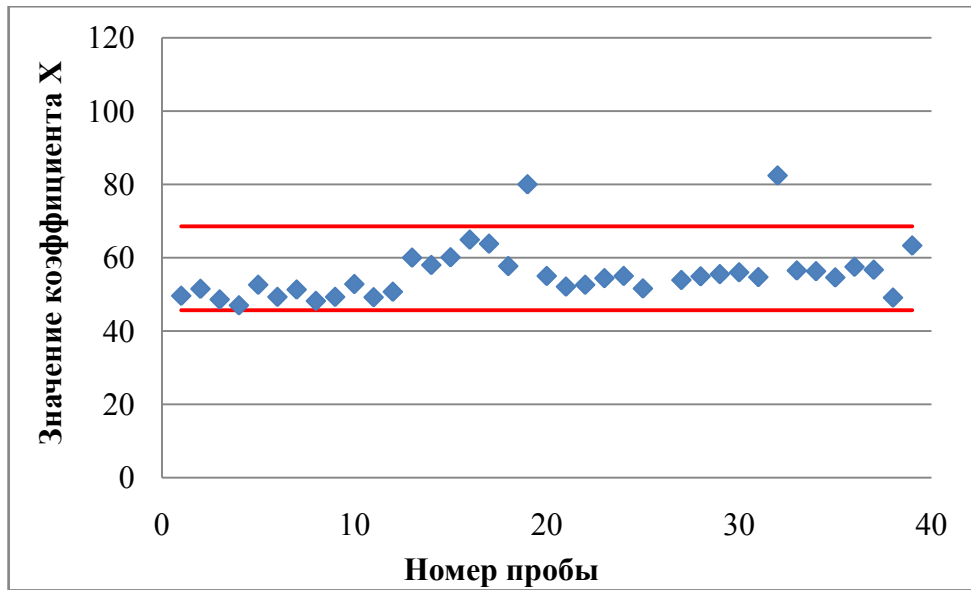


Рис. 5-9 Результаты статистической обработки данных по различным геоморфологическим уровням (по лайде, пойме и террасам).

5.2.3 *Количество незамерзшей воды $W_{нв}$.* На графике представлена зависимость изменения количества незамерзшей воды и льда от температуры, полученная с помощью программы при разной минерализации криопэгов, расположенных на лайдах (рис. 5-10).

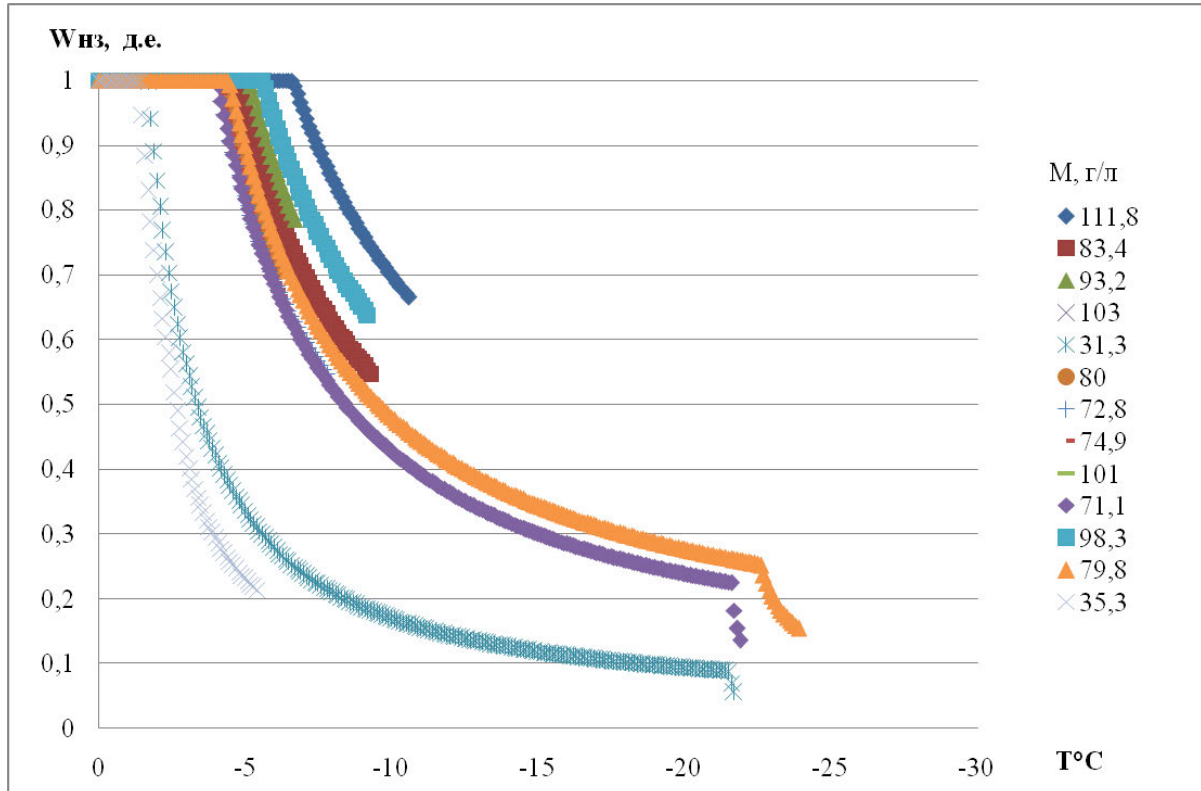


Рис. 5-10 Зависимость изменения фазового состава криопэга от температуры

На графике выделяется 3 участка: первый участок – прямая, до температуры начала замерзания, второй участок – значения незамерзшей воды между температурой начала замерзания и температурой выпадения гидрогалита ($\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$); третий – значения незамерзшей воды ниже температуры образования гидрогалита.

Такой качественный вид температурной кривой изменения фазового состава криопэггов аналогичен виду для морской воды. При понижении температуры от точки начала замерзания количество льда увеличивается, а в растворе образуются минералы мирабилита, кальцита, и др. Однако для практических целей целесообразно учитывать только влияние выпадения гидрогалита ($\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) при температурах $-22\dots-23^\circ\text{C}$. Для первого участка количество незамерзшей воды:

$$W_{\text{нв}}(M, T) = 1; \quad 0 > T > T_{\text{bf}}; \quad 5 \leq M \leq 130 \quad (5.4)$$

Две выделенные ветви кривой $W_{\text{нз}}=f(T)$ для второго и третьего участков целесообразно аппроксимировать степенной и логарифмической зависимостями при условии «сшивки» уравнений при температуре $-22,5^\circ\text{C}$, которая получена статистической обработкой расчетов для разных минерализаций и химического состава криопэггов.

Для второго участка кривой (рис. 5-10) для криопэггов получена расчетная формула:

$$\frac{W_{\text{нв}} - W_{\text{нв}}(-22,5)}{W_{\text{нв}}(T_{\text{нз}}) - W_{\text{нв}}(-22,5)} = A \left(\frac{T + 22,5}{T_{\text{нз}} + 22,5} \right)^n, \quad T_{\text{bf}} \geq T \geq -22,5; \quad 10 \leq M \leq 130; \quad (5.5)$$

где значения величин коэффициентов n , A и значения $W_{\text{нв}}(-22,5)$, $W_{\text{нв}}(T_{\text{нз}})$ приведены в таблице 5-5, $W_{\text{нв}}$ и T – текущие значения количества незамерзшей воды и температуры соответственно, $T_{\text{нз}}$ – температура начала замерзания криопэга.

Для третьего участка кривой (рис. 5-10) для криопэггов получена расчетная формула:

$$\frac{W_{\text{нв}}(-22,5) - W_{\text{нв}}}{W_{\text{нв}}(-22,5)} = \exp\left(\Psi \frac{-22,5}{T + 22,5} + E\right), \quad T \leq -22,5; \quad 5 \leq M \leq 130; \quad (5.6)$$

где значения величин коэффициентов Ψ , E и значения $W_{\text{нв}}(-22,5)$, приведены в таблице 5-6, $W_{\text{нв}}$ и T – текущие значения количества незамерзшей воды и температуры соответственно.

Величины коэффициентов n , A и значения $W_{нв}(-22,5)$, $W_{нв}(Тнз)$ в различных диапазонах минерализации криопэгов

	A		$10 \leq M < 35$	$35 \leq M < 70$	$70 \leq M \leq 130$
Лайды	0,9	n	6,1	3,0	2,5
		$W_{нв}(Тнз)$	0,99		
		$W_{нв}(-22,5)$	0,1	0,2	0,3
Террасы	1	n	5	4,5	
		$W_{нв}(Тнз)$	0,85	0,99	
		$W_{нв}(-22,5)$	0,01	0,15	
Поймы	1	n	8,0	4,0	2,8
		$W_{нв}(Тнз)$	0,99		
		$W_{нв}(-22,5)$	0,02	0,2	0,3

Таблица 5-6

Величины коэффициентов Ψ , E и значения $W_{нв}(-22,5)$ в различных диапазонах минерализации криопэгов

		$10 \leq M < 35$	$35 \leq M < 70$	$70 \leq M \leq 130$
Лайды	Ψ	-0,01		
	E	-0,20		
	$W_{нв}(-22,5)$	0,1	0,2	0,3
Террасы	Ψ	-0,02		
	E	-0,7	-0,8	
	$W_{нв}(-22,5)$	0,01	0,15	
Поймы	Ψ	-0,03	-0,02	-0,01
	E	-1,8	-1,1	-0,85
	$W_{нв}(-22,5)$	0,02	0,2	0,3

Второй участок обрабатывается в виде уравнения (5.5) путем сглаживания в логарифмических координатах (см. рис 5-11 для нескольких криопэгов на лайдах):

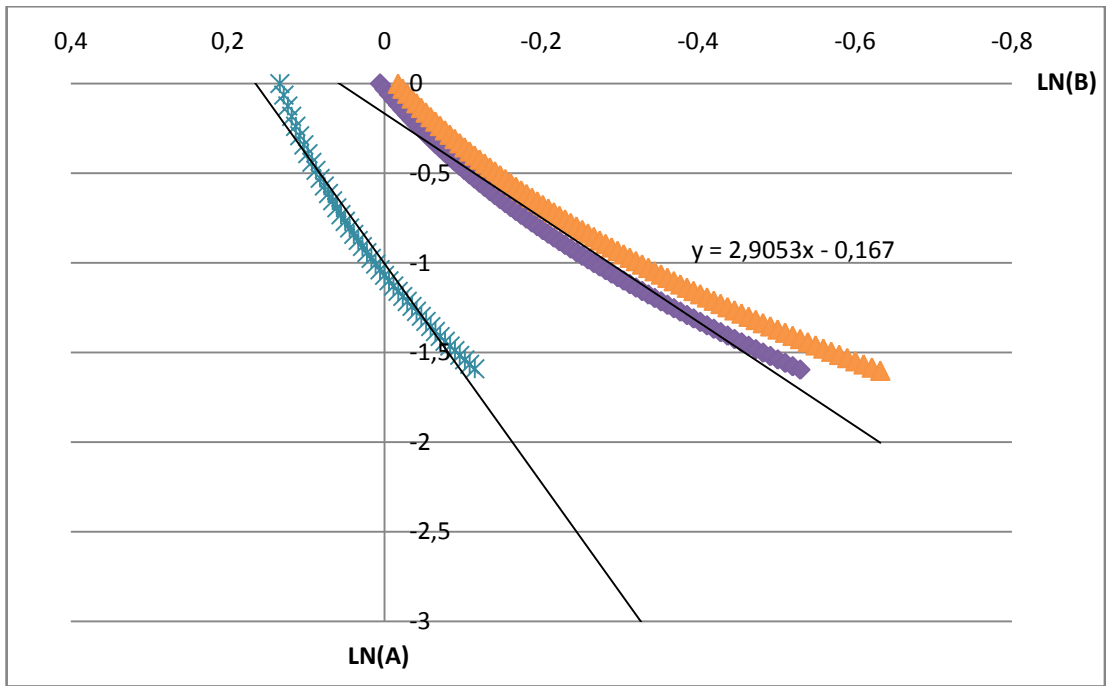


Рис. 5-11 Аппроксимация в логарифмических координатах отношения вида (5.5) для криопэгов на лайдах: $\frac{W_{НВ}-W_{НВ}(-22,5)}{W_{НВ}(T_{НЗ})-W_{НВ}(-22,5)} = A, \frac{T-T(-22,5)}{T_{НЗ}-T(-22,5)} = B$

Третий участок обрабатывается в виде уравнения (5.6) путем сглаживания в полулогарифмических координатах (см. рис 5-12 для нескольких криопэгов на поймах)

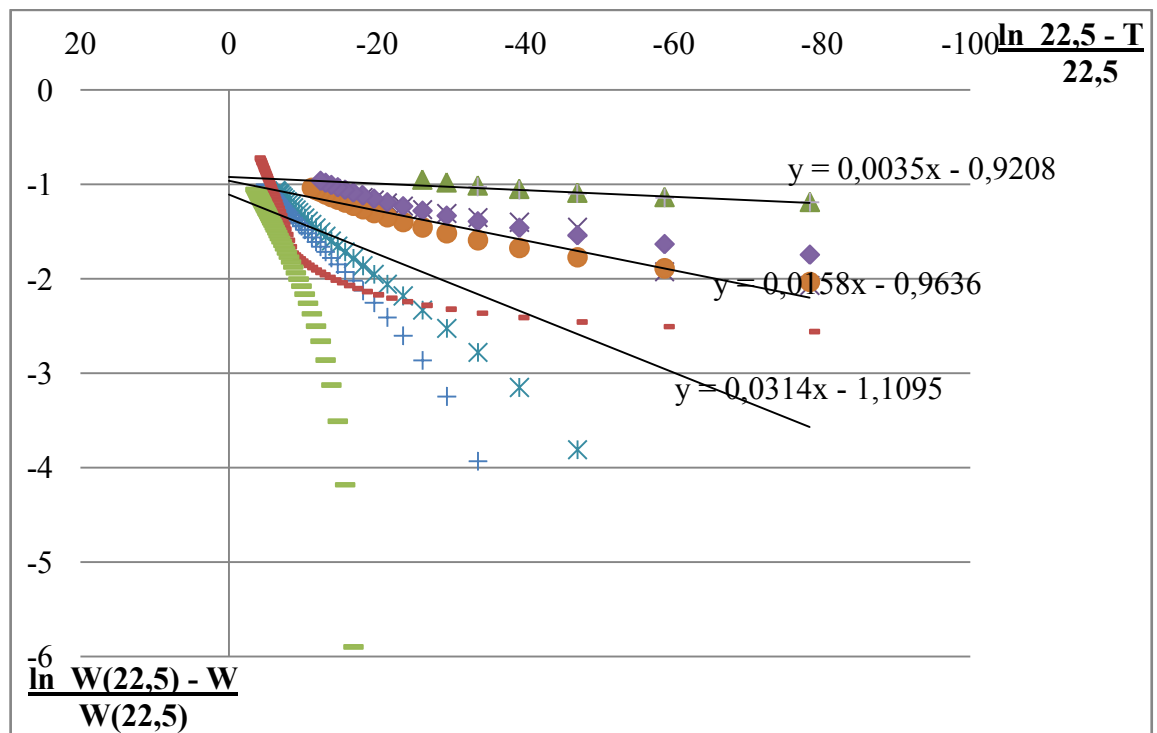


Рис. 5-12 Аппроксимация в полулогарифмических координатах отношения вида (5.6) для криопэгов на поймах

С помощью описанной методики, просчитаны в программе FREEZEBRINE и обработаны результаты расчета для криопэггов, находящихся на различных геоморфологических уровнях (лайды, поймы и террасы).

5.2.3 Методика прогноза плотности криопэггов. Для расчета плотности криопэггов ρ (г/см³), которая растет с увеличением минерализации M (г/л) и незначительно - с понижением температуры T (°C), и предлагается соотношение (5.7) (Доронин, Хасин, 1975):

$$\rho_w = 1 + 10^{-3} [28,15 + (0,8 - 0,002 \cdot T) \cdot (M - M_{s.w.})]; \quad 0 > T > T_{bf}; \quad 5 \leq M \leq 1, \quad (5.7)$$

где T – температура криопэга, °C; M – минерализация криопэга, г/л, $M_{s.w.}$ – минерализация морской воды, г/л.

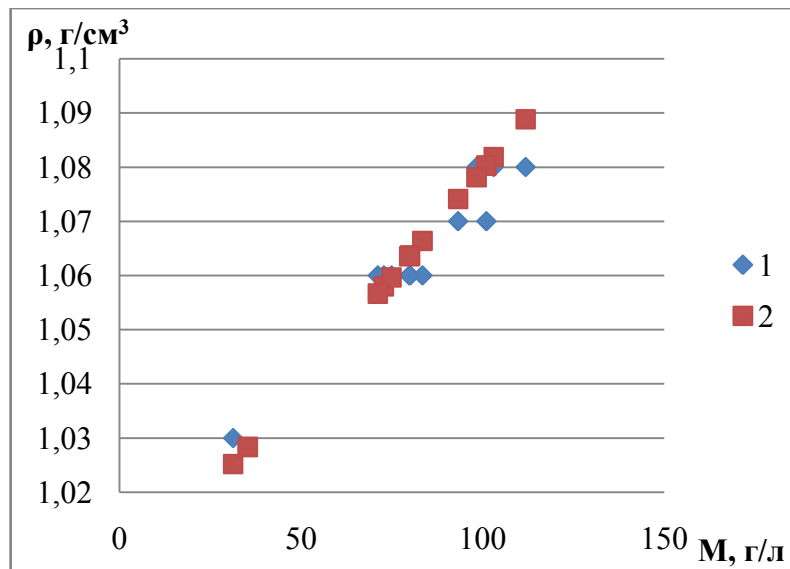


Рис. 5-9 Сопоставление расчетных данных по плотности криопэга ρ для лайд: 1 – расчет по программе FREEZEBRINE, 2 – расчет по формуле (5.7)

Величина плотности криопэга мало зависит от того где он расположен и в рамках погрешности в 1%, может быть рассчитана по формуле (5.7) (Комаров, Кияшко, 2011).

5.2.3 Методика прогноза теплофизических характеристик криопэггов. Поскольку теплоемкость грунтов в термодинамическом плане является экстенсивным параметром, для ее оценки применима гипотеза об аддитивности теплоемкостей ее компонентов (органоминерального скелета, незамерзшей воды, порового льда, порового газа) пропорционально их весовой (удельная теплоемкость) или объемной (объемная теплоемкость) доле. Представление данных по теплоемкости целесообразно представить в виде, аналогичным

виду для морской воды, как сумму двух слагаемых, одно из которых зависит от температуры, другое – от концентрации (Цуриков, 1976)

$$C_{uw}(T, M) = \alpha \cdot T^n - \beta \cdot M \quad (5.8),$$

где α - теплоемкость воды при 0 °С

Для нахождения коэффициента n используем экспериментальные данные, приведенные в таблице 5-7. Обработка данных проводилась двумя способами: подбор зависимости с помощью линии тренда – полиномиальная зависимость (рис. 6-16) и обработка в логарифмических координатах – степенная зависимость.

Таблица 5-7

Расчетные значения температурной зависимости удельной теплоемкости воды $C_{wt}(T)$
(Цуриков, 1978)

T, °С	C_{wt} , Дж/кг К	T, °С	C_{wt} , Дж/кг К	T, °С	C_{wt} , Дж/кг К
0,0	4210	-2,8	3890	-13,0	3510
-0,2	4150	-3,2	3860	-14,0	3490
-0,4	4110	-3,6	3840	-15,0	3470
-0,6	4060	-4,0	3820	-16,0	3450
-0,8	4030	-5,2	3800	-17,0	3440
-1,0	4010	-6,0	3700	-18,0	3430
-1,2	3990	-6,8	3670	-19,0	3410
-1,4	3970	-8,0	3630	-20,0	3400
-1,6	3950	-8,8	3600	-21,0	3390
-1,8	3930	-10,0	3570	-22,0	3380
-2,0	3920	-11,0			
-2,4	3900	-12,0			

В результате обработки данных с помощью линии тренда с помощью Microsoft Excel получена следующая параболическая зависимость для первого слагаемого уравнения (5.9):

$$\alpha \cdot T^n = 1,87 \cdot T^2 + 71,7 \cdot T + 4210 \quad (5.9)$$

В результате логарифмирование обеих частей уравнения получена степенная зависимость вида:

$$\alpha \cdot T^n = 4210 \cdot T^{-0,05} \quad T < 0^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

Результат сравнения полученных зависимостей с экспериментальными данными показан на рис. 5-10.

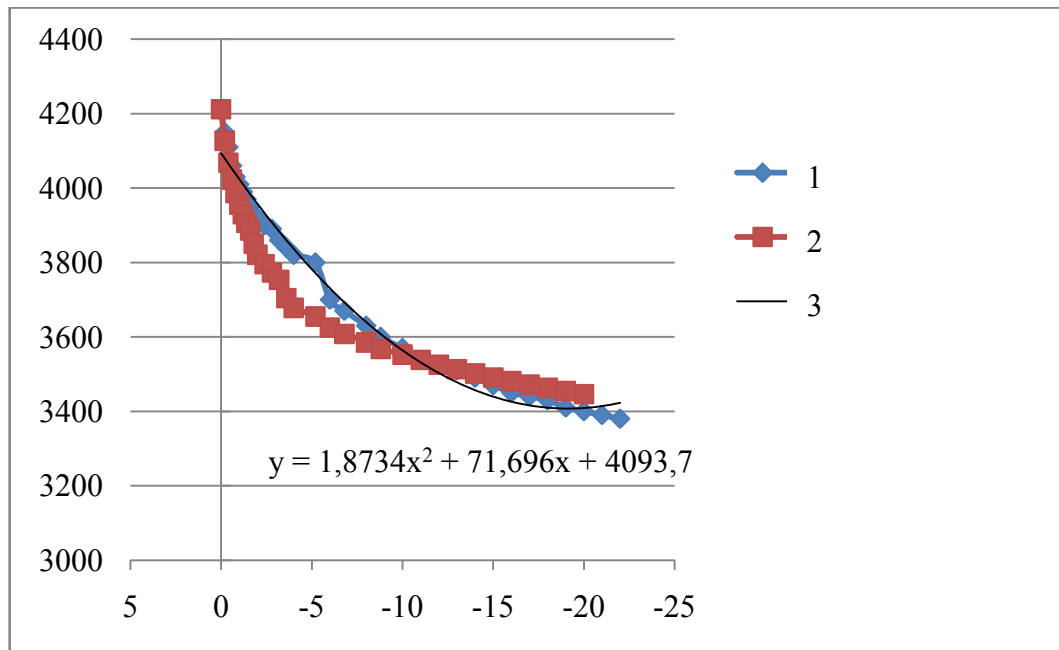


Рис. 5-10 Сопоставление результатов обработки данных по теплоемкости раствора в зависимости от температуры различными способами: 1- экспериментальные данные (таблица 5-7), 2 – расчет по формуле 5.10, 3 – расчет по формуле 5.9

Степенная зависимость лучше соответствует экспериментальным данным (ошибка до 3%). В результате выбрано отношение, наилучшим образом описывающее зависимость теплоемкости от температуры (5.10), где $n = -0,05$.

Влияние концентрации солей на теплоемкость оцениваем из данных О.И. Мамаева (Цуриков,1978). Тогда удельная теплоемкость рассола криопэга C_{uw} , кДж/(кг · К) будет представляться в виде:

$$C_{uw}(T, M) = 10^{-3} \cdot (4210 |T|^{-0,05} - 4,55M), \quad 5 < M < 130, \quad 0 > T > T_{bf}, \quad (5.11)$$

где M - минерализация, г/л, T - температура, °С, T_{bf} - температура начала замерзания.

Величина объемной теплоемкости криопэга определяется как произведение величины $C_{uw}(T, M)$, полученной по уравнению (5.11), на плотность рассола ρ_w , рассчитанной по соотношению (5.7).

В случае, если криопэг частично промерзает, величина его удельной теплоемкости C , кДж/(кг · К) равна:

$$C(T, M) = C_{uw}(T, M) \cdot W_{uw}(T, M) + C_i(T) \cdot [1 - W_{uw}(T, M)], \quad T \leq T_{bf}, \quad 5 < M < 130 \quad (5.12)$$

где $C_{uw}(T, M)$ – по формуле (5.11), $W_{uw}(T, M)$ – по формулам (5.5 и 5.6),

$C_i(T) = 2,12 + 0,0078 \cdot T$ – температурная зависимость удельной теплоемкости пресного льда, кДж/(кг · К), T (°C).

Коэффициент теплопроводности λ большинства растворов электролитов обычно понижается с увеличением концентрации (за исключением NaOH и Na₂SO₄) и увеличивается с повышением температуры. Для водных растворов электролитов коэффициент теплопроводности λ_p можно определить по способу Риделя который хорошо работает, когда анион и катион влияют на теплопроводность аддитивно (Викторов, 1977):

$$\lambda_p = \lambda_b + \sum a_i C_i, \quad (5.13)$$

где a_i – коэффициент, характеризующий изменение теплопроводности раствора при увеличении концентрации иона на 1 грамм-ион/л; C_i мольная концентрация раствора, моль/литр; λ_b – теплопроводность воды при 20°C.

Значения a_i для разных ионов различны: Na – 0.00; CO₃ – 0.0076 ; Cl – -0.00547; SO₄ – 0.0016; NO₃⁻ – -0.007; NH₄⁺ – -0.0016; Mg²⁺ – 0.0093; Ca²⁺ – 0.00058.

Учет температурной зависимости, реализуется с помощью соотношения:

$$\lambda_{pt} = \lambda_p \cdot f_t, \quad (5.14)$$

где λ_p – коэффициент теплопроводности раствора при 20 °C, f_t – поправочный коэффициент зависящий от температуры (таблица 5-8)

Таблица 5-8

Зависимость величины коэффициента f_t от температуры

t, °C	f _T	t, °C	f _T
-40	0.838	0	0.946
-30	0.865	10	0.973
-20	0.892	20	1.000
-10	0.919	30	1.025

Когда может присутствовать или только жидкая фаза, или жидкая и твердая фаза одновременно, коэффициент теплопроводности λ Вт/(м · К) рассчитывается по формуле (5.15):

$$\lambda = \lambda_{uw} + (\lambda_i - \lambda_{uw}) \cdot [1 - W_{uw}(M, T)], \quad 0 \geq T > -40, \quad 5 < M < 130 \quad (5.15)$$

где λ_{uw} – коэффициент теплопроводности жидкой фазы криопэга, определяемый по соотношению 5.16

$$\lambda_{uw} = (\lambda_b - 0,0009 \cdot M) \cdot (0,946 + 0,0027 T), \quad 0 > T > T_{bf}, \quad (5.16)$$

здесь $\lambda_b = 0,56$ Вт/(м · К) – коэффициент теплопроводности воды при минерализации $M=0$, $T=0$ °С и давлении $P=1$ атм; λ_i – коэффициент теплопроводности твердой фазы криопэга, который можно условно принять равной теплопроводности пресного льда.

$$\lambda_i = \lambda_o (1 - 0,0159 T), \quad (5.17)$$

здесь $\lambda_o = 2,22$ Вт/(м К) – теплопроводность льда при 0°С, T , (°С); $W_{uw}(M, T)$ для случая когда $0 > T > T_{bf}$ находится по формуле (5.4), для случая когда $T_{bf} \geq T \geq -40$ – по формулам (5.5, 5.6), а T_{bf} по формуле (5.3).

Проведенные по этой формуле оценки теплопроводности растворов солей при разных концентрациях показали, что их зависимость от температуры несущественна (значения коэффициента f_t не сильно отличаются от единицы). Следует отметить, что с увеличением концентрации теплопроводность водных растворов NaCl и Na₂CO₃ падает, а Na₂SO₄ растет.

Предложенные расчетные соотношения для температуры начала замерзания (5.3), фазового состава (5.4-5.6), плотности (5.7) и теплофизических свойств (5.11, 5.12) криопэгов могут быть использованы как научные рекомендации для создания региональных нормативных документов. В настоящее время такие документы отсутствуют.

Выводы к главе 5

1. Предложена методика прогноза изменения температуры начала замерзания, фазового состава, плотности и рН, теплофизических свойств криопэгов для двух случаев. Первый - когда имеется информация о водно- ионном составе пробы и - программный продукт, для оценки характеристик предлагается расчет по программе. Второй - когда имеется информация об общей минерализации пробы, а программный продукт отсутствует, для оценки характеристик предлагаются приближенные расчетные соотношения, которые могут быть использованы как научные рекомендации для создания региональных нормативных документов. В настоящее время такие документы для оценки свойств криопэгов отсутствуют.

2. Для оценки зависимости температуры начала замерзания от общей минерализации для криопэгов, расположенных на различных геоморфологических уровнях, использовалась формула Крюммеля для морской воды с соответствующей коррекцией значений коэффициентов. Статистическая обработка показала, что данные при разделении по принципу лайды-террасы-поймы, укладываются в доверительный интервал $x \pm s$: $x_{\text{cp}} = 50,0$ и $s = 1,78$ – для лайд; $x_{\text{cp}} = 58,9$ и $s = 7,34$ – для террас; $x_{\text{cp}} = 55,75$ и $s = 2,74$ – для поймы. Для всех данных в целом $x_{\text{cp}} = 57,14$ и $s = 11,42$. В области значений минерализации около 35 г/л температура начала замерзания для криопэгов, расположенных на лайдах, близка к таковой для морской воды.

3. Кривая фазового состава влаги для криопэгов имеет качественный характер, близкий к таковому для морской воды, однако количественные показатели естественно меняются. Результаты моделирования позволяют оценить абсолютные значения содержания жидкой и твердой фаз в криопэге, не учитывая долю возможного содержания жидкой фазы в образующемся льду за счет захвата солей. При понижении температуры от точки начала замерзания количество льда увеличивается, а в растворе образуются минералы мирабилита, кальцита, и др. Однако для практических целей целесообразно учитывать только влияние выпадения гидрогаллита ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) при температурах $-22 \dots -23^\circ\text{C}$. Для двух характерных диапазонов температурной кривой изменения фазового состава предложены расчетные формулы, аппроксимированные степенной и логарифмической зависимостями при условии «сшивки» уравнений при температуре $-22,5^\circ\text{C}$, которая получена статистической обработкой расчетов для разных минерализаций и химического состава криопэгов.

4. Значения плотности криопэгов растут с увеличением их минерализации, мало зависит от температуры и от того, где он расположен. Предлагается расчетное соотношение для оценки плотности при концентрациях от 10-110 г/л. Сопоставление натуральных данных по

величине рН и рассчитанных с помощью программного продукта, показало их удовлетворительную сходимость (ошибка не превышает 16%), при этом соблюдается и качественное соответствие между показателями щелочная –кислотная среда.

5. Предложены расчетные соотношения для оценки теплоемкости и коэффициента теплопроводности криопэггов, учитывающие зависимость от температуры, общей минерализации и водно-ионного состава.

Глава 6. Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги и теплофизических свойств засоленных пород п-ова Ямал

Предлагается методика для двух случаев, характеризующихся детализацией исходной информации о химическом составе и общей минерализации засоленных пород, а также наличием или отсутствием программного продукта:

1. Имеется информация о водно-ионном составе пробы водной вытяжки засоленных пород, полученная в полевых или лабораторных условиях и программный продукт;

2. Имеется информация о засоленности, полученная в лабораторных или полевых условиях (полевая химическая лаборатория, методика оценки по электропроводимости пробы и т.д.). Программный продукт отсутствует. В этом случае для оценки характеристик засоленных пород предлагаются приближенные расчетные соотношения, которые могут быть использованы как научные рекомендации для создания региональных нормативных документов.

6.1 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, и теплофизических свойств засоленных пород с помощью программного продукта

6.1.1 Методика прогноза температуры начала замерзания. Для работы с программой FREEZEBRINE вводятся данные по химическому составу водных вытяжек, которые должны быть соответствующим образом обработаны. Обработка осуществляется по методике, описанной в п. 3.3. С помощью программного продукта рассчитывалась температура начала замерзания $T_{нз}$ по алгоритму, описанному в пункте 5.1.1.

Температуру начала замерзания засоленных грунтов T_{bf} предлагается оценивать как аддитивную величину, суммирующую влияние поверхностных сил грунта, имеющих доминирующее значение в формировании температуры начала замерзания в незасоленных грунтах, а также концентрации и типа ионного состава порового раствора. Такое предположение не является строгим, более обоснованным является использование гипотезы об аддитивности химического потенциала порового раствора, который складывается из его составляющих, характеризующих адсорбционную, капиллярную и осмотически связанную влагу в породе (Комаров, 2003). При использовании программы за температуру начала промерзания незасоленных пород использовались значения, приведенные в СП 25.13330.2012.

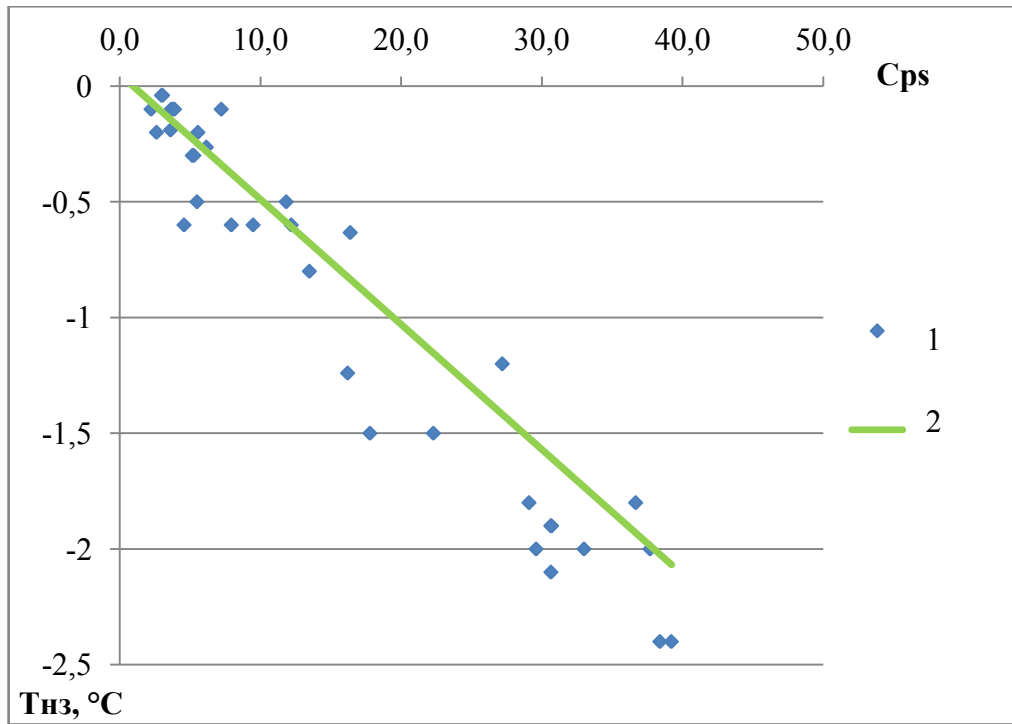


Рис. 6-1 Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по температуре начала замерзания $T_{нз}$ пород различного гранулометрического состава (Участок 1): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по программе.

При сопоставлении экспериментальных данных (таблица 6-1...6-5) с расчетом с помощью программного продукта погрешность составляет менее 8% (рис. 6-1).

6.1.2 Методика прогноза фазового состава. Для расчета в программе исходные данные по химическому составу водных вытяжек засоленных грунтов Участка 1, 2 и 3 (табл.3-3...3-7) были обработаны по методике, изложенной в п. 3.3. Но результат, полученный с помощью программного продукта необходимо откорректировать с учетом общей влажности W_{tot} . Полученные результаты сопоставлялись с исходными данными, полученными экспериментально (таблицы 6-1...6-5) для Участка 1. Сопоставление данных показало высокую сходимость результатов для всех грунтов, ошибка не превышала 5% для всех проб. В качестве примера сравнение расчетных и экспериментальных данных показано на рисунке 6-2 для пробы песка №5. Номера проб грунта соответствуют таблицам 3-3...3-7.

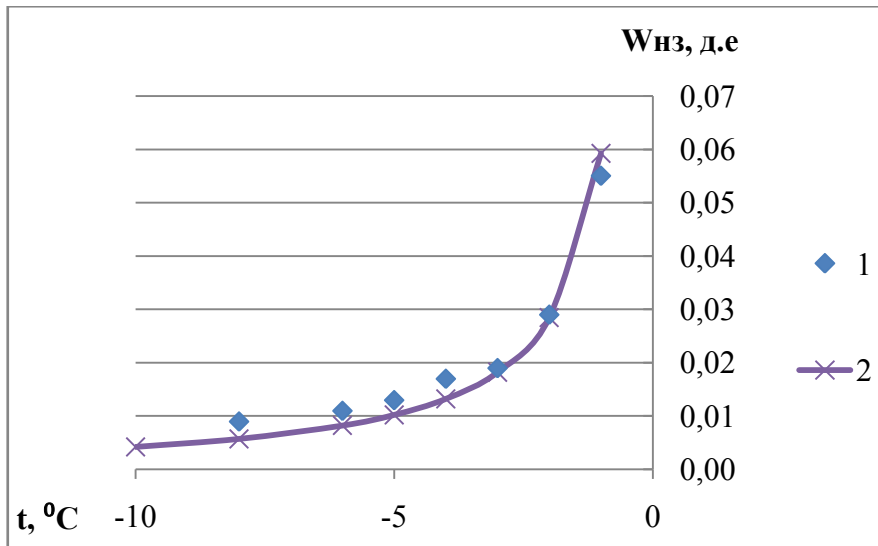


Рис.6-2 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для песков (Участок 1, проба грунта №5 по таблице 3-3): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по программе FREEZEBRINE

Экспериментальные данные по температуре начала замерзания и фазовому составу влаги для образцов песка (Участок 1)

№ пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Содержание незамерзшей воды при T ⁰ C								T _{нз} , °C
	от	до		-10	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
1	6,9	7,6	песок пылеватый			0,011	0,011	0,011	0,012	0,013	0,021	-0,10
2	33,4	34,0	песок пылеватый		0,013	0,013	0,013	0,014	0,014	0,015	0,016	0,00
3	14,8	15,5	песок пылеватый	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011	0,012	0,013	0,017	-0,10
4	24,0	25,0	песок пылеватый	0,012	0,013	0,015	0,016	0,018	0,022	0,029	0,051	-0,20
5	14,0	15,0	песок пылеватый		0,009	0,011	0,013	0,017	0,019	0,029	0,055	-0,30
6	17,0	18,0	песок пылеватый		0,040	0,043	0,045	0,051	0,059	0,077	0,126	-0,60
7	30,0	31,0	песок пылеватый			0,014	0,014	0,015	0,017	0,021	0,033	-0,20
8	15,0	15,7	песок пылеватый			0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,014	-0,04
9	30,0	31,0	песок пылеватый			0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,013	-0,02
10	15,0	16,0	песок пылеватый		0,043	0,043	0,043	0,044	0,045	0,047	0,051	-0,02
11	30,0	31,0	песок пылеватый	0,026	0,028	0,035	0,041	0,049	0,063	0,093	0,163	-0,80
12	69,0	70,0	песок пылеватый	0,031	0,033	0,039	0,044	0,051	0,062	0,084	0,122	-0,50
13	21,0	22,0	песок пылеватый	0,015	0,018	0,023	0,027	0,032	0,042	0,061	0,114	-0,60
14	30,0	30,6	песок пылеватый		0,028	0,033	0,038	0,044	0,055	0,079	0,155	-0,60
15	90,0	91,0	песок пылеватый		0,029	0,032	0,036	0,042	0,054	0,079	0,125	-0,59
16	119,0	120,0	песок пылеватый	0,012	0,012	0,015	0,017	0,019	0,024	0,034	0,061	-0,30

Таблица 6-2

Экспериментальные данные по температуре начала замерзания и фазовому составу влаги для образцов супеси (Участок 1)

№ пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Содержание незамерзшей воды при T ⁰ C								T _{нз} , °C
	от	до		-10	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
1	24,0	25,0	супесь песчанистая	0,035	0,037	0,041	0,045	0,052	0,062	0,087	0,154	-0,63
2	2,0	2,7	супесь пылеватая	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	-0,02
3	49,0	50,0	супесь песчанистая	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,16		-1,24
4	9,5	10,0	супесь пылеватая		0,064	0,067	0,070	0,073	0,079	0,090	0,110	-0,50
5	16,0	17,0	супесь песчанистая		0,030	0,032	0,033	0,035	0,040	0,049	0,075	-0,30
6	39,0	40,0	супесь пылеватая	0,075	0,083	0,098	0,110	0,129	0,162			-2,00
7	39,0	40,0	супесь песчанистая		0,073	0,086	0,097	0,113	0,140	0,192		-1,50
8	10,0	10,6	супесь песчанистая	0,040	0,040	0,042	0,043	0,044	0,046	0,051	0,065	-0,20
9	6,7	7,2	супесь пылеватая	0,046	0,046	0,046	0,046	0,047	0,048	0,049	0,052	-0,10
10	7,6	7,9	супесь пылеватая	0,049	0,050	0,051	0,051	0,052	0,054	0,058	0,061	-0,04
11	9,5	10,5	супесь пылеватая		0,057	0,059	0,060	0,062	0,064	0,069	0,091	-0,10
12	4,0	4,5	супесь пылеватая		0,043	0,043	0,043	0,044	0,046	0,049	0,054	-0,10
13	149,0	150,0	супесь пылеватая	0,065	0,069	0,076	0,083	0,093	0,111	0,146		-1,00
14	2,1	2,4	супесь пылеватая	0,043	0,043	0,043	0,044	0,045	0,046	0,048	0,051	-0,01

Экспериментальные данные по температуре начала замерзания и фазовому составу влаги для образцов суглинка (Участок 1)

№ скв.	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Содержание незамерзшей воды при T ⁰ C								T _{нз} , °C
	от	до		-10	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	39,0	40,0	суглинок легкий пылеватый	0,091	0,099	0,114	0,127	0,147	0,184			-2,0
2	110,0	111,0	суглинок тяжелый пылеватый	0,133	0,142	0,160	0,175	0,198	0,235			-2,7
3	79,0	80,0	суглинок тяжелый пылеватый	0,086	0,094	0,109	0,121	0,140	0,171	0,232		-1,8
4	79,0	80,0	суглинок легкий пылеватый	0,120	0,132	0,155	0,174	0,204	0,251			-2,9
5	100,0	101,0	суглинок тяжелый пылеватый	0,114	0,121	0,134	0,147	0,165	0,196	0,254		-1,8
6	79,0	80,0	суглинок легкий пылеватый	0,076	0,083	0,095	0,109	0,126	0,155	0,211		-1,5
7	148,5	149,5	суглинок тяжелый пылеватый	0,133	0,140	0,156	0,169	0,189	0,223			-2,5
8	41,0	42,0	суглинок легкий пылеватый	0,100	0,108	0,125	0,139	0,158	0,191			-2,0
9	80,0	81,0	суглинок тяжелый пылеватый	0,100	0,110	0,128	0,142	0,166	0,203			-1,8
10	59,0	60,0	суглинок легкий пылеватый	0,096	0,101	0,112	0,121	0,136	0,150			-2,0
11	149,0	150,0	суглинок тяжелый пылеватый	0,125	0,134	0,151	0,164	0,186	0,222			-2,6
12	149,0	150,0	суглинок тяжелый пылеватый	0,081	0,089	0,098	0,107	0,120	0,143			-2,1
13	79,0	80,0	суглинок легкий пылеватый	0,093	0,104	0,124	0,140	0,164	0,203			-2,4

Таблица 6-3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	148,0	149,0	суглинок легкий пылеватый	0,106	0,117	0,135	0,150	0,173	0,211			-2,5
15	69,4	70,5	суглинок легкий пылеватый	0,102	0,111	0,126	0,140	0,160	0,194			-2,2
16	109,7	110,5	суглинок легкий пылеватый	0,111	0,119	0,136	0,150	0,170	0,204			-2,2
17	149,0	150,0	суглинок легкий пылеватый	0,095	0,102	0,114	0,125	0,142	0,169			-1,9
18	4,6	5,1	суглинок легкий пылеватый	0,072	0,072	0,074	0,076	0,078	0,083	0,091	0,106	-0,1

Таблица 6-5

Экспериментальные данные по температуре начала замерзания и фазовому составу влаги (Участок 3)

№гпш	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Содержание незамерзшей воды при T°С								Тв, °С
	от	до		-10	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
1	22,5	23,1	песок	0,018	0,020	0,026	0,032	0,040	0,054	0,082	0,167	-0,6
2	27,5	28,1	песок		0,012	0,013	0,015	0,017	0,021	0,029	0,053	-0,2
3	35	35,6	суглинок	0,128	0,134	0,147	0,158	0,175	0,204	0,264		-1,6
4	50,1	50,7	суглинок	0,128	0,135	0,151	0,165	0,186	0,222	0,292		-1,65
5	69,8	70,4	суглинок	0,123	0,129	0,143	0,154	0,172	0,201	0,261		-1,5
6	90	90,6	суглинок	0,143	0,149	0,160	0,169	0,182	0,202	0,239		-1,5
7	120,1	120,7	суглинок	0,095	0,099	0,107	0,113	0,122	0,136			-2,1
8	149,5	150,1	суглинок	0,089	0,093	0,099	0,105	0,112	0,123	0,142		-1,9

Экспериментальные данные по температуре начала замерзания и фазовому составу влаги (Участок 2)

№ пп	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Содержание незамерзшей воды при T°С								Тнз, °С
	от	до		-10	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
1	14,7	15,3	песок			0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,035	0,0
2	99,8	100,4	суглинок	0,111	0,122	0,143	0,158	0,182	0,226			-2,5
3	179,4	180,0	суглинок	0,046	0,051	0,059	0,066	0,075	0,092	0,112		-2,2
4	200,0	200,6	песок	0,020	0,022	0,025	0,028	0,032	0,040	0,059	0,137	-0,4
5	9,5	10,1	песок	0,012	0,012	0,014	0,015	0,017	0,022	0,031	0,064	-0,3
6	79,0	80,0	суглинок	0,111	0,115	0,095	0,109	0,126	0,155	0,211		-2,1
7	330,0	331,0	суглинок	0,105	0,113	0,131	0,145	0,170				-3,4
8	389,0	391,0	суглинок	0,108	0,115	0,129	0,142	0,162				-2,9
9	2,4	2,7	песок	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,016	0,018	0,027	-0,3
10	25,0	26,0	супесь	0,089	0,093	0,103	0,112	0,127	0,151	0,187		-1,9
11	69,5	70,0	суглинок	0,077	0,083	0,096	0,107	0,124	0,153	0,198		-2,8
12	110,0	111,0	суглинок	0,094	0,099	0,112	0,122	0,139	0,166			-2,1
13	149,0	150,0	песок	0,025	0,026	0,028	0,030	0,034	0,040	0,055	0,104	-0,4

6.2 Методика прогноза температуры начала замерзания, фазового состава влаги, и теплофизических свойств засоленных с помощью приближенных инженерных соотношений

При разработке методики прогноза мы исходили из идеологии и формы представления результатов в СП 25.13330.2012 Актуал. ред.СНиП 2 02 04-88 ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ.

6.2.1 Методика прогноза температуры начала замерзания засоленных пород. Температуру начала замерзания оценивается как аддитивная величина, суммирующая влияние поверхностных сил грунта, концентрации и типа ионного состава порового раствора (СП 25.13330.2012):

$$T_{bf} = A - B [\Psi \cdot C_{ps} (D_{sal}, W_{tot}) + G \cdot C_{ps}^2 (D_{sal}, W_{tot})], \quad (6.1)$$

где A – коэффициент, равный температуре начала замерзания незасоленного грунта, принимаемый для песков крупных и средних фракций равным $-0,10$ °С, супесей – $-0,15$ °С, суглинков – $-0,20$ °С, глин – $-0,25$ °С; B – коэффициент, зависящий от типа засоления грунта, $B = 0$ - для незасоленных грунтов, $B = 1$ -для засоленных грунтов морского генезиса, $B = 0,94$ – для засоленных грунтов континентального генезиса; $C_{ps} = D_{sal} / (D_{sal} + W_{tot})$, W_{tot} –общая влажность, д.е., а $\Psi=53$ и $G=40$ – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, для засоленных пород различной степени концентрации порового раствора задача сводится к нахождению коэффициентов Ψ , G и A .

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что данные, полученные при расчете по формуле (6.1) и полученные экспериментально для исследуемых засоленных пород Участка 1 при сравнении дают ошибку до 15% (рис. 6-3).

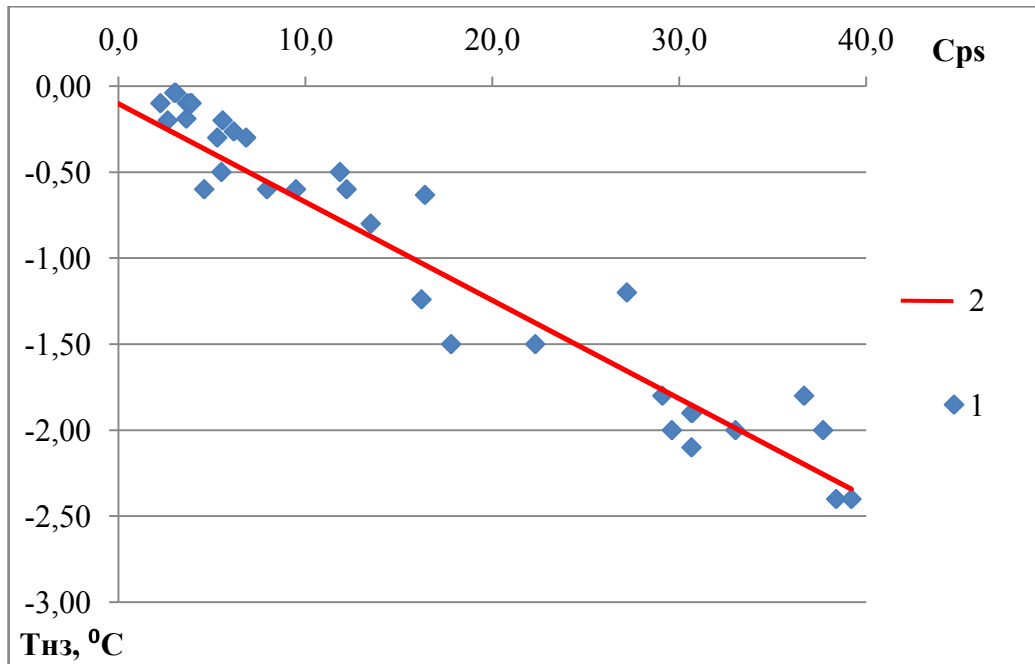


Рис. 6-3 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре начала замерзания пород различного гранулометрического состава (Участок 1): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (6.1)

Как показано в п.6.1.1, погрешность при сопоставлении экспериментальных данных с программным продуктом составляет менее 8% (рис. 6-1). Такие погрешности позволяют предлагать корректировку коэффициентов Ψ и A для более точного расчета по формуле (6.1) для засоленных пород Участка 1.

Зная величины засоленности D_{sal} и общей влажности W по формуле (3.7) рассчитывалась величина концентрации порового раствора C_{ps} и с помощью пакета «Microsoft Office Excel» находился тангенс угла наклона (Ψ) зависимости $T_{нз}=f(C_{ps})$ для различных пород с учетом корректировки значений коэффициента A (см. приложение 4 П.4.1-П.4.3).

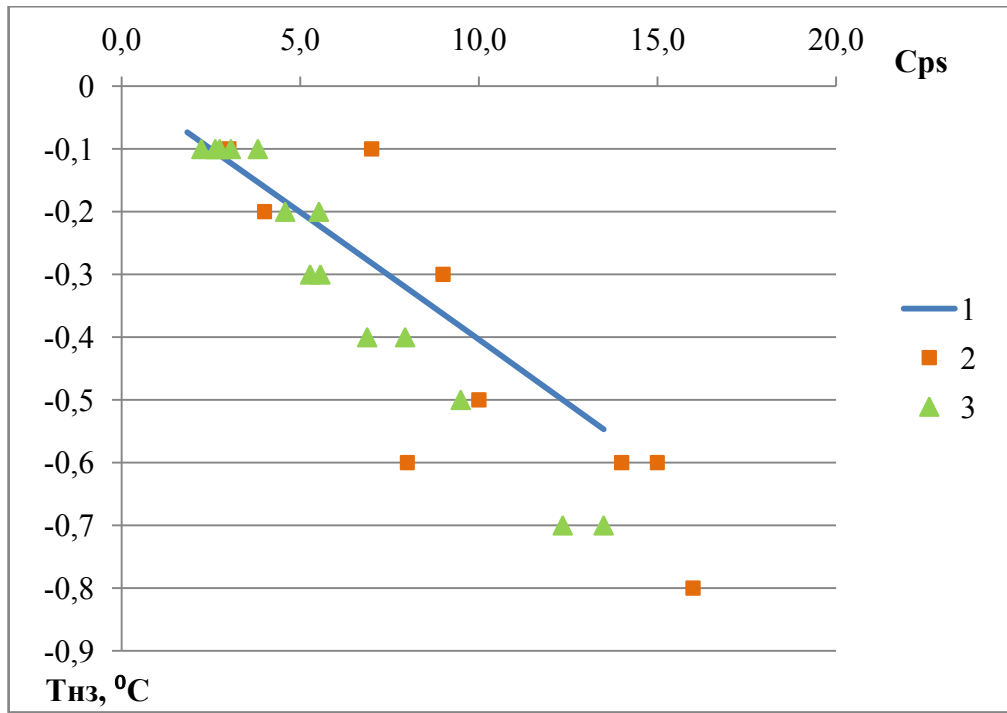


Рис. 6-4 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре начала замерзания для образцов песка (Участок 1): 1 – расчет по формуле (6.1), 2 – экспериментальные данные, 3 – расчет по программе FREEZEBRINE.

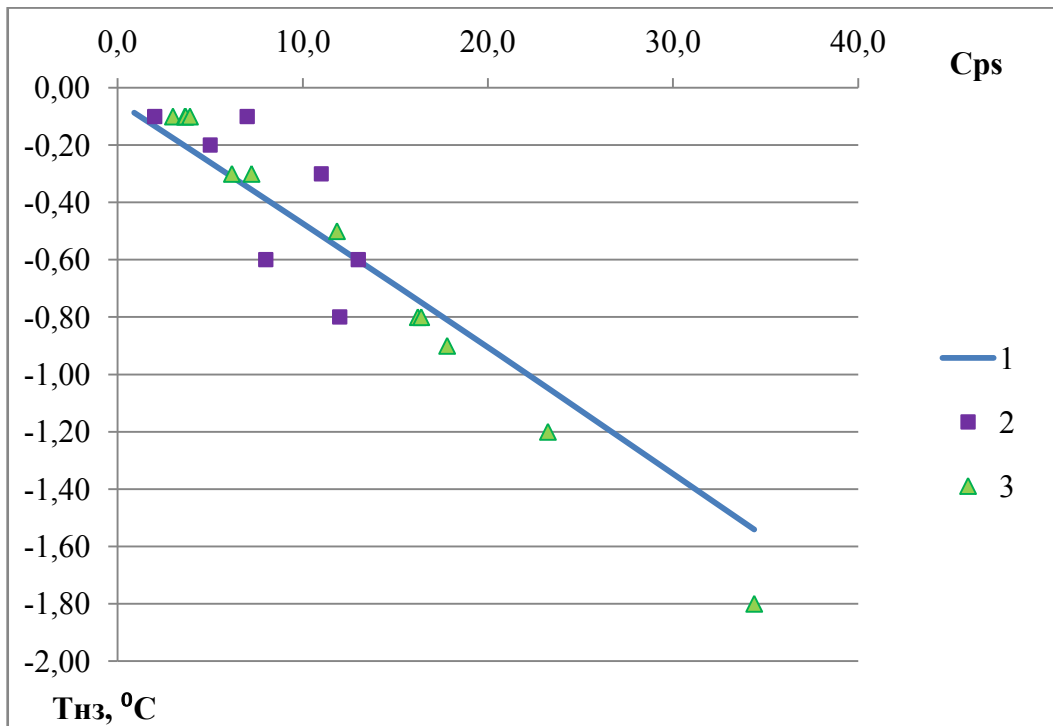


Рис. 6-5 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре начала замерзания T_{нз}. Супеси (Участок 1): 1 – расчет по формуле (6.1), 2 – экспериментальные данные, 3 – расчет по программе

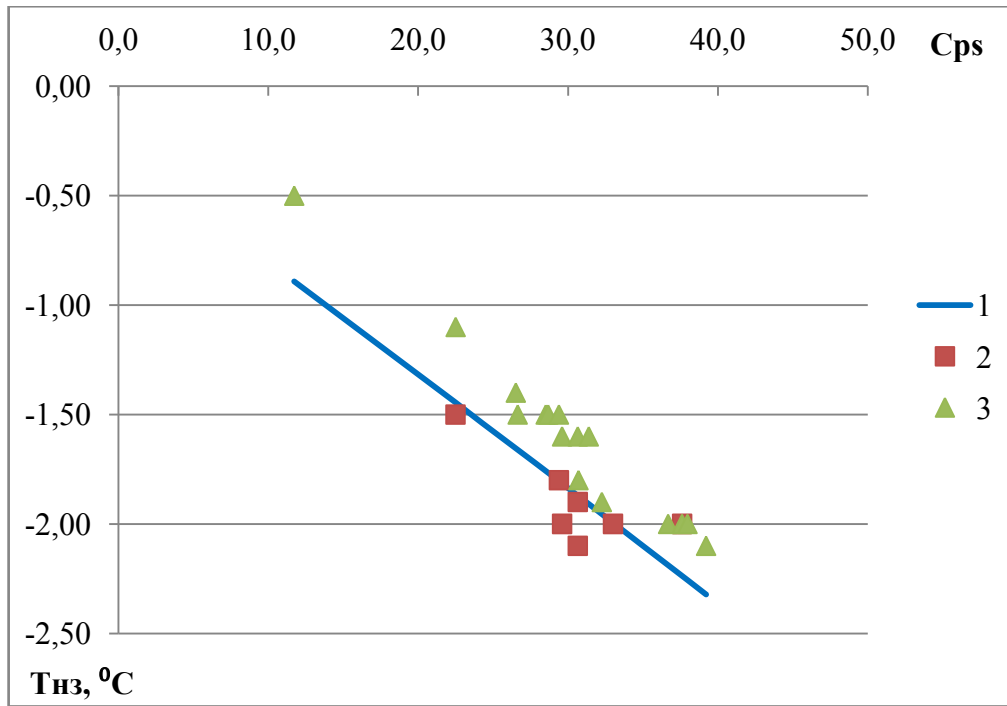


Рис. 6-6 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре начала замерзания $T_{нз}$. Суглинки (Участок 1): 1 – расчет по формуле (6.1), 2 – экспериментальные данные, 3 – расчет по программе

Полученные результаты подбора Коэффициентов Ψ и A приведены в таблице 6-6

Таблица 6-6

	Коэффициент Ψ	Коэффициент A
Пески	40	0,0
Супеси	42	-0,1
Суглинки	50	-0,3

6.2.2 Методика прогноза фазового состава засоленных пород. Для разработки методики было проведено сопоставление экспериментальных и расчетных (по программе и нормативной литературе) данных. За основу взят СП 25.13330.2012 для расчета количества незамерзшей воды для засоленных пород:

$$W_w = k_w W_p + \eta D_{sal} \quad (6.2)$$

Первое слагаемое уравнения (6.2) отвечает за влияние на величину незамерзшей воды адсорбционных и менисковых сил, второе – за влияние засоленности. Для песков составляющая за счет влияния адсорбционных и менисковых сил настолько мала, что ей можно пренебречь и

принять равной нулю. В СП 25.13330.2012 видно, что $K=0$, $W_p=0$. Значит, на количество незамерзшей воды в песках влияет только засоленность.

Для расчета в программе FREEZEBRINE вводятся данные по химическому составу водных вытяжек с учетом их засоленности (см. п. 3.3). Т.е. результат расчета также показывает только влияние засоленности на формирование фазового состава. Таким образом, при сравнении для песков значений количества незамерзшей воды, рассчитанных по программе, по СП 25.13330.2012 и полученные экспериментально, должны получаться очень близкие значения. Как показано в 6.1.2, сопоставление данных, полученных экспериментально, по формуле СП 25.13330.2012 и – в результате расчета в программе показало высокую сходимость результатов (рис. 6-2) При совместном сравнении экспериментальных и расчетных по программе и по СП данных видно, что значения, рассчитанные по СП, завышены (рис. 6-7...6-9). Результат сравнения для всех проб водных вытяжек по пескам – в приложении 3.1.1 (Б) (стр.1-6). Номера проб грунта соответствуют таблицам 3-3...3-7:

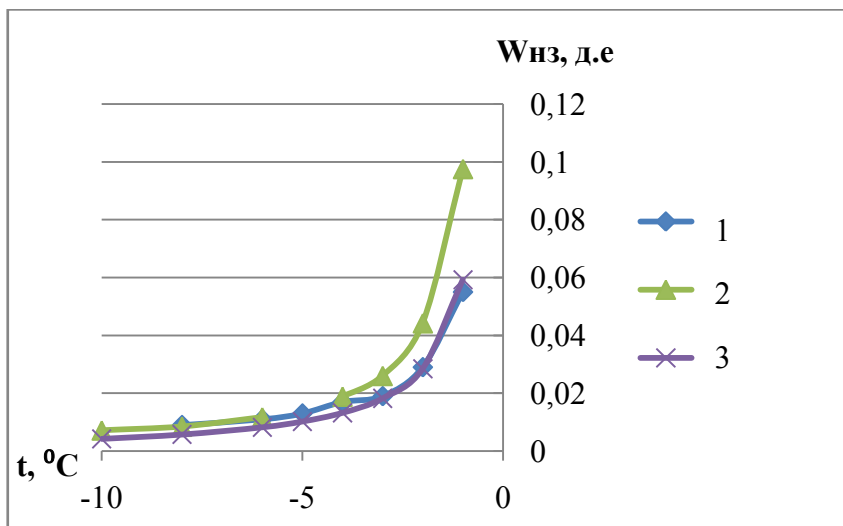


Рис.6-7 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для песков (Участок 1, проба грунта №5, глубина 14-15 м): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (6.2), 3 – расчет по программе FREEZEBRINE

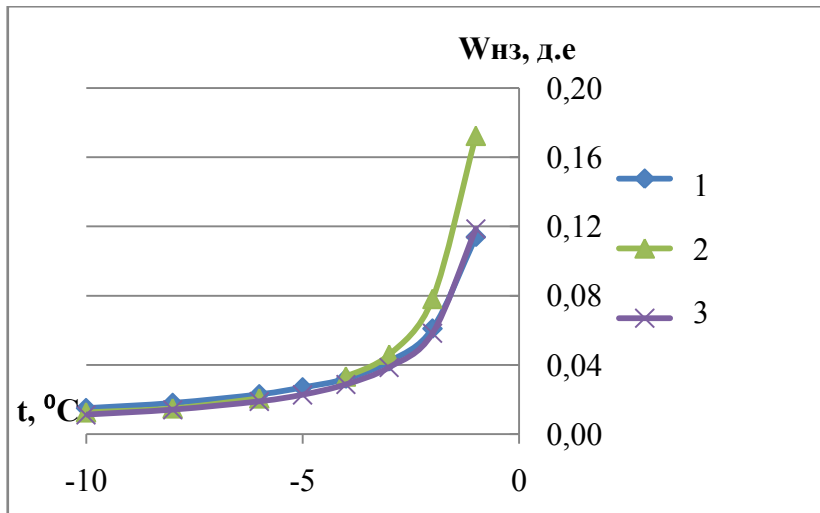


Рис. 6-8 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для песков (Участок 1, проба грунта №13, глубина 20-21 м): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (6.2), 3 – расчет по программе FREEZEBRINE

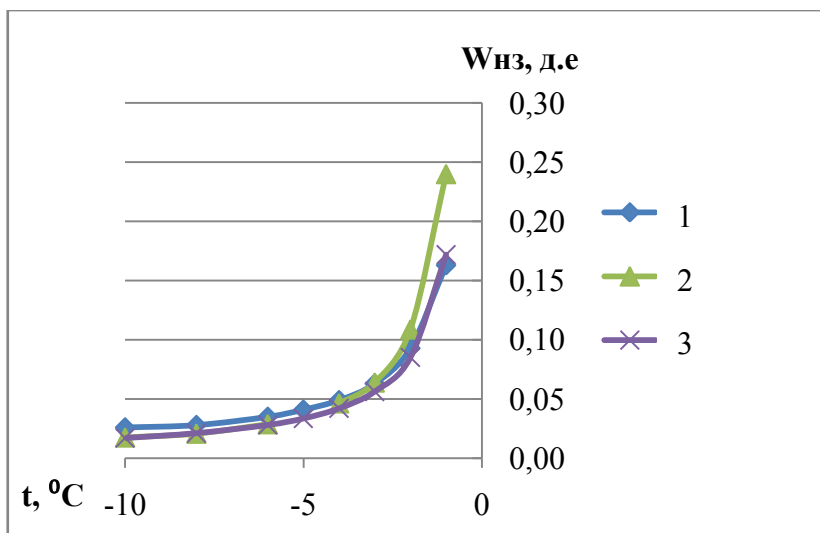


Рис. 6-9 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для песков (Участок 1, проба грунта №11, глубина 30-31 м): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (6.2), 3 – расчет по программе FREEZEBRINE

Для более точного расчета по формуле СП 25.13330.2012 (6.2) для Участка 1 предлагается скорректировать коэффициент η для всех дисперсных грунтов. Для этого подбирается коэффициент η так, чтобы результат, полученный по второму слагаемому, отвечающему за засоленность ($\eta \cdot D_{sal}$) максимально приближался к результатам, полученным по программе.

Результат подбора коэффициента η для песков приведен в таблице 6-7, который получен на основании обработки данных, приведенных в приложении 3.1.1 (Б) (стр.56-67), для супесей - в приложении 3.1.2 (Б) (стр.71-80), для суглинков - в приложении 3.1.3 (Б) (стр.85-96).

Таблица 6-7

Скорректированные значения коэффициента η для пород Участка 1

Грунты	Число пластичности I_p , д.е.	Величина коэффициента η при температуре грунта T , °C						
		-10	-8	-6	-4	-3	-2	-1
Пески и супеси	$I_p \leq 0,02$	4	5	6	10	13	21	48
Супеси	$0,02 < I_p \leq 0,07$	5	5,5	7	11,5	15,5	23,5	57,5
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	5	6,5	9	13	17	25	52
Суглинки	$I_p > 0,13$	6	7	10	14	19	26	55

Но корректировка только коэффициента η дает сходимость экспериментальных и расчетных значений только для песков, поскольку первое слагаемое формулы СП 25.13330.2012 (6.2) для них равно нулю. Для супесей и суглинков необходимо также скорректировать коэффициент K_w так, чтобы результат, полученный по формуле СП 25.13330.2012 (6.2) с откорректированными коэффициентами η и K_w максимально совпадали с экспериментальными данными (таблицы 6-2, 6-3). Графики, показывающие сходимость эксперимента с расчетными значениями по формуле СП 25.13330.2012 (6.2) с новыми коэффициентами приведены на рисунках 6-10 – 6-12) (Кияшко, 2013).

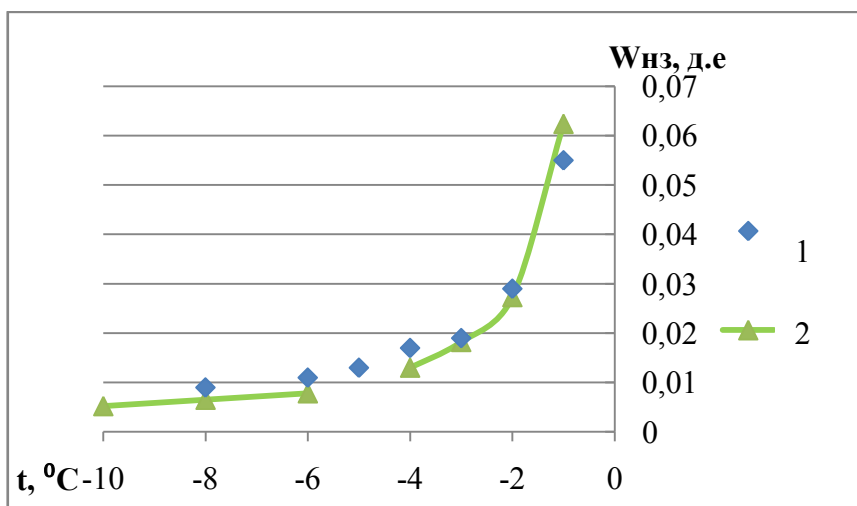


Рис.6-10 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для песков (Участок 1, проба грунта №5, глубина 14-15 м): 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (5.1)

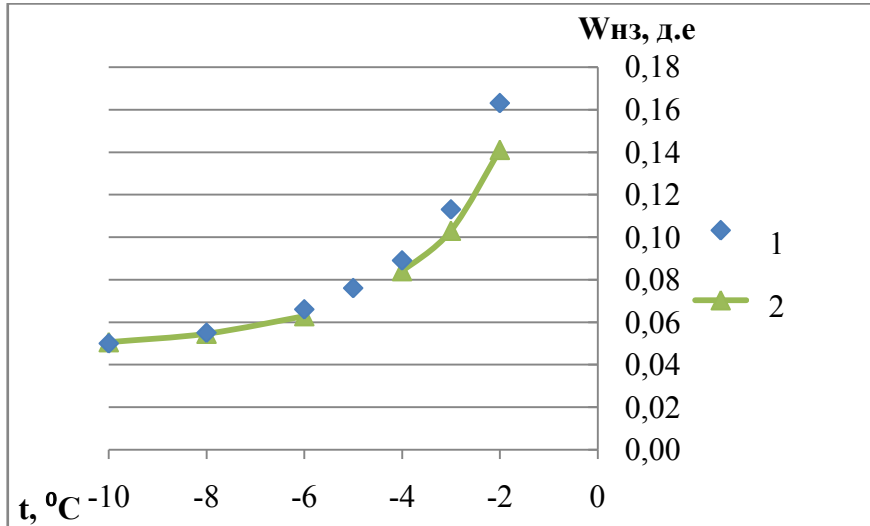


Рис. 6-11 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для супесей (Участок 1), проба грунта №3, глубина 49-50: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (5.1)

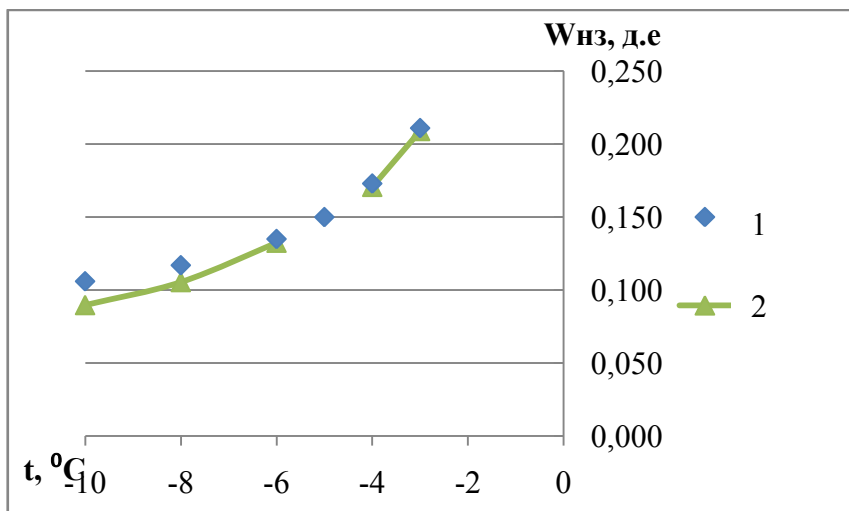


Рис. 6-12 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по количеству незамерзшей воды для суглинков (Участок 1), проба грунта №14, глубина 148-149: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле (5.1)

Результат подбора коэффициента K_w для супесей приведен в таблице 5-5, который получен на основании обработки данных, приведенных в приложении 3.1.2 (Б) (стр.6-10), для суглинков - в приложении 3.1.3 (Б) (стр.7-12).

Таблица 6-8

Скорректированные значения коэффициента K_w для пород Участка 1

Грунты	Число пластичности I_p , д.е.	Величина коэффициента K_w при температуре грунта T , °C						
		-10	-8	-6	-4	-3	-2	-1
Пески		0	0	0	0	0	0	0
Супеси	$I_p \leq 0,02$							
	$0,02 < I_p \leq 0,07$	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,22	0,28
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25	0,28	0,37
	$0,13 < I_p \leq 0,17$	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,37	0,47

Сравнение расчетных значений по программе, по формуле СП с новыми коэффициентами и полученных экспериментально приведено в приложениях 3.1.1 (А) (для песков), 3.1.2 (А) (для супесей) и 3.1.3 (А) (для суглинков).

По аналогичной методике были обработаны данные для Участка 2 (приложение 3.2) и Участка 3 (приложение 3.3). Экспериментальные данные для пород Участка 2 представлены в таблице 6-4, для Участка 3 – в таблице 6-5. Коэффициенты для Участка 2 приведены в таблицах 6-9, 6-10, для Участка 3 – в таблицах 6-11, 6-12

Таблица 6-9

Скорректированные значения коэффициента η для пород Участка 2

Грунты	Число пластичности I_p , д.е.	Величина коэффициента η при температуре грунта T , °C						
		-10	-8	-6	-4	-3	-2	-1
Пески и супеси	$I_p \leq 0,02$	7	9	11	15	20	30	60
Супеси	$0,02 < I_p \leq 0,07$	5	5,5	7	11,5	15,5	23,5	57,5
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	4	6	8	12	15	23	45
Суглинки, глины	$I_p > 0,13$	3	5	7	11	14	22	40

Таблица 6-10

Скорректированные значения коэффициента K_w для пород Участка 2

Грунты	Число пластичности I_p , д.е.	Величина коэффициента K_w при температуре грунта T , °С						
		-10	-8	-6	-4	-3	-2	-1
Пески		0	0	0	0	0	0	0
Супеси	$I_p \leq 0,02$							
	$0,02 < I_p \leq 0,07$	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,22
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25	0,28	0,37
	$0,13 < I_p \leq 0,17$	0,32	0,33	0,35	0,36	0,37	0,4	0,5

Таблица 6-11

Скорректированные значения коэффициента η для пород Участка 3

Грунты	Число пластичности I_p , д.е.	Величина коэффициента η при температуре грунта T , °С						
		-10	-8	-6	-4	-3	-2	-1
Пески и супеси	$I_p \leq 0,02$	4	5	6	10	14	21	48
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	5	6	8	12	16	25	54
Суглинки, глины	$I_p > 0,13$							

Таблица 6-12

Скорректированные значения коэффициента K_w для пород Участка 3

Грунты	Число пластичности I_p , д.е.	Величина коэффициента K_w при температуре грунта T , °С						
		-10	-8	-6	-4	-3	-2	-1
Пески		0	0	0	0	0	0	0
Супеси	$I_p \leq 0,02$							
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,27	0,36
	$0,13 < I_p \leq 0,17$	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,36	0,46

6.2.3 Методика прогноза теплофизических характеристик засоленных пород. В 25.13330.2012 величины коэффициента теплопроводности задаются в виде таблицы в зависимости от влажности W_{tot} , плотности скелета ρ_0 и степени засоленности D_{sal} . Мы предлагаем представить результаты для расчета коэффициента теплопроводности в зависимости от тех же параметров в виде аналитической зависимости. Для нахождения этих соотношений предлагаем использовать регрессионный анализ.

Регрессионное уравнение будет иметь вид типа:

$$\lambda = A \cdot W_{tot} + B \cdot \rho_0 + C \cdot D_{sal} + K, \quad (6.3)$$

где А, В, С, К – коэффициенты, которые могут быть как положительными, так и отрицательной величиной.

Проиллюстрируем оценку коэффициентов А, В, С, К на примере экспериментальных данных для засоленных пород Участка 1. Были обработаны данные по пескам (35 проб), супесям (22 проб) и суглинкам (70 проб). Результат обработки с помощью регрессионного анализа представлен в виде таблиц в приложениях 5.1 (пески), 5.2 (супеси) и 5.3 (суглинки). Полученные результаты обобщены в таблице 6-13.

Таблица 6-13

Значения коэффициентов А, В, С, К для пород Участка 1

	А	В	С	К
Пески	- 2,4	1,7	- 0,2	- 0,75
Супеси	0,005	1,7	- 0,4	- 1,4
Суглинки	-1,9	- 0,3	0,1	2,3

Сопоставление экспериментальных и расчетных по формуле (6.3) результатов, представлено на рис.6-13 – 6-15, которое показало, что погрешность значений, получаемых по регрессионной формуле 6.3, относительно экспериментальных данных составляет для песков 16%, для суглинков 14%, для супесей 19%.

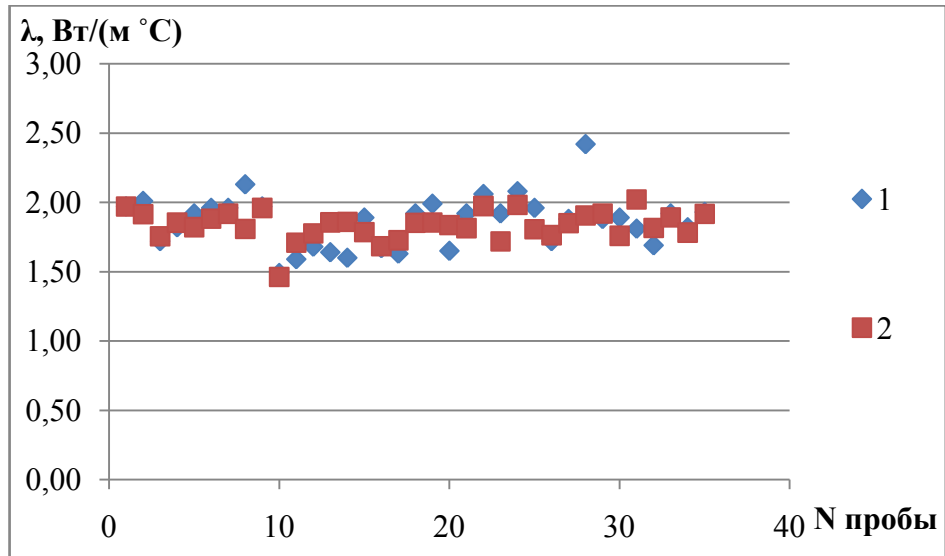


Рис. 6-13 Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по теплопроводности для песков Участка 1: 1- экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле 6.3

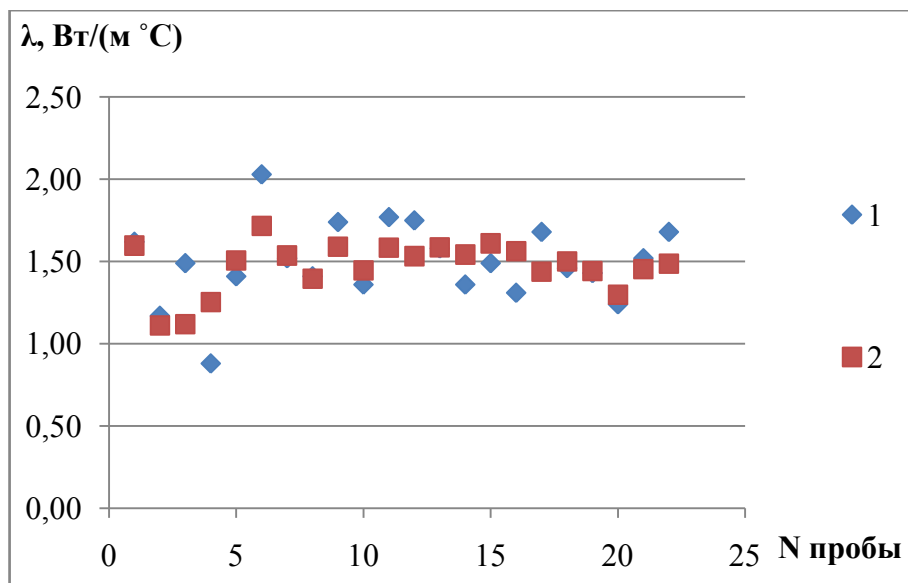


Рис. 6-14 Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по теплопроводности для супесей Участка 1: 1- экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле 6.3

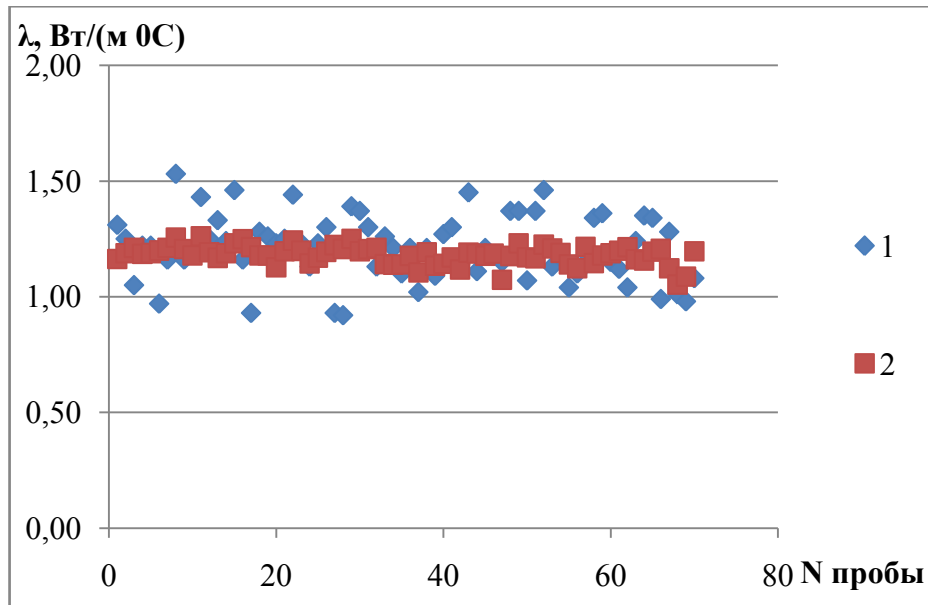


Рис. 6-15 Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по теплопроводности для суглинков Участка 1: 1- экспериментальные данные, 2 – расчет по формуле 6.3

Теплоемкость – величина аддитивная, рассчитывается как сумма теплоемкостей компонентов (органо-минерального скелета, незамерзшей воды, порового льда, порового газа) пропорционально их весовой (удельная теплоемкость), объемной (объемная теплоемкость) или мольной (мольная теплоемкость) доле.

Значения объемной теплоемкости засоленных грунтов в мерзлом состоянии рассчитывается по формуле (6.4), где большинство слагаемых являются хорошо изученными:

$$C_f(T, C_{ps}) = \{C_p + C_{uw}(T, C_{ps}) W_{uw}(T, D_{sal}) + C_i(T) \cdot [W_{tot} - W_{uw}(T, D_{sal})]\} \cdot \rho_{d,th,f}, T \leq T_{bf}, \quad (6.4)$$

где C_p - удельная теплоемкость скелета пород (таблица 6-14); $W_{uw}(T, D_{sal})$ – содержание незамерзшей воды; T_{bf} – температура начала замерзания; $C_{uw}(T, C_{ps})$ - удельная теплоемкость поровой влаги, зависящая от засоленности, кДж/(кг·К); $C_i(T) = 2,12 + 0,0078T$ – удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·К), $\rho_{d,th,f}$ – плотность скелета грунта

Таблица 6-14

Величина теплоемкости скелета $C_{ск}$ для грунтов разного гранулометрического состава

Грунты	Песок	Супесь	Глина и суглинок
$C_{ск}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	750	850	950

Для оценки теплоемкости незамерзшей воды как функции от концентрации порового раствора, используем соотношение (5.11).

Результаты исследования для температуры начала замерзания (6.1) со значениями коэффициентов, принятых по таблице (6-6), фазового состава (6.2) со значениями коэффициентов, принятых по таблицам (6-7...6-12) и теплофизических свойств (6.3), со значениями коэффициентов, принятых по таблице (6-13) и теплоемкости (6.5), со значениями коэффициентов, принятых по таблицам (6-15) можно использовать в качестве научных рекомендаций для создания региональных нормативных документов применительно к засоленным породам п-ова Ямал.

Выводы к главе 6

1. Для засоленных пород предложена методика прогноза изменения температуры начала замерзания, фазового состава, и теплофизических свойств для двух случаев, указанных в п. 5.1. Предложенные соотношения разработаны с учетом идеологии и формы представления их в СП 25.13330.2012 (2012 Актуал. ред.СНиП 2 02 04-88 ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ) с коррекцией количественных показателей.

2. При сопоставлении экспериментальных данных по температуре начала замерзания с расчетными, полученными с помощью программного продукта, погрешность составляет менее 8%, а с нормативными по СП 25.13330.2012 - 15%. Сопоставление экспериментальных данных по фазовому составу и расчетных, полученных с помощью программного продукта показало, что ошибка не превышает 5% для всего спектра исследованных проб водных вытяжек. На основании экспериментальных данных было предложено скорректированное расчетное инженерное соотношение.

3. Величины коэффициента теплопроводности в СП 25.13330.2012 задаются в виде таблицы в зависимости от общей влажности, плотности скелета и степени засоленности. Для расчета коэффициента теплопроводности в зависимости от тех же параметров был использован регрессионный анализ, позволяющий получить соотношение в виде аналитической зависимости. Сопоставление экспериментальных и расчетных по формуле результатов, показало, что погрешность значений, получаемых по предложенному соотношению относительно экспериментальных данных составляет для песков 16%, для суглинков 14%, для супесей 19% для исследованных участков территории п-ов Ямал.

4. Для оценки теплоемкости засоленных пород п-ов Ямал предложено соотношение, учитывающее зависимость теплоемкости порового раствора от температуры и засоленности.

ВЫВОДЫ

1. Засоленные породы и криопэги широко распространены на территории п-ова Ямал. Для них характерен морской тип засоления. Засоленность пород колеблется в пределах от 0,05 до 1,2%. Минерализация криопэгов – меняется от 6 до 150 г/л, состав хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов. Исследуемые криопэги вскрыты на глубинах от 2 до 12 м.

2. Экспериментальное исследование температуры начала замерзания, фазового состава влаги и теплофизических свойств пород нарушенного и ненарушенного сложения осуществлялось в лаборатории ОАО «Криос» на аппаратной базе, разработанной в институте ИПИПРЭ Национальной Академии Наук Белоруссии (г. Минск).

Для определения коэффициента теплопроводности использовался метод пластины с коррекцией по эталонным телам как метод, дающий наименьшую погрешность, позволяющий надежно определять коэффициент в области фазовых переходов, что важно для засоленных пород. Адиабатический калориметр с непрерывным подводом тепла позволяет определять удельную теплоемкость скелета породы одновременно с изучением фазового состава влаги. Данный калориметр отличается сравнительно большим калориметрическим стаканом, что позволяет исследовать представительные образцы пород. Принцип работы установки для определения температуры начала замерзания основан на регистрации динамики изменения температуры исследуемого образца в ходе его охлаждения (криоскопический метод). Переохлаждение воды в ходе замерзания сводится к минимуму за счет применения в данной установке инициаторов кристаллизации. Для определения химического состава влаги в засоленных породах использовались стандартизованные методы работы с водной вытяжкой.

3. Натурные определения химического состава водных вытяжек засоленных пород и проб криопэгов носят, как правило, фрагментарный (одномоментный) характер. Это обуславливают целесообразность применения для исследования выявления закономерностей и прогноза изменения их фазового и химического состава в зависимости от термобарических условий, современных методов термодинамического моделирования.

Предложенная методика, включающая адаптированный и откалиброванный программный продукт, способы обработки результатов исходных стандартных химических анализов проб и затем полученной информации, является целиком оригинальной, не имея аналогов в зарубежной и отечественной практике и позволяя наиболее полно и адекватно, на сегодняшний день, отразить характер, протекающих в поровых растворах засоленных пород и криопэгах, процессов криогенного метаморфизма. Методика проверена на большом экспериментальном материале.

4. Существующие взгляды о процессах изменения фазового и химического состава поровых растворов и криопэгов в диапазоне отрицательных температур основаны на представлениях о закономерностях криогенного метаморфизма морской воды, для которого характерна трех стадийность процесса. Однако большие степени их засоленности за счет криогенного концентрирования и более разнообразный водно-ионный состав приводят к различным сценариям реализации процесса: стадийности; выпадению солей кальцита, гипса, доломита магнезита; смещению температуры начала кристаллизации солей.

Для криопэгов п-ова Ямал характерно наличие 4-ой стадии процесса, которая обусловлена выпадением гидрогалита при температуре около $-21-23^{\circ}\text{C}$, сопровождающимся ростом концентрации сульфат-иона, а также возможным выпадением гипса и магнезита. Даже незначительное содержание бикарбонатов в рассоле криопэгов расположенных на поймах, морских террасах существенно деформирует температурную кривую десульфатизации на 3-ей стадии процесса, позволяя выделить несколько возможных подстадий, характеризующихся выпадением кальцита и гипса.

5. Процесс криометаморфизма поровых растворов засоленных пород зависит от степени засоленности и соответственно от концентрации порового раствора: при степени засоленности выше 0,1% сценарий криометаморфизма качественно аналогичен таковому для криопэгов; при степени засоленности $\leq 0,1\%$ - характеризуется в ряде случаев выпадением гипса, а не мирабилита; с концентрацией от 40 г/л до 150 г/л качественный характер процесса протекает аналогично таковому для криопэгов, а количественно - со смещением температуры эвтектик гидрогалита, мирабилита, гипса по абсолютной величине. При больших концентрациях рассола 300 - 350 г/л характерных для вод солончаков, промерзание не происходит, тем не менее, процесс криогенного метаморфизма также реализуется за счет перераспределения жидкой и твердых фаз, кристаллизации солей гидрогалита и мирабилита.

6. Предложена методика прогноза изменения температуры начала замерзания, фазового состава, плотности и рН, теплофизических свойств криопэгов для двух случаев. Первый - когда имеется информация о водно-ионном составе пробы и программный продукт. Для оценки характеристик предлагается расчет по программе. Второй - когда имеется информация об общей минерализации пробы, а программный продукт отсутствует, тогда для нахождения соответствующих характеристик предлагаются приближенные расчетные соотношения, которые могут быть использованы как научные рекомендации для создания соответствующей нормативной базы.

Для оценки зависимости температуры начала замерзания от общей минерализации для криопэгов, расположенных на различных геоморфологических уровнях, использовалась формула Крюммеля для морской воды с соответствующей коррекцией значений коэффициентов,

полученных с помощью статистической обработки при разделении по принципу лайды-террасы-поймы. Кривая фазового состава влаги для криопэгов имеет качественный характер, близкий к таковому для морской воды, однако количественные показатели естественно меняются. Для двух характерных диапазонов температурной кривой изменения фазового состава предложены расчетные формулы, аппроксимированные степенной и логарифмической зависимостями при условии «сшивки» уравнений при температуре $-22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая характеризует точку выпадения гидрогаллита ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), полученную статистической обработкой расчетов для разных минерализаций и химического состава криопэгов. Значения плотности криопэгов растут с увеличением их минерализации, мало завися от температуры и геоморфологического уровня. Предложено расчетное соотношение для оценки плотности при концентрациях от 10 до 150 г/л. Сопоставление натуральных данных по величине рН и рассчитанных с помощью программного продукта, показало их удовлетворительную сходимость (ошибка не превышает 16%), при этом соблюдается и качественное соответствие между показателями щелочная – кислотная среда. Предложены расчетные соотношения для оценки теплоемкости и коэффициента теплопроводности криопэгов, учитывающие зависимость от температуры, общей минерализации и водно-ионного состава

7. Для засоленных пород предложена методика прогноза изменения температуры начала замерзания, фазового состава, и теплофизических свойств для двух случаев, указанных в п. 6. Предложенные соотношения разработаны с учетом идеологии и формы представления их в СП 25.13330.2012. При сопоставлении экспериментальных данных по температуре начала замерзания с расчетными, полученными с помощью программного продукта, погрешность составляет менее 8%, а с нормативными по СП 25.13330.2012 - 15%. Сопоставление экспериментальных данных по фазовому составу с расчетными, полученными с помощью программного продукта, показало что ошибка не превышает 5% для всего спектра исследованных проб водных вытяжек. Для практических целей предложена расчетная формула.

Величины коэффициента теплопроводности в СП 25.13330.2012 задаются в виде таблицы в зависимости от общей влажности, плотности скелета и степени засоленности. Для расчета коэффициента теплопроводности в зависимости от тех же параметров был использован регрессионный анализ, позволяющий получить соотношение в виде аналитической зависимости. Погрешность расчета для пород исследованных участков территории п-ов Ямал составляет для песков 16%, для суглинков 14%, для супесей 19%. Расчетную оценку величины удельной теплоемкости засоленных пород предложено проводить с помощью, обычно используемого аддитивного соотношения, учитывающего удельные теплоемкости компонентов породы и их массовое содержание, однако с учетом температурной зависимости компонентов и степени засоленности порового раствора.

8. Проведенные исследования и предложенные расчетные формулы позволяют сформулировать методические рекомендации для разработки региональных и отраслевых нормативных документов применительно к засоленным породам и криопэгам п-ова Ямал. В настоящее время такие документы отсутствуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В.И., Бубнов Н.Г., Клинова Г.И., Иоспа А.В., Геворкян С.Г. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ВОДЫ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КРИОПЭГОВ // ГЕОЭКОЛОГИЯ, 2010, №1, с.40-51
2. Аксенов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. – М.: Все о мире строительства, 2008.– 351 с.
3. Алексеев С.В. Криогидрологические системы Якутской алмазоносной провинции: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин.наук.– Иркутск, 2007.
4. Анисимова Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск Наука, 1983, 153 с.
5. Анисимова Н.П. Криогенный метаморфизм химического состава подземных вод. // Мат. 2 Международной конференции по мерзлотоведению. Якутск, Вып.5, 1973, с.5-12
6. Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. М.: Недра. 1985. 176 с.
7. Баулин В.В., Чернядьев В.П. Мерзлотные условия Западной Сибири и вопросы их исследования в связи с переброской части стока рек в южные районы. – Инженерная геология, 1979, № 5, с. 23-28.
8. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. Москва, изд-во МГУ, 1998, 330 стр.
9. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. Многолетнемерзлые породы Западно-Сибирской плиты в эпоху голоценового «оптимума»//Доклады АН СССР. – 1983, т.270, №1. – С.168-172
10. Велли Ю.А., Гришин П.А. О функциональной зависимости температуры замерзания от состава воднорастворимых солей в поровом растворе. // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М., Наука, 1982, с.193-196.
11. Велли Ю.Я., Гришин П.А. О функциональной, зависимости температуры замерзания от состава воднорастворимых солей в поровом растворе. // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М., Наука, 1982. Стр. 193-196.
12. Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. Л.: Химия, 1977, 360 с.
13. Волков Н.Г., Комаров И.А., Мироненко М.В., Фотиев С.М. Методики оценки температуры формирования ионно-солевого состава криопэгов // Криосфера Земли, 2005. – Т.IX. – № 4. – С.54-61.
14. Геологическое строение и прогноз нефтегазоносности севера Западной Сибири. «Тр. ВНИГРИ», вып.263. Л., «Недра», 1968

15. Геокриология СССР. Западная Сибирь, под ред. Э.Д. Ершова. Москва, Изд-во Недра, 1989, 514 стр.
16. Гиттерман К.Э. Термический анализ морской воды (концентрирование соляных растворов естественным вымораживанием) // Труды Соляной лаб. АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1937, вып. 15, ч.1, с. 5-24.
17. Голованов Д.Л. Оазисное почвообразование в крайнеаридных пустынях Монголии: на примере оазиса Эхийн-Гол. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. М., МГУ, 2006. 24 с.
18. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. М, 1985.
19. ГОСТ 26424-85 Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке
20. ГОСТ 26425-85 Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке
21. ГОСТ 26426-85 Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке
22. ГОСТ 26428-85 Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке
23. ГОСТ 26263-84 Грунты. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов. М.: ИИТП Госстроя СССР, 1984. №104. 11 с.
24. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
25. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. М., “Наука”, 1984, с.230.
26. Григорьева В.Г. О понижении температуры замерзания воды в дисперсных грунтах. // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. Т.3 Изд-во АН СССР, 1957. Стр. 177-195.
27. Грунтоведение. / Под ред. В.Т. Трофимова. – бое изд., переработ. и доп. - М.: МГУ, 2005.-1024 с.
28. Доронин Ю.П., Хасин Д.Е. Морской лед. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. 318 с.
29. Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР. В кн.: Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М.: Наука. 1990. С. 3-9
30. Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Содержание и принципы составления карты засоленности мерзлых грунтов (на примере Западной Сибири) // Мерзлые грунты и криогенные процессы. М.: Наука, 1991. С. 85-89.
31. Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Состояние и засоленность грунтов прибрежных участков Карского моря // Материалы I конференции геокриологов России. Кн. 1. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 213-222

32. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. – М.: ГЕОС, 2002. – 246 с. и 2 с. вклейки
33. Ершов Э.Д., Акимов Ю.П., Чеверев В.Г., Кучуков Э.З. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. М.: МГУ, 1979 г. 189 с.
34. Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учебник. - М.: Изд-во МГУ, 2002.- 682 с.: с ил.
35. Ершов Э.Д., Комаров И.А., Чеверев В.Г. и др. Теплофизические свойства горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1984, 203 с.
36. Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
37. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т.1 // Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. В.В. Баулин, В.И. Аксенов, Г.Д. Дубиков и др. Тюмень: ИПОС СО РАН, 1996. 240 с
38. Кияшко Н.В., Комаров И.А. О некоторых закономерностях криогенного метаморфизма криопэгов п-ова Ямал. Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», Томск, 2012 с.451–454.
39. Кияшко Н.В., Комаров И.А., Голованов Д.Л. Криометаморфизм почвенных растворов и формирование солевого профиля солончаков Монголии (по результатам моделирования) // Вестник МГУ. Сер.17. Почвоведение – М.: 2014 - №5. – С. 530-536
40. Кияшко Н.В. Расчетные соотношения для оценки температуры начала замерзания и количества незамерзшей воды для засоленных пород нефте-газовых месторождений п-ова Ямал// Перспективы науки – Тамбов.: 2013 - №9 – С.7-10
41. Комаров И. А., Волков Н.Г., Методика прогноза температурного и водно-ионного состав засоленных пород и криопэгов // Проблемы строительства на засоленных грунтах. – М., 2007.– С. 147-183.
42. Комаров И.А. Единая термодинамическая модель фазового, адсорбционного и химического равновесия поровой влаги в мерзлых породах // Геоэкология. - 2001. - №3. – С.244-259.
43. Комаров И.А., Кияшко Н.В. Методики расчетной оценки свойств криопэгов п-ова Ямал / Тезисы // Десятая международная конференция по мерзлотоведению. - Тюмень: 2011. – С.
44. Комаров И.А., Кияшко Н.В. Методики расчетной оценки свойств криопэгов п-ова Ямал / Тезисы // Международная конференция. – Салехард: 2012.
45. Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Совершенствование нормативной базы по расчетной оценке теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов // Основания, фундаменты и механика грунтов – М.: 2012 - №2. – С. 25-30.

46. Комаров И.А., Мироненко М.В. Моделирование водно-ионного состава засоленных мерзлых пород и криопэгов при изменении термобарических условий.// Труды Международной конференции «Актуальные направления развития прикладной математики в энергетике и информационно-коммуникационных технологиях» М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, с. 23-29.
47. Комаров И.А., Мироненко М.В., Пустовойт Г.П. Разработка программного продукта для прогноза температурного и ионно-солевого режима засоленных пород и криопэгов // Междунар. конф. «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов, состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». – Тюмень, 2008.– С. 404-407.
48. Комаров И.А. Прогноз температурного и водно-ионного режима засоленных пород и криопэгов.// Основы геокриологии. ч.6 М.: Изд-во МГУ, 2008, с.214-254.
49. Комаров И.А. Термодинамика промерзающих и мерзлых дисперсных пород. Автореф. Дисс. Д-ра геол.-мин. Наук. М.: МГУ, 1999. 52 с.
50. Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М.: Научный мир, 2003, 608 с.
51. Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 1981. 197 с.
52. Коновалов А.А., Конюшенко А.Г., Роман Л.Т. Количественная оценка влияния растворов солей на температуру начала замерзания грунтовой влаги. // Стр-во в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. – Вып 26. – Красноярск, 1973.– С.200-209.
53. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. – М.: Научный мир, 2010, – 351 с.
54. Кроник Я.А, Лосева С.Г. Закономерности формирования теплофизических свойств засоленных грунтов // Теплофизические свойства горных пород М.: МГУ, 1984. с. 96-110
55. Лабораторные методы исследования мерзлых пород. Э.Д. Ершов – ред. М.: МГУ, 1985. 350 с.
56. Лазуков Г.И. и Рейнин И.В. Стратиграфия четвертичных отложений Обско-Пуровского междуречья. В кн.: «Решения и труды межведомственного совещания по доработке и уточнению стратиграфических схем Западно-Сибирской низменности». Л., Гостоптехиздат, 1961
57. Лосева С.Г., Харина М.Г., Кулешова В.Ю., Влияние засоления на водно-физические и теплофизические свойства грунтов. В кн.: Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М. Наука, 1990, 144 с.
58. Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / М54 Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ. 2004. – 512 с.: ил.
59. Минкин М.А., Суворин А.В., Шульга Н.И. Номограммы для определения

- теплопроводности мерзлых и талых грунтов Западной Сибири. // Материалы по проектированию сложных фундаментов и оснований и по производству изысканий. Труды ин-та Фундаментпроект, вып. 13, М., 1973.
60. Мироненко М.В., Поляков В.Б. Об алгоритме расчета равновесного состава водно-солевых систем на основе модели Питцера // Геохимия. – 2009. - № 10. – С.1103-1107.
61. Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов Матер. 1 съезд Геокриологов России, т.2, 483.
62. Нерсесова З.А. Определение количества незамерзшей воды и льда в мерзлых грунтах // Мат-лы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М.: АН СССР, 1954. Сб. 2.
63. Основы геокриологии / Под ред. Э.Д.Ершова. М.: Изд-во МГУ. Ч. 1. Физико-химические основы геокриологии. 1995. 368 с.
64. Основы геокриологии / Под ред. Э.Д.Ершова. М.: Изд-во МГУ. Ч. 2. Литогенетическая геокриология. 1996. 399 с.
65. Основы геокриологии // Литогенетическая геокриология. Э.Д. Ершов – ред. М.: МГУ. 1999. Ч.5. 518 с.
66. Основы геокриологии. Литогенетическая геокриология.– Ч.2. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 399 с.
67. Панкова Е.И., Мандахбаяр Ж., Голованов Д.Л. Изменение засоления почв оазиса Эхийн-Гол (Монголия) по данным обследований 1977 и 2001 годов. Почвоведение. №9. 2004. С. 1040-1056.
68. Пермяков П.П., Романов П.Г. Тепло- и солеперенос в мерзлых ненасыщенных грунтах. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – 128с.
69. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов, Стройиздат № 1973.
70. Розенталь О.М. Вопросы образования льда в воде и растворах // Кинетика кристаллизации водных растворов электролитов. Ж. Физ. хим. 1972, т.46, N3.
71. Савельев Б.А. Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых пород. М.: Изд-во МГУ, 1971, 507 с.
72. Савельев Б.А. Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых пород. М., изд. МГУ, 1971. 505 с.
73. Степанов А.В. Влияние растворенных солей на теплофизические свойства грунтов. // Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов тепло-и массопереноса. Якутск, 1978 с. 101-105.
74. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений центрального Ямала // Криосфера Земли.

- Новосибирск: ГЕО, 2002. Т. VI, №3. С.15-24
75. Трофимов В.Т, Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал (Инженерно-геологический очерк). М.: Изд-во МГУ, 1986. 211 с.
76. Трофимов В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. – М.: Изд-во МГУ, 1977, - 280 с.
77. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. – М., Изд-во МГУ, 1980, - 246 с.
78. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 189 с.
79. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. Новосибирск: ГЕО, 1999. Т. III, №2. С.40-65.
80. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты) Новосибирск.: “Geo”, 2009, с. 279.
81. В.Л. Цуриков. Жидкая фаза в морских льдах, «Наука», 1976, 210 с.
82. Чеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов - М.: Научный мир, 2004. - 234 с.
83. Шумилова Л.В. Карта болот в атласе Тюменской области. «Вопросы тематического картографирования», сер. Геогр. Якутск, 1968
84. Ямнова И.А. Микроморфологическая и минералогическая диагностика засоления почв. 1990.
85. Anderson D.M. Tace A.R., McKim H.L. The unfrozen water and apparent specific heat capacity of frozen soils // Permafrost/ Proc/ 2nd Int. Conf.Yakutsk.USSR 1973, 289-295
86. Anderson D.M., Tace A.R. Low-temperature phases of interfacial water in clay-water systems // Soil Science Society of America Proceedings. 1971. V. 35. № 1. p. 47-54.
87. Marion G. A molal-based model for strong acid chemistry at low temperatures (< 200 to 298 K), Geochim. Cosmochim. Acta, 2002, 66, 2499–2516.
88. Mironenko M.V., Grant S.A., Marion G.M., Farren R.E. FREZCHEM2. A Chemical Thermodynamic Model for Electrolyte Solutions at Subzero Temperatures // CRREL Report 97-5, October 1997. – 40 p.
89. Nelson K.H., Thompson T.G. Deposition of salts from sea water by frigid concentration. Journal of Marine Research, 13 (2), 1954. – Pp. 166-182.
90. Pitzer K.S. A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density. Reviews in Mineralogy, 17, 1987. – Pp. 97-142.