

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Кошурников Андрей Викторович

**Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики
(по данным геофизических исследований)**

Том 1

Специальности:

1.6.7 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

1.6.9 – геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора геолого-минералогических наук

Научный консультант:
доктор геолого-минералогических наук
Брушков А.В.

Москва – 2023

Оглавление**Том 1**

Введение	5
Глава 1. Современное состояние исследований криолитозоны арктического шельфа	22
1.1. Мерзлотные исследования арктического шельфа	22
1.2. Современные представления о распространении и строении криолитозоны шельфа	24
1.3. Существующие представления об эффективности геофизических методов для изучения криолитозоны шельфа	31
1.4. Геокриологические условия арктического шельфа	39
1.4.1. Орогидрография шельфа	39
1.4.2. Тектонические особенности строения шельфа	44
1.4.3. Геологическое строение шельфа	49
1.4.4. Субмаринная криолитозона	57
1.5. Выводы. Нерешенные проблемы. Задачи исследований	77
Глава 2. Методика геолого-геофизических полевых исследований криолитозоны шельфа и результаты лабораторных исследований свойств пород	79
2.1. Методы лабораторных исследований	79
2.2. Результаты лабораторных исследований акустических свойств пород, отобранных на шельфе арктических морей	93
2.4. Результаты лабораторных исследований теплофизических свойств пород, отобранных на шельфе арктических морей	99
2.5. Методы электроразведки на шельфе	106
2.6. Методы сейсморазведки и сейсмоакустики	146

2.7. Методы исследования теплового режима и свойств донных отложений шельфа.....	161
Глава 3. Моделирование теплового режима и определение распространения мерзлых пород на шельфе	178
3.1. История геологического развития шельфа: трансгрессии и регрессии моря	178
3.2. Геотермический поток на арктическом шельфе и низменностях	181
3.3. Физические свойства пород арктического шельфа	183
3.4. Постановка задачи, входные параметры и принятые допущения	198
3.5. Результаты моделирования эволюции криолитозоны на шельфе в плейстоцене и голоцене.....	201
Глава 4. Распространение многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе по геофизическим данным.....	208
4.1. Современное распространение и глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород	208
4.2. Сравнение результатов геофизических исследований и теплового моделирования на шельфе	248
Глава 5. Районирование многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе.....	253
Заключение	269
Список литературы	283

Том 2 – Приложение к диссертации

Приложение А. Сводные геологические колонки и результаты лабораторных испытаний пород для опорных участков арктического шельфа.....	3
---	---

Приложение Б. Тепловые модели опорных участков арктического шельфа	10
Приложение В. Комплект документации по сертификации средства измерения Косы цифровые термометрические.....	31
Приложение Г. Сертификат соответствия геофизической продукции «ТЕЛСС-3-Э».....	89
Приложение Д. Заключение соответствия заводским характеристикам геофизической продукции «APL-02».....	90
Приложение Е. Патенты на изобретение.....	91
Приложение Ж. Заключение соответствия заводским характеристикам геофизической продукции «HF-EM»	93
Приложение И. Свидетельство о государственной регистрации программы «Faraday»	94
Приложение К. Акты выполненных работ автора по предлагаемой методике	96

Введение

Актуальность темы исследований

Шельф морей Российской Арктики обладает значительными запасами полезных ископаемых и представляет интерес для ученых и специалистов многих стран. Арктический шельф России — самый широкий и самый мелководный на планете. Это способствовало сохранению на шельфе многолетнемерзлых пород, образовавшихся при суровом климате в прошлом. Последующие изменения среды способствовали деградации многолетнемерзлых пород, увеличению эмиссии метана из морских осадков, что приводит к увеличению парникового эффекта и глобальным последствиям.

Расширение работы Северного морского пути требует восстановления и развития береговой инфраструктуры, обеспечивающей безопасное передвижение судов вдоль арктического побережья и грузов в местах погрузки и разгрузки. Отступления береговой линии арктического шельфа за последние 20–30 лет составили несколько десятков метров на отдельных участках шельфа. Столь значительные скорости отступления берега связаны с деградацией многолетнемерзлых пород. Деградация многолетнемерзлых пород наблюдается как на суше, так и на акватории особенно в прибрежной зоне. Устойчивость береговой инфраструктуры вдоль Северного морского пути тесным образом связана с сохранением пород береговой зоны в мерзлом состоянии.

Проектирование и строительство новых терминалов по отгрузке сжиженного газа, новых линейных сооружений и сопутствующих инженерных сооружений на акватории арктического шельфа также требует новых знаний о несущей способности грунтов на акватории шельфа и в транзитной зоне суша-шельф Российской Арктики. Для оценки несущей способности грунтов необходимы знания о распространении, строении, температурном режиме и свойствах многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе.

Активная геологоразведочная деятельность крупнейших нефтегазовых компаний России на шельфе Карского и Лаптевых морей требует исследования распространения и сплошности многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе. Зоны газонасыщения, зоны деградации многолетнемерзлых пород представляют опасность для размещения разведочных скважин на шельфе.

На арктическом шельфе, в условиях распространения многолетнемерзлых пород, уже ведется добыча нефти (платформа «Приразломная»). Для безопасной эксплуатации добывающих скважин в этих условиях и разработки актуального прогноза устойчивости добывающих скважин необходимы знания о фазовом состоянии грунтов, их температуре, солености вдоль ствола скважины.

В настоящий момент ведется проектирование и подготовка к строительству еще двух эксплуатационных скважин в транзитной зоне суша-шельф на шельфе Карского моря в связи с началом освоения Крузенштернского и Харасавэйского месторождений. Оба месторождения находятся в береговой зоне. Глубина акватории составляет 1–2 м. Опыта по строительству эксплуатационных скважин в подобных природных условиях в мире не существует. В зависимости от мощности криолитозоны меняются и принципы обустройства и строительства эксплуатационных скважин.

Не менее важной задачей являются исследования, направленные на оценку мощности и распространения залежей газовых гидратов на шельфе. Природные залежи газогидратов, как особый вид нетрадиционных ресурсов, могут внести серьезный вклад в восполнение минерально-сырьевой базы России в будущем. Однако, в настоящее время в связи с деградацией многолетнемерзлых пород в условиях Арктики разложение реликтовых газовых гидратов вносит серьезный вклад в формирование «метановой шапки» на северном полюсе планеты, усиливая «парниковый эффект планеты», а также вызывает угрозу для безопасности добывающих скважин, всех инженерных сооружений и людей, находящихся на арктическом шельфе.

Одним из приоритетных направлений развития МГУ им. М.В.Ломоносова является решение крупных геологических задач освоения Арктики и рационального природопользования в Арктическом регионе. Поэтому изучение распространения и условий залегания, а также условий формирования многолетнемерзлых пород является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

Криолитозона арктического шельфа изучается более ста лет, однако ряд проблем остается нерешенным. И.Я. Баранов (1958) считал очевидным распространение многолетнемерзлых пород (ММП) на шельфе до изобаты 20 м. Н.Ф. Григорьев (1962), Н.Н. Романовский (1993) допускали их распространение на шельфе до изобаты 100 м. А.Л. Чеховский (1972) предполагал их наличие на шельфе до глубин 200 м. Согласно же взглядам Л.А. Жигарева (1977), Я.В. Неизвестнова (1981), В.А. Соловьева (1981) сплошные ММП существуют лишь в узких вдольбереговых зонах, а для большей части шельфа характерно распространение островных ММП. На канадском шельфе ММП были обнаружены по данным бурения (Маскау, 1972). А.С. Джадж предполагает их распространение в море Бофорта до глубин 50 м (Hunter et al., 1976). В российском секторе арктического шельфа ММП были обнаружены при бурении В.Н. Бондаревым в 1983–1986 гг. на шельфе Баренцева моря, В.П. Мельниковым и В.И. Спесивцевым в 1986–1995 гг. – на шельфе Карского моря, М.Н. Григорьевым в 1970 г., А.И. Фартышевым в 1978 г. – на шельфе моря Лаптевых.

Различны представления об условиях формирования ММП на шельфе. Существует точка зрения об их образовании в эпохи регрессий и промерзания суши из-за существования благоприятных (холодных) условий для формирования ММП (Арэ, 1976; Васильчук, 1992; Романовский, 1993). Однако, по мнению других исследователей, возможен и океанический криолитогенез (Данилов, 1977; Хименков, Брушков, 2003; Шполянская, 2015). Ранее

геокриологические исследования шельфа сводились в основном к построению мелкомасштабных карт по данным одиночных скважин (Жигарев, 1997; Григорьев, 1982) или к моделированию с использованием различных (и постоянно уточняемых) палеосценариев и характеристик горных пород, соответственно, к получению результатов, зависящих от начальных условий и изученности теплофизических характеристик пород (Романовский и др., 1999; Гаврилов, 2008).

Нет однозначного мнения о границах распространения субмаринной криолитозоны и ее строении на шельфе. Недостаточно известна ее мощность, глубины кровли и подошвы в ряде районов шельфа. Существуют лишь предположения о состоянии горных пород, подстилающих субмаринную криолитозону, как и о существовании там газогидратов.

Объект исследования – многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики.

Цель работы — определение границ распространения и строения криолитозоны, а также температурного режима, свойств, условий формирования и динамики многолетнемерзлых пород на шельфе морей Российской Арктики.

Для достижения цели исследований автор поставил перед собой следующие

задачи:

- выполнить анализ и обобщение данных о геокриологических условиях арктического шельфа;
- разработать методику комплексных геокриолого-геофизических исследований для изучения многолетнемерзлых толщ на шельфе;
- изучить строение и свойства многолетнемерзлых пород шельфа морей Российской Арктики;
- разработать математические модели теплового режима горных пород на шельфе;
- установить границы распространения многолетнемерзлых толщ шельфа;

- определить условия формирования и динамику многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе;
- выполнить типизацию многолетнемерзлых пород арктического шельфа и составить схему их распространения.

Научная новизна работы. Разработан и реализован новый принцип комплексного анализа геолого-геофизических данных для изучения многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе. Его суть заключается в комплексировании 5 видов исследований: а) электромагнитные зондирования методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) для акватории шельфа, электромагнитные зондирования методом ЗСБ и методом частотных зондирований (ЧЗ) для транзитной (переходной) зоны суша-шельф, интерпретация геофизических данных при минимальном числе слоев (режим толстослоистых моделей); б) лабораторные испытания грунтов для закрепления удельных электрических сопротивлений (УЭС) при моделировании электромагнитных полей; в) буровые работы для проверки кровли высокоомного слоя на геоэлектрических разрезах, построенных по результатам моделирования электромагнитных полей; г) термометрия на шельфе для получения данных о температуре многолетнемерзлых пород; д) моделирование тепловых полей для проверки подошвы высокоомного слоя на геоэлектрических разрезах, построенных по результатам моделирования электромагнитных полей.

Реализация этого принципа привела к получению новых научных результатов:

1. Установлено существование горизонта высокого сопротивления (высокоомный слой), подтвержденного буровыми работами и термометрическими наблюдениями, кровля которого связана на шельфе с многолетнемерзлыми породами Печорского моря (простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние до 90 км и до глубин моря 150 м), Карского моря (приямальский участок, простирающегося от побережья в сторону

моря на расстояние 50 км и до глубин моря 100 м), моря Лаптевых (залив губы Буор-Хая, Хатангский залив, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние до 100 км и до глубин моря 10 м), Восточно-Сибирского моря (пролив Дмитрия Лаптева, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние 40 км и до глубин моря 20 м), Чукотского моря (Чаунская губа, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние 20 км и до глубин моря 10 м). Общий объем буровых работ, подтвердивших наличие многолетнемерзлых пород по результатам геофизических исследований, составил 11 скважин, а отсутствие многолетнемерзлых пород по результатам геофизических исследований – 7 скважин на арктическом шельфе (рис.5.9).

2. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается на глубинах от 24 до 150 м, на шельфе Карского моря – от 1,7 до 160 м; на шельфе моря Лаптевых – от 2 до 90 м, на шельфе Восточно-Сибирского моря – от 1,5 до 70 м, на шельфе Чукотского моря – от 10 до 120 м от кровли донных отложений.

3. Подошва многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается на глубинах 320–350 м, на шельфе Карского моря – в пределах 320–350 м, на шельфе моря Лаптевых – в пределах 300–660 м, на шельфе Восточно-Сибирского моря – в пределах 520–640 м, на шельфе Чукотского моря – в пределах 220–630 м от кровли донных отложений.

4. Прослежена непрерывность по простираению многолетнемерзлых пород на различных участках арктического шельфа. Для западной части Печорского моря острова многолетнемерзлых пород имеют простираение 1–5 км, для Восточной – 10–50 км. На шельфе Карского моря зоны сквозных таликов имеют простираение 10–20 км, на шельфе моря Лаптевых – 5–10 км, на шельфе Восточно-Сибирского моря – 2–10 км, на шельфе Чукотского моря – 10–20 км.

5. В многолетнемерзлых толщах на арктическом шельфе обнаружены зоны высокотемпературных многолетнемерзлых пород, по-видимому,

газонасыщенных, имеющих простирание на шельфе Карского моря 10–50 км, на шельфе моря Лаптевых – 10–110 км, на шельфе Восточно-Сибирского моря – 20–130 км, на шельфе Чукотского моря – 10–70 км.

6. Методом теплового моделирования получены данные о мощности многолетнемерзлых пород на различных участках арктического шельфа. Эти данные хорошо коррелируют с мощностью высокоомного слоя, установленного методом зондирования становлением поля. На шельфе морей Российской Арктики в толщах многолетнемерзлых пород, вероятно, присутствуют газогидратные толщи.

7. На основе аналитических и экспериментальных результатов, изложенных в пунктах 1–6, впервые построена карта кровли многолетнемерзлых толщ, подошвы и сплошности многолетнемерзлых и гидратных толщ для арктического шельфа России.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении новых геолого-геофизических технологий для изучения распространения и строения многолетнемерзлых пород на шельфе морей Российской Арктики.

Основной объем данных автора — это данные геофизических исследований на шельфе, заверенные бурением. Эти данные представляют собой результаты полевых измерений электромагнитных полей на шельфе, позволяющие судить о строении шельфа на основе прямых определений. Такой подход к изучению криолитозоны шельфа представляется наиболее информативным. Ранее геокриологические исследования шельфа заключались в построении прогнозных карт по данным одиночных скважин, моделировании криолитозоны путем задания различных (и до сих пор уточняемых) палеосценариев и, соответственно, получении результатов, зависящих от начальных условий. Сегодня появились новые технологии на основе применения электромагнитных зондирований,

позволяющие оценивать мощность криолитозоны шельфа непосредственно. Именно эти новые технологии развивает и использует автор в своей работе.

С использованием геофизических и геокриологических разрезов шельфа Печорского и Карского морей и моря Лаптевых определены условия формирования и составлена схема распространения многолетнемерзлых пород и газовых гидратов на шельфе морей Российской Арктики. Разработанная методика комплексных геокриолого-геофизических исследований для изучения многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе была внедрена при выполнении инженерно-геологических изысканий на шельфе Карского моря и моря Лаптевых в ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть».

Методология и методы исследования

Теоретическую основу исследований по теме диссертации составляют современные геолого-геофизические представления о формировании, строении и свойствах многолетнемерзлых толщ арктического шельфа. Особенностью предлагаемого подхода является комплексность исследований, включающих бурение скважин, геофизические и лабораторные исследования с применением различных методов, а также моделирование теплового режима горных пород.

Были применены новые методы и технические средства, в частности:

- электромагнитные зондирования методом ЗСБ на акватории шельфа с записью электромагнитного поля при независимых каналах регистратора с помощью аппаратного комплекса «ТЕЛСС-3-Э», разработанного по техническому заданию автора;

- электромагнитные зондирования методом ЧЗ в переходной зоне суша-шельф с помощью аппаратного комплекса «HF-EM», разработанного по техническому заданию автора;

- подтверждение геофизических данных бурением с припайного льда и акватории, выполнение термометрии в скважинах, пройденных с припайного

льда и на акватории при помощи аппаратного комплекса – Коса цифровая термометрическая (КЦТ) с возможностью передачи данных по радиоканалу (на комплекс КЦТ получен сертификат средства измерения (СИ));

- лабораторные испытания грунтов с помощью аппаратного комплекса «APL-02», разработанного по техническому заданию автора;

- построение тепловых моделей опорных участков шельфа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Исследования на шельфе должны включать комплекс методов:

а) электромагнитные зондирования методом зондирования становлением поля для акватории шельфа, электромагнитные зондирования методом зондирования становлением поля и методом частотных зондирования для транзитной (переходной) зоны суша-шельф, интерпретация геофизических данных при минимальном числе слоев (режим толстослоистых моделей); б) лабораторные испытания горных пород для закрепления удельных электрических сопротивлений при моделировании электромагнитных полей; в) буровые работы на шельфе Карского, Лаптевых, Чукотского морей для проверки положения кровли высокоомного слоя на геоэлектрических разрезах, построенных по результатам моделирования электромагнитных полей; г) термометрия на шельфе для получения данных о температуре многолетнемерзлых пород; д) моделирование тепловых полей для проверки положения подошвы высокоомного слоя на геоэлектрических разрезах, построенных по результатам моделирования электромагнитных полей.

2. Многолетнемерзлые породы на арктическом шельфе западного сектора Российской Арктики распространены на глубинах от 1,7 до 350 м от кровли донных отложений. Положение кровли многолетнемерзлых пород установлено по данным зондирования становлением поля и проверено бурением в Печорском и Карском морях. Для западной части Печорского моря характерно

островное распространение многолетнемерзлых пород на глубинах от 30 до 350 м от кровли донных отложений. Для восточной части Печорского моря характерно массивно-островное распространение многолетнемерзлых пород на глубинах от 24 до 350 м от кровли донных отложений. Для шельфа Карского моря характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород на глубинах от 1,7 до 350 м от кровли донных отложений. Многолетнемерзлые толщи в транзитной (переходной) зоне суша-шельф имеют двухслойное строение. Мощность современных «kozyрьков» многолетнемерзлых пород составляет не более 10 м, а их простирание до 180–220 м.

3. Многолетнемерзлые породы на арктическом шельфе восточного сектора Российской Арктики распространены на глубинах от 1,5 до 640 м от кровли донных отложений. Положение кровли многолетнемерзлых пород установлено по данным зондирований становлением поля и проверено бурением на шельфе морей Лаптевых, Чукотского. Распространение многолетнемерзлых пород прерывистое.

4. Выделены криогенногидратные толщи: на шельфе морей западного сектора Российской Арктики до глубин 380 м, включающие газогидратные толщи мощностью от 20 до 110 м (Печорское, Карское моря); на шельфе морей восточного сектора Российской Арктики до глубин 1170 м, включающие газогидратные толщи значительной мощности от 120 до 540 м на шельфе моря Лаптевых, от 140 до 570 м на шельфе Восточно-Сибирского моря, от 90 до 480 м на шельфе Чукотского моря от кровли донных отложений. Распространение криогенногидратных толщ коррелируется с известными газогидратными областями Северного Ледовитого океана.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обосновывается комплексированием методов, подтверждением результатов геофизических исследований буровыми работами и термометрией в скважинах, соответствием

бурения, отбора проб (в частности, сохранением кернов в мерзлом состоянии при бурении и транспортировке) и лабораторных испытаний актуальным стандартам и регламентам, применением аттестованного оборудования и поверенных средств измерения, их достаточной точностью, сопоставительными испытаниями различными методами и техническими средствами на эталонных образцах грунтов. Достоверность результатов автора подтвердили независимые буровые работы на шельфе моря Лаптевых 2012 г; термометрия на участках ПАО «Газпром» на шельфе Карского моря, 2009–2018 гг.; бурение на участках ПАО «Газпром» на шельфе Карского моря, 2009–2020 гг.

Апробация результатов диссертационной работы проведена автором самостоятельно или с соавторами на более, чем 20 международных и 25 российских научных конференциях: «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений», Тюмень 2006; "Криогенные ресурсы полярных регионов", Салехард 2007; «Инженерная геофизика–2007», Геленджик 2007; 19-th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Beijing 2008; «Инженерная и рудная геофизика–2008», Геленджик 2008; Ломоносовские чтения–2009, Москва 2009; «Рациональное природопользование», Москва 2009; «Геобайкал–2010», Иркутск 2010; IUGG XXV General Assembly Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet, Melbourne 2011; «Чистая вода: опыт реализации инновационных проектов в рамках федеральных целевых программ Минобрнауки России», Москва 2011; IV конференция геокриологов России, Москва 2011; V Всероссийская школа-семинар им. М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли, Санкт-Петербург 2011; 34-th International Geological Congress, Vein 2012; "Science of the future", Санкт-Петербург 2014; AGU Fall Meeting 2015, San Francisco 2015, V конференция геокриологов России, Москва 2016; Cryosphere-Carbon-Climate Interactions in the Siberian Arctic Ocean: Current State and Future Directions, Томск 2016; "Дни Арктики в Москве", Москва 2016; «Prospects of joint investigations in

polar regions of the planet», Москва 2016; "Инновации в геологии, геофизике и географии», Севастополь 2016; XI International Conference on Permafrost, Potsdam 2016; ArCS-project public lecture: Arctic research and Japan, Tokyo 2017; ArCS-project 2017 report meeting Yokohama, Yokohama 2017; "Геология и нефтегазоносность восточно-арктической акватории РФ: основные направления исследований, проблемы и пути их решения", Москва 2017; «Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата» ГЕОРИСК–2018», Москва 2018 и других.

Результаты работы докладывались автором на семинарах и научно-технических советах: в период проведения второй и третьей Российско-Американских санно-тракторных экспедиций на шельф моря Лаптевых (2012–2015 гг.); на рабочем совещании в период проведения шведско-российско-американской экспедиции SWERUS–С3 в акватории арктических морей на ледоколе «Oden» 2014 г., где автор являлся руководителем российской группы на участке Барроу (Аляска) – Тромсо (Норвегия); в РАН на защите материалов по гранту РФФИ № 13-05-12015 «Картирование границ субмаринных мерзлых толщ и газовыводящих каналов на шельфе восточно-арктических морей по геофизическим данным» 2013–2015 гг.; на методологическом семинаре в институте мерзлотоведения им. П.И.Мельникова в г. Якутске в 2017 г.; на НТС ОАО «МАГЭ» в г. Мурманске в 2017 г.; на заседании секции по инженерной геологии МОИП в г. Москве в 2018 г.

Основные положения и выводы диссертационного исследования в полной мере изложены 34 научных работах и 2 патентах на изобретение, включая 20 публикаций в рецензируемых научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова.

Личный вклад автора

Основной объем работы — данные геофизических исследований на шельфе, подтвержденные бурением. Эти данные представляют собой результаты полевых измерений электромагнитных полей на шельфе, позволяющие судить о строении шельфа на основе прямых определений. В период 2006–2018 гг. с участием автора было выполнено более 12 000 километров электромагнитной съемки шириной 1 км. Общее количество фактических электромагнитных зондирований (ЗСБ+ЧЗ), используемых в работе, более 240 000. С участием автора с 2006 г. по 2018 г. на арктическом шельфе пробурено более 54 скважин. По данным бурения выполнены лабораторные испытания грунтов, получены УЭС грунтов и построены более 240 000 геоэлектрических 1D моделей на арктическом шельфе. В результате научных исследований по грантам РФФИ, научно-производственных работ по заказу ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть» с участием автора выполнены следующие работы: разработка технического задания для аппаратурного геофизического комплекса «HF-EM» для электромагнитных исследований методом частотных зондирований в переходной зоне суша-шельф, 2006 г.; разработка технического задания для аппаратурного геофизического комплекса «ТЕЛСС-3-Э» для электромагнитных исследований методом становления поля на шельфе, 2012 г.; разработка технического задания для аппаратурного геофизического комплекса «APL-02» для лабораторных измерений электрических свойств грунтов шельфа; разработка технического задания для аппаратурного геофизического комплекса «УЗГ» для лабораторных измерений акустических свойств грунтов шельфа; разработка технического задания для аппаратурного геофизического комплекса КЦТ для термометрических исследований на шельфе, 2016 г.; построение 3D геокриологической модели на шельфе ямальского участка Байдарацкой губы по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов на ямальском береговом участке перехода газопроводом

Бованенково – Ухта через Байдарацкую губу, Карское море, 2005–2011 гг.; построение 2D геокриологической модели на шельфе уральского участка Байдарацкой губы по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов на уральском береговом участке перехода газопроводом Бованенково – Ухта через Байдарацкую губу, Карское море, 2005–2011 гг.; построение 2D геокриологических моделей на шельфе залива Шарапов Шар по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов в заливе Шарапов Шар, Карское море, 2010 г.; построение 3D геокриологической модели на шельфе приямальского участка в районе о-ва Белый по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов на площадках приямальского шельфа, Карское море, 2015–2018 гг.; построение 2D геокриологических моделей на шельфе Хатангского залива моря Лаптевых по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов в Хатангском заливе, море Лаптевых, 2017 г.; построение 2D и 3D геокриологических моделей на шельфе залива губы Буор-Хая моря Лаптевых по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов в заливе губы Буор-Хая, море Лаптевых, 2012–2015 гг.; построение 2D геокриологических моделей по траверсу о-в Колгуев – пос. Тикси через шельф Печорского, Карского, Лаптевых морей по данным геофизических исследований на траверсе о-в Колгуев – пос. Тикси, моря Карское, Лаптевых, 2012 г.; построение схемы распространения многолетнемерзлых и гидратных толщ на шельфе морей Российской Арктики по данным: геофизических исследований на траверсе о-в Колгуев – площадка приямальского шельфа, Карское море, 2015 г.; геофизических исследований на траверсе Карские ворота – площадка приямальского шельфа, Карское море, 2017–2018 гг., геофизических исследований на профиле Усинск – Варандей, участок Варандей, Карское море, 2008 г.; бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов в Чаунской губе, Чукотское

море, 2012 г.; геофизических исследований на участках в проливе Вилькицкого и в проливе Дмитрия Лаптева, море Лаптевых, 2012 г.; в каньоне Геральда, Чукотское море, 2014 г.; геофизических исследований на траверсе Архангельск – Новосибирские о-ва, моря Печорское, Карское, Лаптевых 2017–2018 гг.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (том 1, объемом 294 страницы) и приложений (том 2, объемом 100 страниц). Общий объем работы – 394 страницы. Она содержит 162 рисунка и 10 таблиц. Список литературы включает 180 наименований. Приложения включают модели тепловых расчетов для различных участков арктического шельфа, свидетельства и сертификаты новой аппаратурной базы, разработанной автором, и акты выполненных работ по предложенной методике автора на шельфе арктических морей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-05-12015, 13-05-12013, 13-05-00034, 14.Z50.31.0012, шведско-российской экспедиции SWERUS-C3, экспедиционных проектов на шельфе компаний ООО «Питер Газ», ОАО «Геоцентр-Москва», ОАО «Союзморниипроект», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ОАО «МАГЭ», ООО «АНЦ «НК «Роснефть», ТПУ, участникам которых автор выражает признательность за совместную работу на арктическом шельфе. Автор выражает благодарность сотрудникам института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в г. Якутске, института криосферы Земли СО РАН в г. Тюмени, «ВНИИОкеангеология» им. И.С. Грамберга в г. Санкт-Петербурге, ОАО «МАГЭ» в г. Мурманске, МОИП в г. Москве за совместные обсуждения и полезные советы при подготовке работы. Автору посчастливилось работать в международных экспедициях, организованных коллегами ТПУ: Н.Е. Шаховой, И.П. Семилетовым; коллегами

Стокгольмского университета: О. Gustafsson и М. Yakobsson. В экспедиционных рейсах автор осуществлял совместные исследования с американскими коллегами: Т. Cronin, М. O'Regan, L. Gemery, N. Barrientos; коллегами ТОИ ДВО РАН: О.В. Дударевым, А.Н. Чаркиным, А.Н. Солюком, Д.В. Черных, Д.А. Космачем, А.В. Куриленко; коллегами ИО РАН: Л.И. Лобковским, Н.Н. Дмитриевским, Р.А. Ананьевым, А.А. Мелузовым. Работа автора была бы невозможна без создания новой аппаратурной базы для измерений в условиях арктического шельфа. Автор выражает благодарность сотрудникам компании «Геосигнал» и С.А. Федотову за разработку аппаратурного комплекса зондирования становлением поля «ТЕЛСС-3-Э» под руководством автора и сотрудникам компании «Измерительные системы» и В.Х. Кириакову за разработку аппаратурного комплекса для частотных зондирований «HF-EM» под руководством автора. Буровые и термометрические исследования выполнены совместно при проведении научных и производственных работ на шельфе Карского моря с геологами: Ю.В. Кулешовым, А.Н. Фриденбергом, С.М. Кулаковым, С.А. Донцовым, Е.М. Сизых, Е.И. Горшковым, Н.Э. Демидовым, Д.А. Литвишковым, Д.В. Науменко, М.В. Саркисяном; на шельфе моря Лаптевых с геологами: М.Н. Григорьевым, В.Е. Тумским, К.В. Корнишиным, Я.М. Ефимовым, А.К. Гончаровой, А.Т. Беккером, Ю.А. Пискуновым, А.В. Рязановым; на шельфе Чукотского моря с геологами: А.М. Фирсовым, А.Н. Диашевым, С.В. Иванковым. Автор хотел бы отметить, что своими достижениями он обязан учителям: М.Н. Бердичевскому, Л.Л. Ваньяну, В.К. Хмелевскому, М.Л. Владову, А.К. Захаркину, Ю.Д. Зыкову. В своей работе автор активно сотрудничал с А.К. Мазуровым, Н.Н. Романовским, Ю.К. Васильчуком, В.В. Баулиным, В.Г. Чеверевым, И.А. Комаровым, С.Н. Булдовичем, В.Е. Гагариным, А.Н. Хименковым, П.Ю. Пушкаревым, Е.М. Чувилиным, Г.П. Пустовойтом, Р.Г. Мотенко, В.С. Исаевым, А.А. Погореловым, А.Н. Самаркиным, А.Ю. Гуковым, А.Ю. Гунаром, О.В. Подчасовым, А.А. Фалалеевой, В.В. Скосарем, Н.В. Желтенковой,

Я.О. Трушниковым. Особую благодарность автор хотел бы выразить А.В. Брушкову, В.Г.Чевереву и Ю.К.Васильчуку за благожелательное отношение и критические замечания, которые существенно улучшили работу.

Глава 1. Современное состояние исследований криолитозоны арктического шельфа

1.1. Мерзлотные исследования арктического шельфа

Субаэральная криолитозона (КЛЗ) изучена в результате исследований кафедры геокриологии МГУ, кафедры криолитологии и гляциологии МГУ, АО «ПНИИИС», АО «Севморгео», Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова (ИМЗ СО РАН), Института криосферы Земли СО РАН, Института физико-химических и биологических проблем РАН и других организаций. Результаты этих исследований опубликованы в работах Ю.Б.Баду, В.В.Баулина, А.В.Брушкова, Ю.К.Васильчука, Н.Ф.Григорьева, М.Н.Григорьева, И.Д.Данилова, В.Н.Девяткина, А.Ю.Деревягина, М.Н.Железняк, Л.А.Жигарева, Т.Н.Каплиной, И.А.Комарова, К.А.Кондратьевой, В.Н.Конищева, В.В.Куницкого, П.И.Мельникова, В.П.Мельникова, Я.В.Неизвестнова, В.М.Пономарева, Н.Н.Романовского, Е.А.Слагоды, В.А.Соловьева, В.И.Соломатина, И.Д.Стрелецкой, В.Т.Трофимова, В.Е.Тумского, А.И.Фартышева, А.Н.Хименкова, А.Л.Холодова, В.Г.Чеверева, Н.А.Шполянской, В.С.Якупова и многих других исследователей, включая автора.

Субмаринная КЛЗ менее изучена, чем субаэральная. В 1937–1950 гг. В. Н.Пономаревым выполнены термометрические исследования в скаважинах до глубин 400–500 м в бухте Кожевникова в западном секторе шельфа моря Лаптевых. На мерзлотной карте СССР толщи ММП на арктическом шельфе впервые были показаны С.Г.Пархоменко в 1937 г. На Геокриологической карте СССР масштаба 1:5 000 000 распространение субмаринных ММП было показано И.Я.Барановым на акватории арктического шельфа до изобаты 100 м в 1960 г. В 1996 г. коллектив кафедры геокриологии МГУ им. М.В.Ломоносова выполнил наиболее подробную современную оценку распространения субмаринных ММП арктического шельфа на Геокриологической карте СССР масштаба 1:2 500 000.

Дальнейшие геокриологические исследования ОАО «АМИГЭ», ФГБУ «ВНИИОкеангеология», ОАО «МАГЭ», ИМЗ СО РАН, ИКЗ СО РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова и других организаций в прибрежной зоне шельфа Российской Арктики под руководством А.А.Васильева, Н.Ф.Григорьева, М.Н.Григорьева, И.Д.Данилова, Л.А.Жигарева, Я.В.Неизвестнова, В.А.Соловьева, В.И.Соломатина, А.И.Фартышева показали, что полученные данные не дают возможности сформировать единые представления о глубинах залегания и мощности ММП на арктическом шельфе и существуют противоположные представления о границах распространения и мощности ММП на арктическом шельфе.

Согласно первой точке зрения ММП на шельфе распространены ограниченно вблизи берегов и бывших островов и имеют мощность до 200 м (Неизвестнов, 1981, Соловьев и др., 1981, Жигарев 1997, Данилов, 1989). Согласно второй точке зрения на арктическом шельфе широко распространены толщи ММП, а их мощность достигает нескольких сотен метров (Фартышев, 1993). К настоящему времени составлено несколько схем предполагаемого распространения мерзлых и охлажденных пород на арктическом шельфе (Соловьев, 1982; Неизвестнов и др., 2008; Жигарев, 1997; Романовский, 1993; Гаврилов, 2008; Перлова и др., 2017; Холмянский и др., 2017).

Геофизические исследования в разное время выполнялись методами сейсмоакустики для исследования субмаринной криолитозоны силами АО «АМИГЭ» под руководством С.И.Рокоса, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» под руководством П.В.Реканта, а также электроразведочными методами в ИМЗ СО РАН под руководством Ю.А.Нима, в ФГБУ «ВНИИОкеангеология» под руководством М.А.Холмянского. Электроразведочные исследования имели ограниченный район распространения. Сейсмоакустические исследования были выполнены на многих участках арктического шельфа.

1.2. Современные представления о распространении и строении криолитозоны шельфа

К субмаринной криолитозоне относятся все породы верхнего горизонта литосферы, расположенные в пределах современного океанического и морского дна и имеющие температуру равную или ниже 0°C . Согласно данным глубоководных исследований, среднемноголетняя температура придонных вод центрально-арктической котловины составляет $-0,5^{\circ}\text{C}$, имея, в целом, отрицательные значения на глубинах более 0,8–1 км (Атлас Арктики, 1985). Таким образом, можно говорить о существовании океанической криолитозоны (Романовский, 1993; Фартышев 1993; Данилов и др., 1996; Данилов и др., 1997; Жигарев, 1997; Данилов и др., 2000; Шполянская, 2015).

Субмаринная криолитозона может существовать также в пределах арктического шельфа на глубинах менее 100 м (на западно-арктическом шельфе, в пределах Баренцева и Карского морей, по структурным признакам к шельфу относят также участки морского дна с глубинами до 400–500 м). В пределах арктического шельфа по мерзлотно-историческим признакам территорию субмаринной криолитозоны обычно разделяют на два типа: шельфовую (прибрежно-шельфовую) и океаническую. Они отличаются историей своего развития в позднем неоплейстоцене и голоцене и, как следствие, предполагаемым строением и криогенным состоянием мерзлых пород.

По криогенному состоянию в геокриологии выделяется несколько типов пород. Под мерзлыми породами понимаются породы, имеющие отрицательную температуру, в которых хотя бы часть поровой влаги находится в виде льда. При этом мерзлые породы могут находиться в твердомерзлом состоянии, прочно сцементированные льдом, характеризующиеся относительно хрупким разрушением и не сжимаемые под нагрузкой, и в пластичномерзлом состоянии, частично сцементированные льдом, но обладающие вязкими свойствами и сжимаемостью под внешней нагрузкой (ГОСТ 25100-2011).

Породы, имеющие отрицательную температуру и не содержащие в своем составе лед, а содержащие только минерализованный поровый раствор, называют охлаждёнными. Сухие породы, имеющие отрицательную температуру и не содержащие в своем составе лед и воду, относят к морозным. Породы, имеющие положительную температуру, разделяют на немерзлые и талые: первые никогда не промерзали, а вторые существовали какое-то время в мерзлом состоянии, но впоследствии протаяли. В пределах криолитозоны могут существовать как мерзлые, так и охлажденные и морозные породы.

Говоря о криолитозоне, мы подразумеваем отрицательно температурную часть литосферы. При этом собственно мерзлые породы, содержащие лед, могут составлять только часть криолитозоны. Особенно ярко различие в объеме понятий «мерзлые породы» и «криолитозона» проявляется именно в пределах субмаринной криолитозоны, в которой значительную роль играют охлажденные породы.

В настоящее время существование мерзлых толщ на шельфе арктических морей подтверждено результатами бурения в Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском морях и в море Бофорта. В Карском море мерзлые породы выявлены под слоем воды от нескольких метров до 50–100 м и более в пределах Байдарацкой губы (Природные условия Байдарацкой губы..., 1997), на морской части площади Русановского газоконденсатного месторождения (Мельников, Спесивцев, 1995), вдоль западного берега п-ва Ямал, в том числе на Харасавэйском мелководье (Григорьев, 1987; Мельников, Спесивцев, 1995; и др.). В пределах Ленинградского месторождения мерзлые породы не обнаружены, хотя упоминается наличие «признаков мерзлых грунтов» в пределах колонки грунтовой трубки №28 (Заключение ... Ленинградская-1, 1989), на шельфе моря Лаптевых (Кошурников и др., 2016).

К настоящему времени составлено несколько карт предполагаемого распространения мерзлых и охлажденных пород на арктическом шельфе –

(Соловьев, 1982), (Неизвестнов, 1981), (Жигарев, 1997), (Рокос и др., 2009), (Рекант и др., 2011), (Романовский, 1993), (Гаврилов, 2008; Гаврилов и др., 2019), Перлова и др., 2017; Холмянский и др., 2017). Все они близки по смыслу, и для шельфа Карского и Лаптевых морей прогнозируют наличие реликтовых мерзлых пород только в пределах континентального мелководья с глубинами до 50–100 м.

Прямые фактические данные о мощности криолитозоны и мерзлых пород, их льдистости, развитии и распространении криогенных процессов и явлений в целом для территории шельфа арктических морей отсутствуют. Ближайшими участками, для которых есть фактические данные, являются Харасавэйское, Русановское, Ленинградское, Южно-Тамбейское и Бованенковское месторождения (последние два расположены полностью на суше) в Карском море и заливы губа Буор-Хая, Хатангский на море Лаптевых.

Мощности криолитозоны и мерзлой толщи, определенные в ходе глубокого бурения, изменяются в довольно большом диапазоне. Известные в настоящее время мощности мерзлых пород в западной части Ямала изменяются от 100 до 350 м. Так в районе пос. Харасавэй в 1979 г. были пройдены гидрогеологические скважины. Скважина, расположенная на суше в 300 м от берега, вскрыла подошву мерзлых пород на глубине 196 м, а расположенная на удалении 1 км от берега — на глубине около 320 м (Григорьев, 1987).

Различие в мощности мерзлой толщи, возможно, связано с расположением скважин относительно береговой линии: по направлению к морю мощность криолитозоны и мерзлых пород уменьшается. В пределах расположенного немного юго-восточнее Бованенковского месторождения мощности криолитозоны изменяются в пределах 170–310 м, а мерзлых пород — от 200 до 280 м, скважины 58-П-3, 55-П-2 и 68-П-3 (Строение и свойства..., 2007). На северо-восточном побережье Ямала, в пределах Южно-Тамбейского месторождения, расположенного севернее по широте, чем Харасавэйское, подошва криолитозоны по скважинам №2 и №4 располагается на глубинах

540–550 м, а подошва мерзлых толщ – на глубинах 310–320 м (Кондаков и др., 2011).

В интервале 320–420 м присутствуют как мерзлые, так и охлажденные отложения, глубже глинистые грунты находятся в охлажденном состоянии, маломощные прослой песков и супесей — в мерзлом. При этом по предыдущим работам (Полуостров Ямал, 1975; Геокриология СССР, 1989) предполагавшаяся мощность криолитозоны здесь оценивалась до 350 м с преобладающими значениями 200–280 м, то есть в два раза меньше.

Согласно геокриологической карте СССР (Геокриологическая..., 1991) среднегодовая температура пород в настоящее время на водораздельных поверхностях центрального Ямала севернее широты 70° находится в интервале $-7...-9^\circ\text{C}$, повышаясь в долинах рек на 2°C , южнее — в интервале $-5...-7^\circ\text{C}$. По фактическим данным, среднегодовая температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд в настоящее время в пределах Харасавэйского месторождения составляет от $-0,5^\circ\text{C}$ до -5°C (по данным Тюменьгипронефтегаза, 2021), в пределах Южно-Тамбейского — около -6°C (Кондаков и др., 2011), а в пределах Бованенковского — около $-7...-8^\circ\text{C}$, повышаясь до $-6...-4^\circ\text{C}$ на поймах рек и вблизи побережья (Строение и свойства..., 2007).

Глубины проникновения годовых колебаний температур изменяются от 6–10 м до 15–20 м. Региональный температурный градиент, по оценкам В.Т.Балобаева (Балобаев, 1991), составляет $1,5-2^\circ\text{C}/100$ м, однако из сопоставления полученных по скважинам мощностей криолитозоны и среднегодовых температур пород он может существенно отличаться: для Южно-Тамбейского месторождения – около $1,1^\circ\text{C}/100$ м, для Бованенково – до $2,4^\circ\text{C}/100$ м.

Результаты решения тепловой задачи для различных палеогеографических сценариев и тектонических условий на Восточно-Сибирском шельфе освещены в работах Н.Н.Романовского (1993, 1996, 1997, 2001, 2006). Палеогеографический

сценарий для задания краевых условий в модели шельфа предполагал следующие допущения:

1) предполагалось промерзание шельфа в период регрессии Мирового океана за последние 100 тыс. лет; 2) в период трансгрессии температура придонных слоев воды соответствовала температурам донных отложений (Жигарев, 1997); 3) изменение температуры с широтой в $1,5^{\circ}\text{C}$ на один градус широты (Геокриология СССР, 1989); 4) на акватории шельфа температуры морской воды отрицательные, что определяет отсутствие деградации ММП сверху в периоды трансгрессий; 5) в последние 100 тыс. лет назад рельеф дна соответствовал современному.

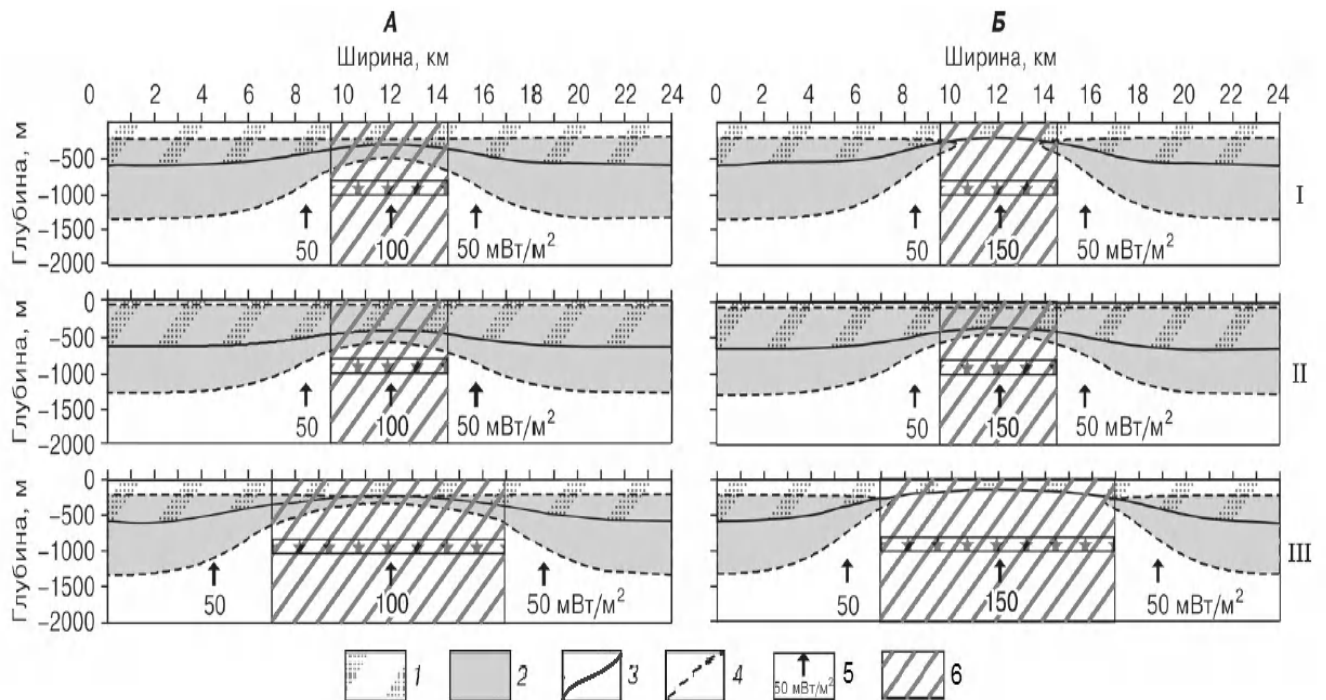


Рис. 1.1. Положение нижней поверхности толици ММП и ЗСГГ в оси разломной зоны шириной L на 71° с.ш. и на глубине моря 20 м в настоящее время (I, III) и на время пика сартанского похолодания (II) (по Н.Н.Романовскому и др., 2006). А – $q_{вз}=100 \text{ мВт/м}^2$; Б – $q_{вз}=150 \text{ мВт/м}^2$; I – $L=5 \text{ км}$; II – $L=5 \text{ км}$; III – $L=10 \text{ км}$; 1 – ММП, 2 – ЗСГГ, 3 – нижняя поверхность толици ММП, 4 – границы ЗСГГ, 5 – значения теплового потока, 6 – разломная зона, 7 – газовая залежь.

При задании физических свойств модели использовались следующие ее особенности: 1) талые и мерзлые породы шельфа засолены; 2) литология и теплофизические характеристики отложений шельфа; 3) значения потока тепла из земных недр ($q_{вз}$). Потоки $q_{вз}$ имеют различные значения в зависимости тектонического режима региона, возраста складчатости и сильно возрастают в зонах тектонических нарушений.

Математическое моделирование выполнялось как для одномерных, так и для двумерных задач при изучении закономерностей динамики температуры ММП и зоны стабильности газогидратов (ЗСГГ) в пределах рифта и его ограничений — «плеч» рифта (рис. 1.1), тектонически ненарушенных блоков пород (Романовский и др., 2006).

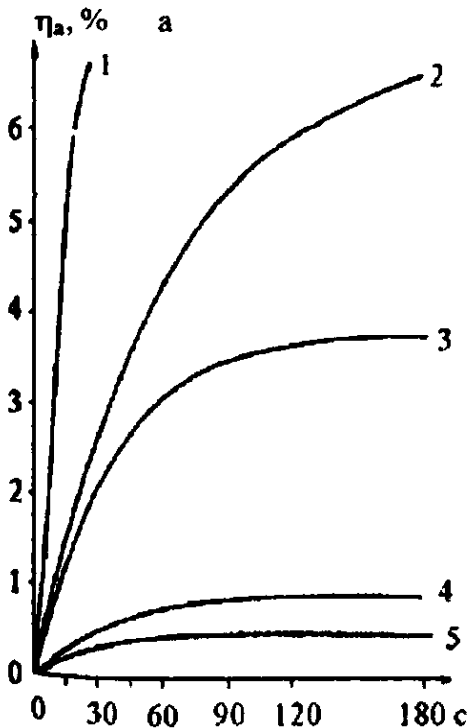
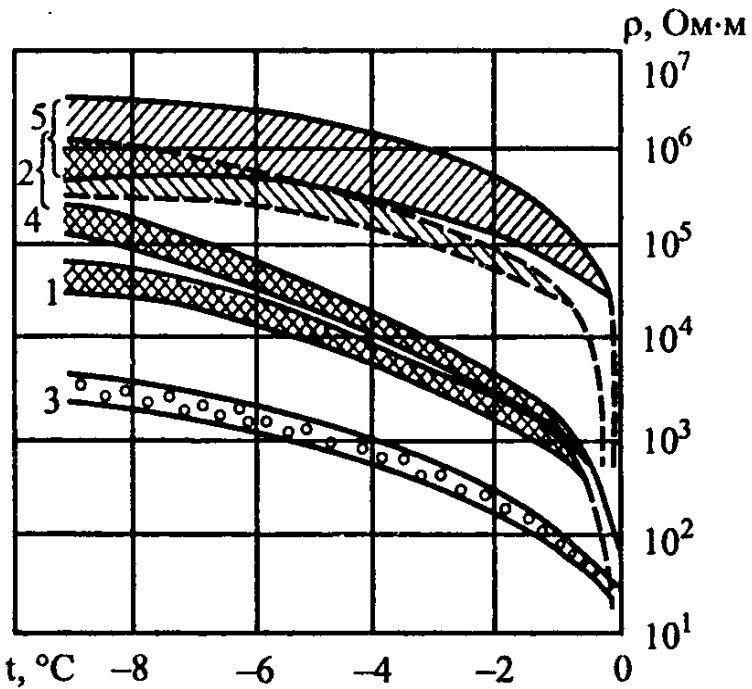
Анализ результатов моделирования показал, что на результаты моделирования влияют начальные условия (наличие или отсутствие ММП в нулевой момент времени). При последующем моделировании для оценки природных событий прошлого, происходивших на шельфе, для палеотемпературного анализа были использованы палеотемпературные данные за последние 400 тыс. лет (Романовский, Хуббертен, 2001). Расчеты за большой период времени позволили сделать вывод, что на внутренней части шельфа моря Лаптевых предполагается наличие сплошных мерзлых толщ в твердомерзлом состоянии существующих не менее 400 тыс. лет. На внешней части шельфа должны преобладать пластичномерзлые ММП, их прерывистое распространение и сквозные талики (рис. 1.2). Моделирование также показало, что для глубин акватории 45 м и более ММП полностью не деградировали в периоды трансгрессий, если $q_{вз}$ составлял не более 50 мВт/м². В случае более высоких значений теплового потока снизу, характерных для рифтовых зон и тектонических нарушений, в периоды трансгрессий возможно образование сквозных эндогенных таликов, что подтверждается последними результатами тепловых

1.3. Существующие представления об эффективности геофизических методов для изучения криолитозоны шельфа

Геофизические методы основаны на измерении физических полей на поверхности Земли, в акватории, в горных выработках, на некотором удалении от поверхности Земли и дальнейшем пересчете интенсивности измеренных полей в математическую модель распределения физических свойств объекта исследований. Эффективность геофизических методов для решения геокриологических задач на шельфе определяется контрастностью физических свойств талых и мерзлых толщ на акватории шельфа. Лабораторные исследования мерзлых пород (Фролов, 2005; Зыков, 2007, Хименков и др., 2018) показали, что наиболее информативными для изучения криолитозоны являются электрические и акустические свойства пород шельфа. Поэтому, методы электроразведки (очень редко) и сейсморазведки (в большинстве случаев) применяются для решения геокриологических задач на шельфе. В электроразведке для изучения свойств среды на глубины до 100 м используют методы, основанные на возбуждении и измерении постоянного электрического тока, для изучения больших глубин применяют методы, возбуждающие и регистрирующие переменное электромагнитное поле. Характеристиками электрических свойств среды при глубине изучения в десятки и сотни метров являются удельное электрическое сопротивление и поляризуемость пород. В сейсморазведке при изучении глубин до первых сотен используют методы сейсмоакустики (частотный диапазон возбуждаемого и регистрируемого полей упругих колебаний 1–17 кГц), для изучения глубин в первые километры, десятки километров применяют методы сейсморазведки (частотный диапазон возбуждаемого и регистрируемого полей ниже 1 кГц). Характеристиками упругих свойств среды в методах сейсморазведки и сейсмоакустики являются скорости продольных и поперечных волн, затухание и поглощение упругих колебаний в породах.

Наиболее контрастными при замерзании пород являются электрические свойства. По данным А.Д. Фролова, удельное электрическое сопротивление увеличивается от 20 Ом·м для талых песков до 1000000 Ом·м у мерзлых (рис. 1.3).

Рис. 1.3. Обобщенная температурная зависимость УЭС мерзлых пород: 1 – пески с массивной криотекстурой (к.т.); 2 – то же, с илрировой к.т.; 3 – супеси и суглинки с массивной к.т.; 4 – то же, с илрировой к.т.; 5 – ледниковый лед (по А.Д. Фролову, 2005).



Для суглинков и супесей наблюдается аналогичная закономерность с меньшим увеличением удельных электрических сопротивлений, от 20 до 100000 Ом·м (рис. 1.3). Поляризуемость грунтов увеличивается с увеличением доли ледяных включений (рис. 1.4).

Рис. 1.4. Поляризуемость мерзлых пород при различных режимах измерений в зависимости ($t = -2,5^{\circ}\text{C}$) от плотности поляризуемого тока (время заряда $t_{зар}=180\text{ с}$): 1 – озерный лед, 2 – крупнозернистый песок, 3 – мелкозернистый песок, 4 – суглинок, 5 – глина (по А.Д. Фролову, 2005).

Аналогичные закономерности наблюдаются и для акустических свойств пород при их замерзании. По данным Ю.Д. Зыкова, скорости продольных волн

при замерзании песков увеличиваются с 1000 м/с до 2000 м/с и более в зависимости от их влажности. Уменьшение льдистости в супесях, суглинках и глинах приводит к уменьшению скоростей продольных волн. Так для талых характерны скорости продольных волн около 500 м/с, для мерзлых – до 1500 м/с и более в зависимости от влажности (рис. 1.5).

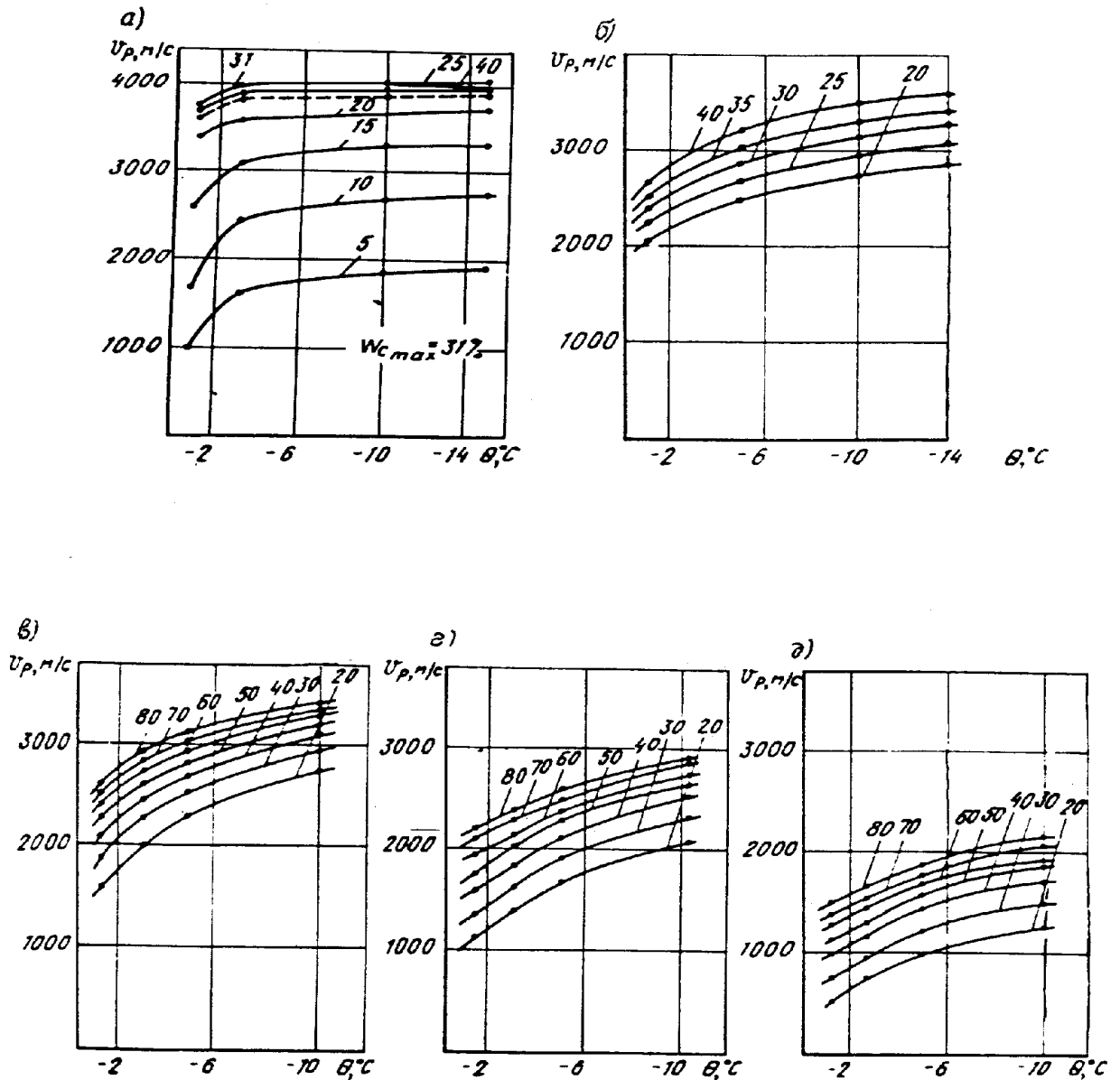


Рис. 1.5. Обобщенные зависимости скорости продольных волн от температуры при фиксированных значениях от 20 до 80 % весовой влажности грунтов различного состава: а – мелкозернистые пески; б – суглинки; в – низкопластичные глины; г – среднепластичные глины; д – высокопластичные глины (по Ю.Д. Зыкову, 2007).

Контрастность сейсмических свойств талых и мерзлых пород несколько меньше, чем электрических, но вполне достаточная для выделения аномалий этих пород на современном уровне развития технологий сейсморазведки и сейсмоакустики.

Методы сейсмоакустики на протяжении последних 30 лет входят с стандартный комплекс инженерно-геологических изысканий на акватории. Методы сейсморазведки являются ведущими при изучении тектонического строения и при поисках залежей углеводородов более 50 лет на акватории. Суммируя опыт многолетних исследований АО «АМИГЭ», С.И. Рокосом выполнен анализ и обобщение данных за последние 30 лет по шельфу Баренцева и Карского морей

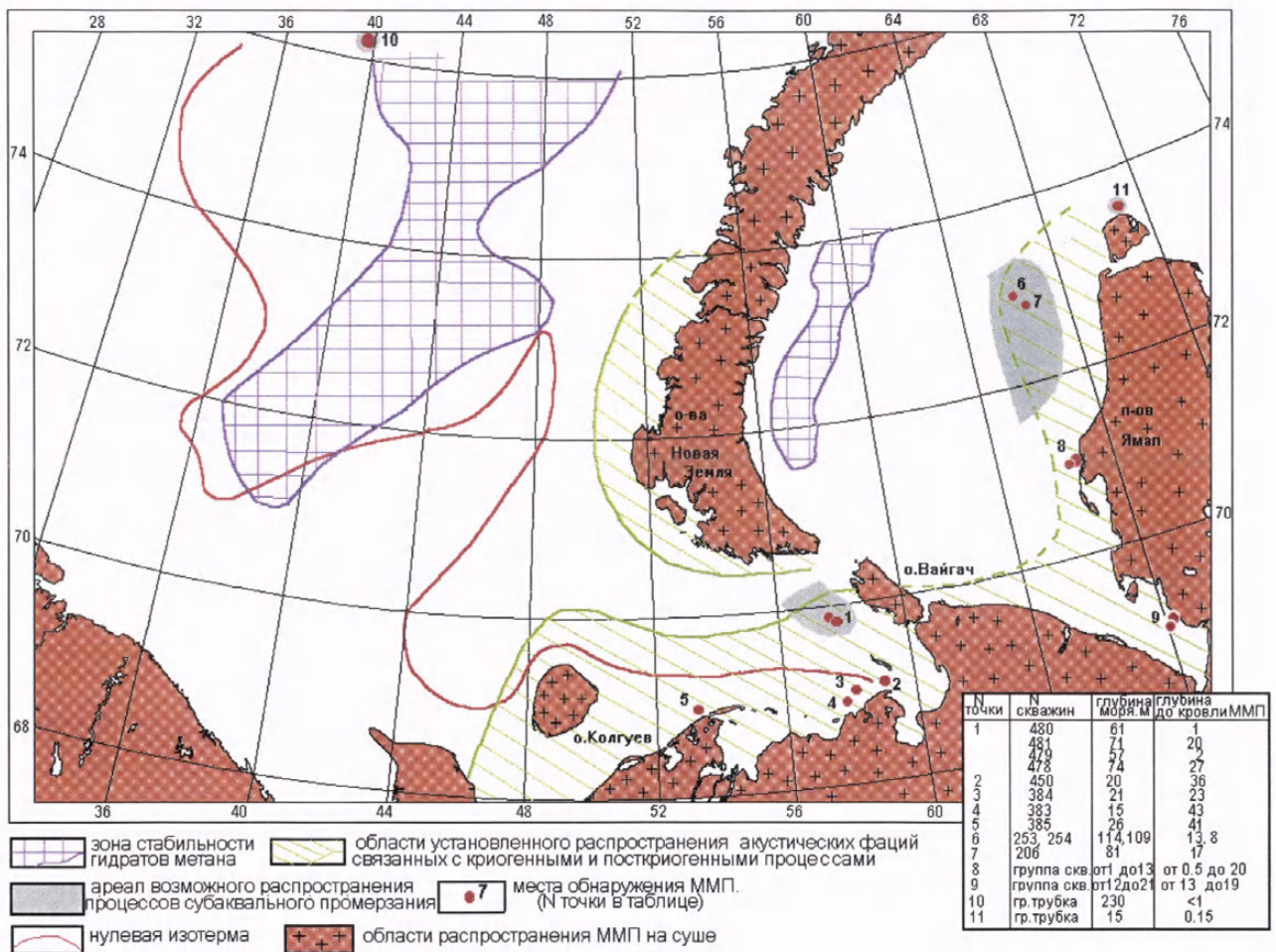


Рис. 1.6. Криолитозона Юго-Восточной части Баренцева и Юго-Западной части Карского морей (по данным С.И. Рокоса и др., 2007).

(Рокос и др, 2009) на шельфе Печорского и Карского морей по данным сейсмоакустики. (рис. 1.6).

В результате этого анализа были определены по данным сейсмоакустики зоны газонасыщения в осадочных толщах, разломы активные и пассивные, а также построена карта распространения многолетнемерзлых пород.

Полученные результаты вызывают огромный интерес, однако, нуждаются в подтверждении бурением на шельфе. Так при выполнении совместных немецко-российских исследований по программе «Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики» российскими и немецкими геофизиками была зафиксирована яркая акустическая граница в верхней части сейсмоакустических разрезов (акустический рефлектор) на шельфе моря Лаптевых. Природа этой сейсмоакустической границы была связана с кровлей многолетнемерзлых пород (Schwenk et al., 2006). Выполненные впоследствии буровые работы по профилям сейсмоакустических исследований российских и немецких коллег показали, что природа акустического рефлектора связана со скоплениями газов в осадках на шельфе моря Лаптевых (Shakhova et al., 2017).

Методы электроразведки были пионерными для решения нефтегазовых и поисковых задач в 60-х годах прошлого столетия на суше, однако, бурное развитие сейсморазведки (повлекшее резкое увеличение детальности и разрешающей способности сейсмических методов) обеспечило повсеместное использование сейсмических технологий при решении производственных задач как на суше, так и на море (Долгунов и др., 2011), и минимальное использование технологий электроразведки на суше и акватории (рис. 1.7).

Последние 10 лет наблюдается обратная тенденция. Методы сейсморазведки уже показали свои достоинства и недостатки, и для решения так и не решенных сейсморазведкой и сейсмоакустикой задач все чаще и чаще начинают применяться электроразведочные методы, зачастую имеющие принципиальные преимущества перед методами сейсморазведки.

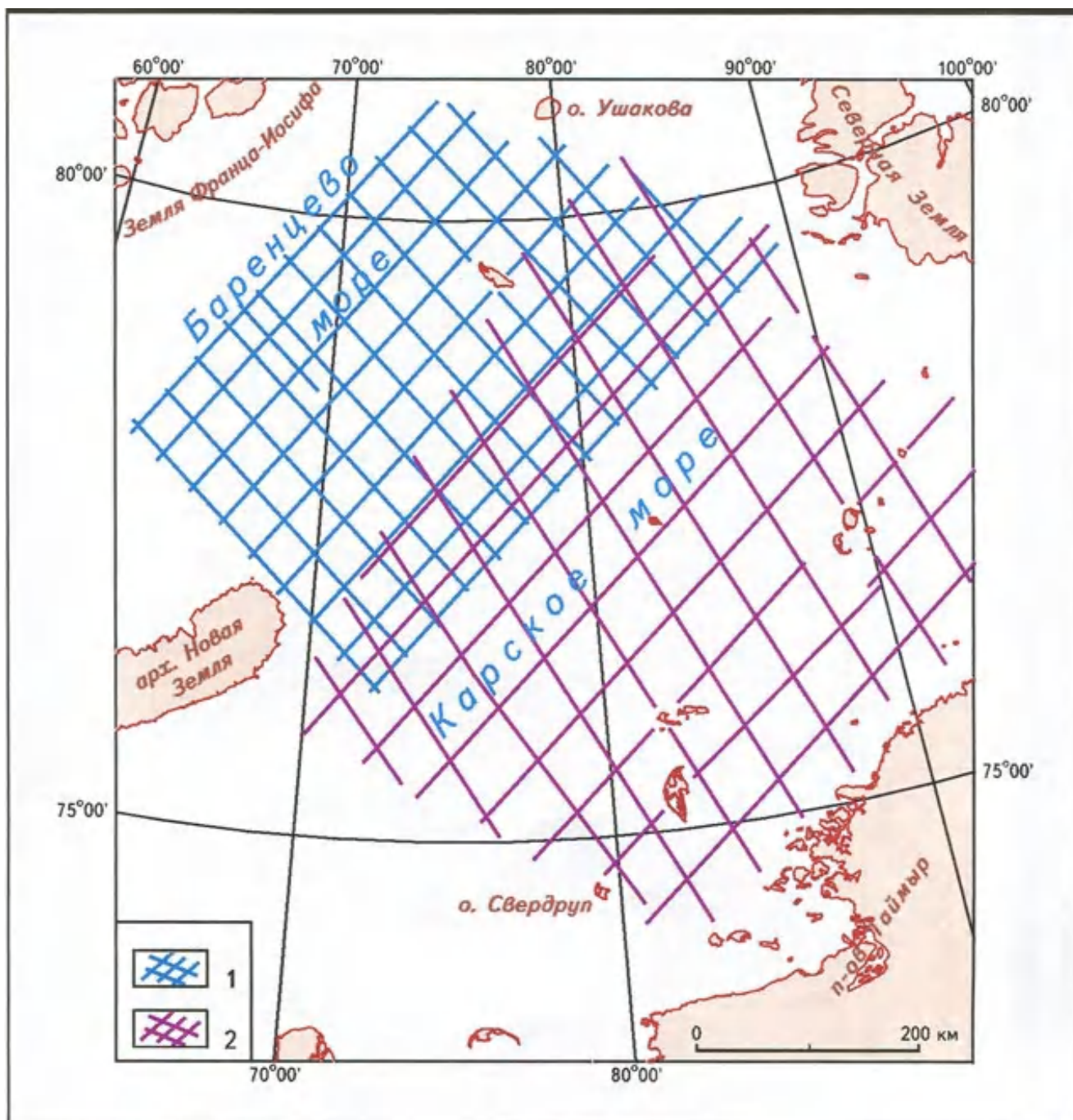


Рис. 1.7. Обзорная карта геофизических исследований ОАО «Севморнефтегеофизика» (по К.А. Долгунову и др., 2011).

Профили: 1 – МОВ ОГТ на Северо-Карском участке, 2 – сейсмо-, грави- и магниторазведка на Ушаковско-Новоземельском участке

По мнению автора, именно такой оказалась ситуация с геофизическими методами для изучения криолитозоны. Традиционные методы сейсмоакустики

прекрасно справляются с задачами литологического расчленения в плоскопараллельных средах, они отлично подходят для расчленения осадочных толщ на акватории. Это связано с природой отражения и преломления упругих колебаний. Отражения от протяженных плоских литологических границ уверенно фиксируется в методах сейсмоакустики (рис. 1.8).

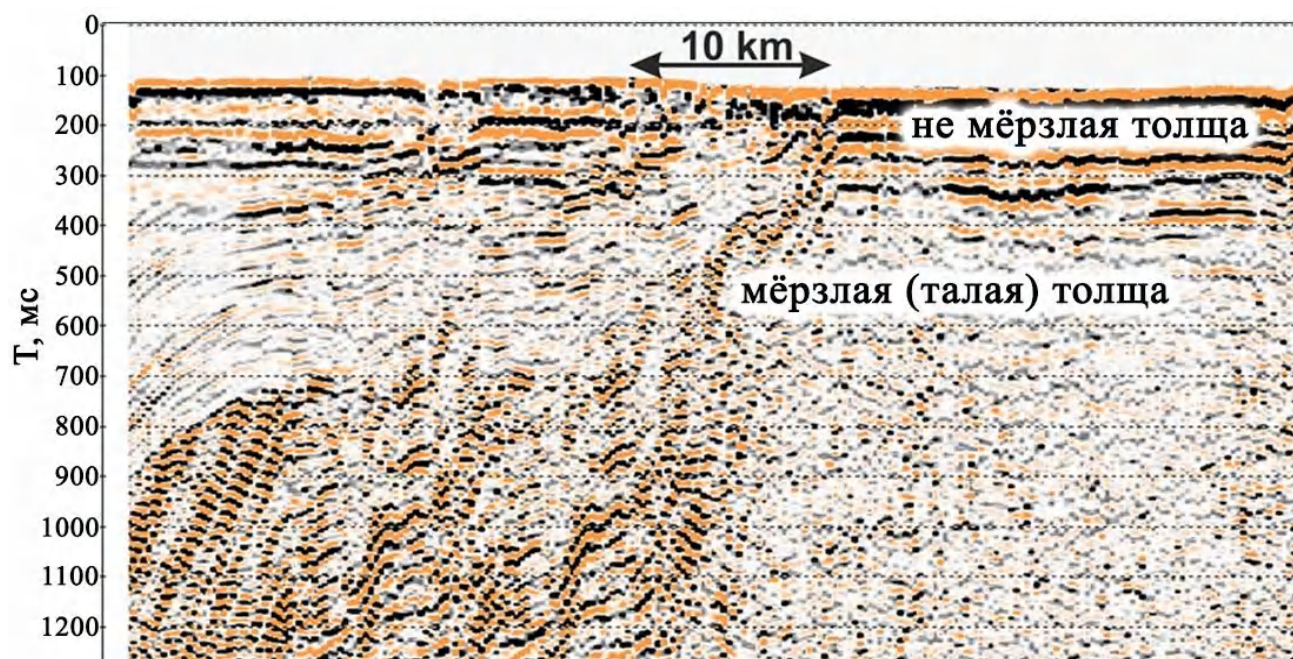


Рис. 1.8. Фрагмент временного разреза на шельфе моря Лаптевых (по данным автора).

При промерзании осадочных толщ первоначальная геометрия среды нарушается, на нее «накладывается» вторичная геометрия – распределение скоростей в соответствии с криотекстурами, формирующимися при промерзании осадочной толщи. Мерзлые осадочные толщи перестают представлять собой плоскопараллельную среду. В результате на сейсмоакустических разрезах появляются характерные области разрушения осей синфазности (рис. 1.8). Понятно, что различная льдистость и различные криотекстуры мерзлых пород будут по-разному нарушать сейсмоакустические разрезы. Вероятно, что и движение газов сквозь осадочную толщу также приведет к аналогичным нарушениям в синфазности сейсмоакустических разрезов. Отметим, что даже

полная деградация многолетнемерзлых пород не изменит нарушений, вызванных формированием криотекстур в осадочной толще. Таким образом, для изучения немерзлых пород методы сейсмоакустики являются наиболее информативными, а для изучения мерзлых и талых пород – менее информативными.

Методы электроразведки чувствительны к интегральному параметру – удельному электрическому сопротивлению осадочной толщи, на глубинах, соответствующих частоте электромагнитного поля. Возникновение вторичной геометрии среды, связанной с криотекстурами, резко увеличивает удельное электрическое сопротивление пород из-за образования льда в осадочных породах (рис. 1.3). Следовательно, возникновение криотекстур в осадочных породах, наоборот, не приводит к неинформативности метода, а является наиболее информативным фактором, обеспечивающим контраст удельных электрических сопротивлений талых и мерзлых пород, а значит и эффективность применения электроразведки для изучения мерзлых пород. Используя интегральный параметр среды – удельное электрическое сопротивление слоя (мощность изучаемого слоя определяется частотой создаваемого электромагнитного поля), методы электроразведки наиболее информативны для изучения талых и мерзлых пород (рис. 1.9).

На акватории для решения геокриологических задач методы электроразведки применялись Ю. А. Нимом (ИМЗ СО РАН) на шельфе моря Лаптевых, М. А. Холмянским (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»), однако, дальнейшего продолжения применения электроразведки для решения геокриологических задач в производственных масштабах не последовало. Автором выполнены более 1000 электромагнитных зондирований с припайного льда на шельфе Карского, Лаптевых, Чукотского морей в период 2005–2020 гг., и более 240 000 электромагнитных зондирований на акватории шельфа морей Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-сибирского, Чукотского в период

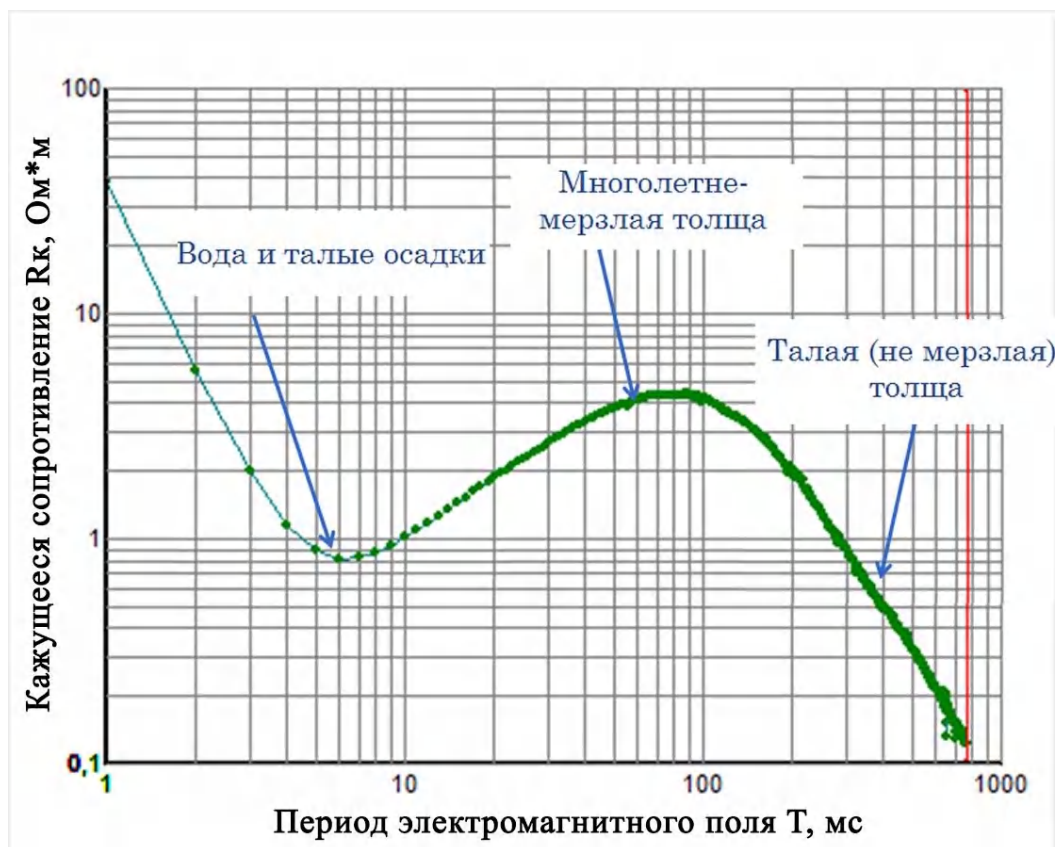


Рис.1.9. Результаты электромагнитного зондирования на шельфе моря Лаптевых (данные автора).

2012–2020 гг. Успешное применение электроразведочных технологий на приамальском шельфе позволили включить метод зондирования становлением поля в ближней зоне в число обязательных геофизических методов при выполнении инженерно-геологических, и геокриологических изысканий на приамальском шельфе, выполняющихся в ПАО «Газпром» (Приложение И). Буровые работы и термометрия, выполненные ПАО «Газпром» после электроразведочных работ, обнаружили, на указанных электроразведкой глубинах, многолетнемерзлые толщи.

1.4. Геокриологические условия арктического шельфа

1.4.1. Орогидрография шельфа

Шельфом принято называть мелководные акватории морей и океанов, окаймляющие материки и острова с глубинами до 600 м (Морская геология,

1980). В англоязычной литературе (Кеннет, 1987) шельф определяется как простираение материка к морю от берега до бровки шельфа, где происходит заметное увеличение крутизны склонов (рис. 1.10).

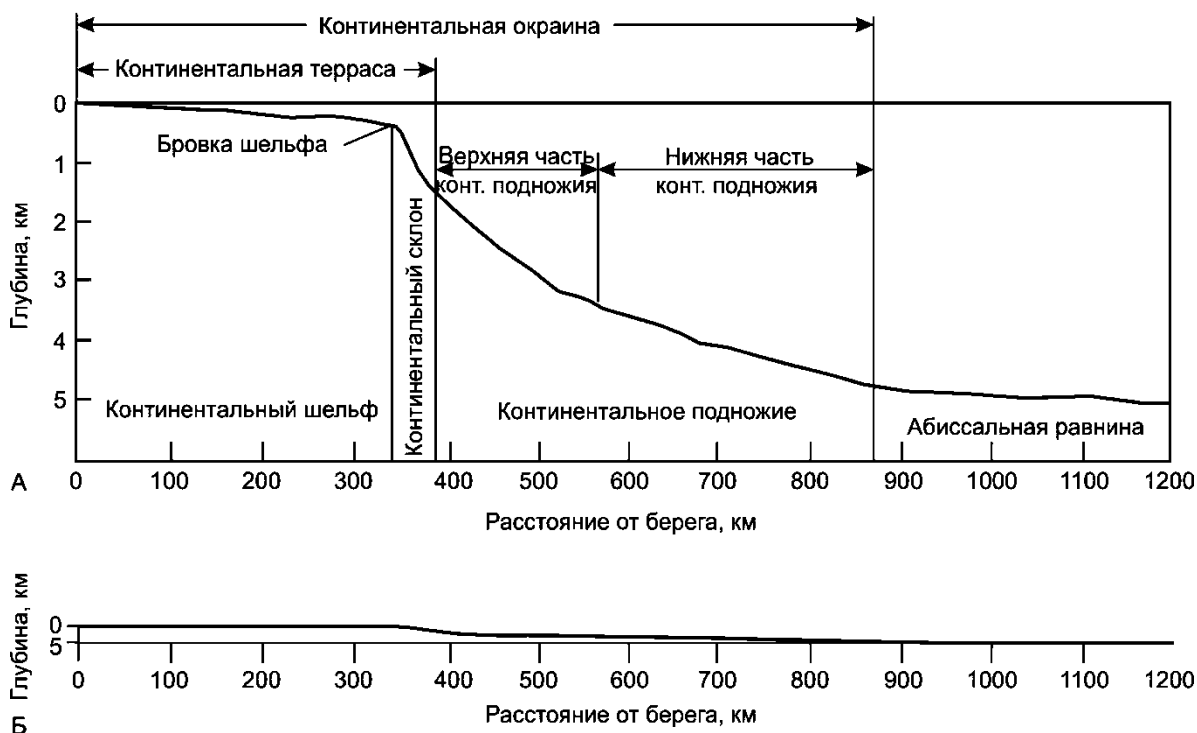


Рис. 1.10. Основные формы рельефа атлантической континентальной окраины (по Дж.П.Кеннету, 1987); А – соотношение вертикального и горизонтального масштаба 1:50; Б – в масштабе 1:1.

Согласно геологическим представлениям, континентальный шельф Российской Федерации – есть продолжение континента до бровки шельфа вдоль территории Российской Федерации. Согласно Конвенции ООН по морскому праву, континентальным шельфом России является дно океанов и их недра, относящиеся к территориям Российской Федерации.

Закон РФ № 187-ФЗ определяет континентальный шельф как морское дно и их недра на расстоянии 200 морских миль (исключительная экономическая зона РФ) от границы территориальных вод РФ, если граница подводной окраины материка не продолжится более чем 200 морских миль от границы территориальных вод. В случае, если подводная окраина материка располагается далее 200 морских миль от границы территориальных вод РФ, то границы

континентального шельфа определяются положением подводной окраины материка. В этом случае шельф выходит за пределы исключительной экономической зоны.

Шельф Северного Ледовитого океана является самым крупным. Он наименее изучен, однако, в его пределах располагаются крупнейшие месторождения нефти и газа. За исключением внутренних морей России (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское) арктический шельф используется совместно с Норвегией (Баренцево море) и Соединенными Штатами (Чукотское море) по соглашению между СССР и США о линии разграничения морских пространств 1990 г. (рис. 1.11).

Между континентами и океанами выделяются переходные зоны, в которых происходит сочленение континентальной и океанической коры – подводные продолжения материков (континентальные окраины). Протяженность этих переходных зон составляет не более 200 км (Шепард, 1976). По рельефу, геологическому и тектоническому строению выделяются пассивные окраины атлантического типа и активные окраины тихоокеанского типа.

Пассивные окраины развиты по периферии Атлантического океана. Они окаймляют Северный Ледовитый и Индийский океаны. Считается, что пассивные окраины образовались в течение последних 200 млн лет в процессе рифтогенеза — последовательного раскола единого суперконтинента Пангея и раздвижения литосферных плит. В рельефе пассивных окраин выделяются четыре крупные геоморфологические формы: шельф, континентальный склон, верхняя часть континентального подножья и нижняя часть континентального подножья. Эти формы различны по батиметрии, геологическому строению, геофизическим характеристикам и процессам формирования рельефа (рис. 1.10).

Общая площадь шельфа обширна и составляет 20% от площади суши. Глубины шельфа составляют 0–600 м (Леонтьев, 1979). В среднем ширина шельфа составляет 72 км. Шельф морей Баренцева и Берингова занимает

половину их площади и достигает 800–1100 км в ширину. Средние уклоны дна на поверхности шельфа составляют $0,7^\circ$ (рис. 1.10).

Шельф, как материковая отмель, располагается на континентальной коре. При движении к континентальному склону уменьшается мощность континентальной коры от 40 до 20 км и увеличивается ее раздробленность.

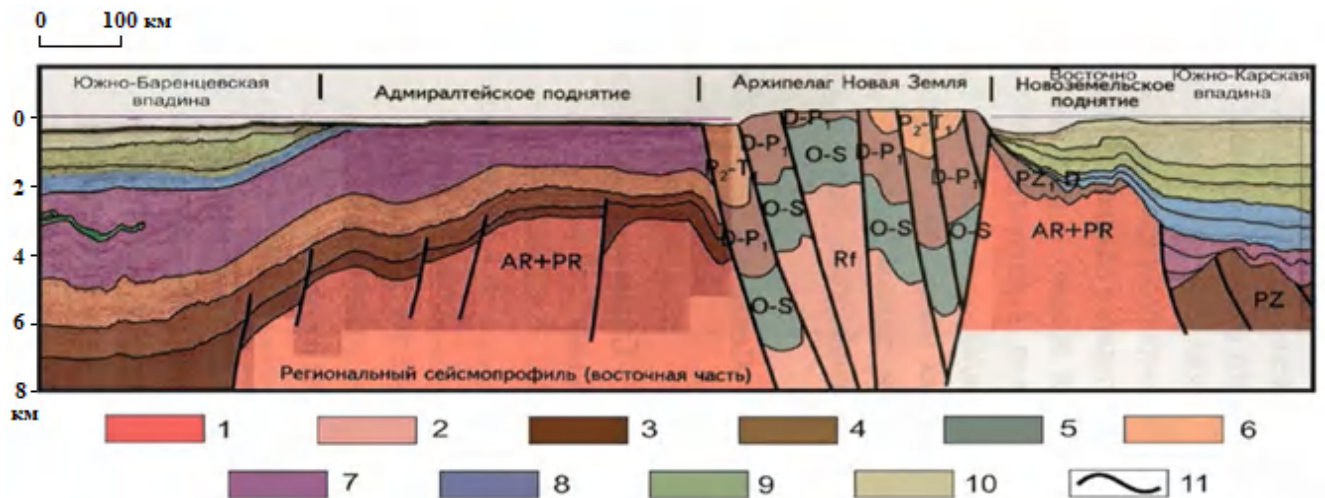
Мощность осадочного чехла, перекрывающих фундамент на шельфе, составляет несколько километров (Шепард, 1976). Эта структурная особенность шельфа принципиально важна для интерпретации геофизических данных на арктическом шельфе.

Формирование такой мощной осадочной толщи происходило как дочетвертичное время, так и в четвертичное. По мнению Крапивнера (Крапивнер, 2006), скорость прогибания Баренцева моря составляет сегодня 1,4–3 см/год. Палеогеографические исследования свидетельствуют, что практически весь арктический шельф в четвертичное время испытал многочисленные этапы своего осушения и затопления. Наиболее позднее затопление арктического шельфа имело место в позднеплейстоцен-голоценовое время, при таянии ледников валдайского оледенения, что обеспечило подъем уровня морей и океанов примерно на 100 м. Моря арктического шельфа являются эпиконтинентальными (надматериковыми), поскольку их формирование произошло при наступлении Мирового океана на окраинные части материков (Леонтьев, Рычагов, 1979). На шельфе выделяют две зоны – внутреннюю и внешнюю. На глубинах от 30 до 100 м располагается внутренняя зона. Она имеет наиболее выровненный рельеф на шельфе. Между береговой линией и внутренней зоной выделяют прибрежную зону. Она определяется как зона затухания волновых процессов вдоль побережья. На глубинах более 100 м располагается внешняя зона. Для нее характерен наиболее расчлененный рельеф шельфа. Внешняя часть шельфа часто ограничена бровкой шельфа, барьерами, как правило, связанными с выступами фундамента (Кеннет, 1987).

1.4.2. Тектонические особенности строения шельфа

Тектоническое строение шельфа Баренцева и Карского морей отличается присутствием в этом регионе архей-протерозойского фундамента. В Баренцевоморской и Северо-Карской впадинах фундамент погружается на глубины до 10 км. Южно-Карская впадина, по мнению В.А. Богданова, является продолжением Западно-Сибирской плиты. В фундаменте впадины существуют прогибы и поднятия (валы). Мощность толщи осадков в прогибах достигает 8–10 км. Мощность осадков над валами (Свердрупский вал) не более 2 км (Богданов, 2004).

Считается, что Новая Земля – это инверсионный геосинклинальный блок, который сформировался в триасово-юрское время. В тектоническом отношении этот блок представляет собой горстовоскладчатое поднятие (рис. 1.12).



Комплексы: 1 - кристаллический фундамент архей-нижнепротерозой, 2 - рифей вендский карбонатно-терригенный, 3-нижнепалеозойский (ордовикский, силурийский, среднедевонский) терригенно-карбонатный, 4 - верхнепалеозойский (верхнедевонский, каменноугольный, нижнепермский) карбонатный, 5 - ордовик-силурийский терригенно-карбонатный, 6 - пермский, 7 - триасовый терригенный, 8 - юрский терригенный, 9 - нижне-меловой терригенный, 10 - верхнемеловой терригенный, 11 - интрузии.

Рис. 1.12. Геологический разрез Баренцево-Карского шельфа в субширотном направлении (по А.В. Ступаковой, 2011).

Поднятие образовалось на месте геосинклинального прогиба, заложившегося в рифе и испытавшего инверсию в триасово-меловое время

(Ступакова, 2011). В основании Северо-Баренцевской и Южно-Карской впадин, по данным сейсморазведки, обнаружены серии рифтогенных структур, что позволяет связать их природу с серией рифтов. В зоне сочленения Северо-Баренцевской впадины и Новой Земли по геофизическим данным фиксируется шовная зона, что, возможно, связано с существовавшей в прошлом зоны субдукции на северо-западном крае Новой Земли (Куницын, 2008).

Новый фактический материал, полученный ОАО «Севморнефтегеофизика», в Восточно-Баренцевской и Южно-Карской впадинах свидетельствует о сложной форме фундамента и чередовании сводов и прогибов в пределах впадин (рис. 1.13).

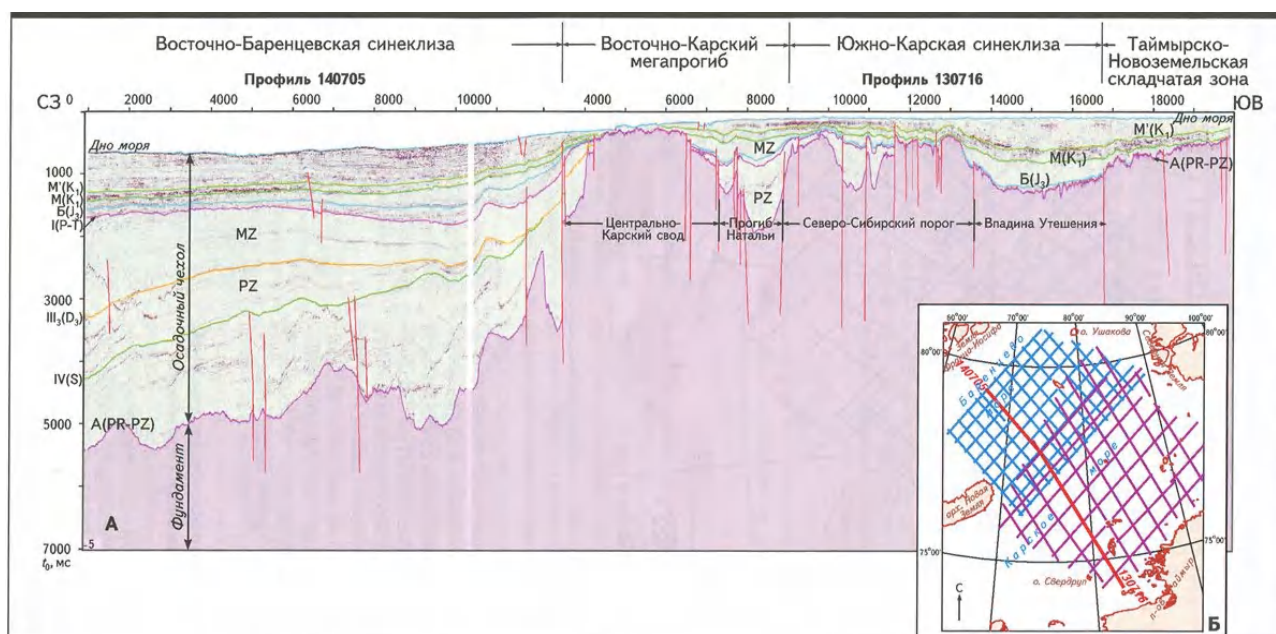


Рис. 1.13. Временной сейсмический разрез через северную часть Баренцево-Карского региона (А) и схема привязки расположения профилей (Б) (по К.А. Долгунову и др., 2011).

Глубины погружения фундамента в Южно-Карской впадине по данным ОАО «Севморнефтегеофизика» составляют не менее 2–3 км в прогибах и не более 0,8 км на валах (рис. 1.14).

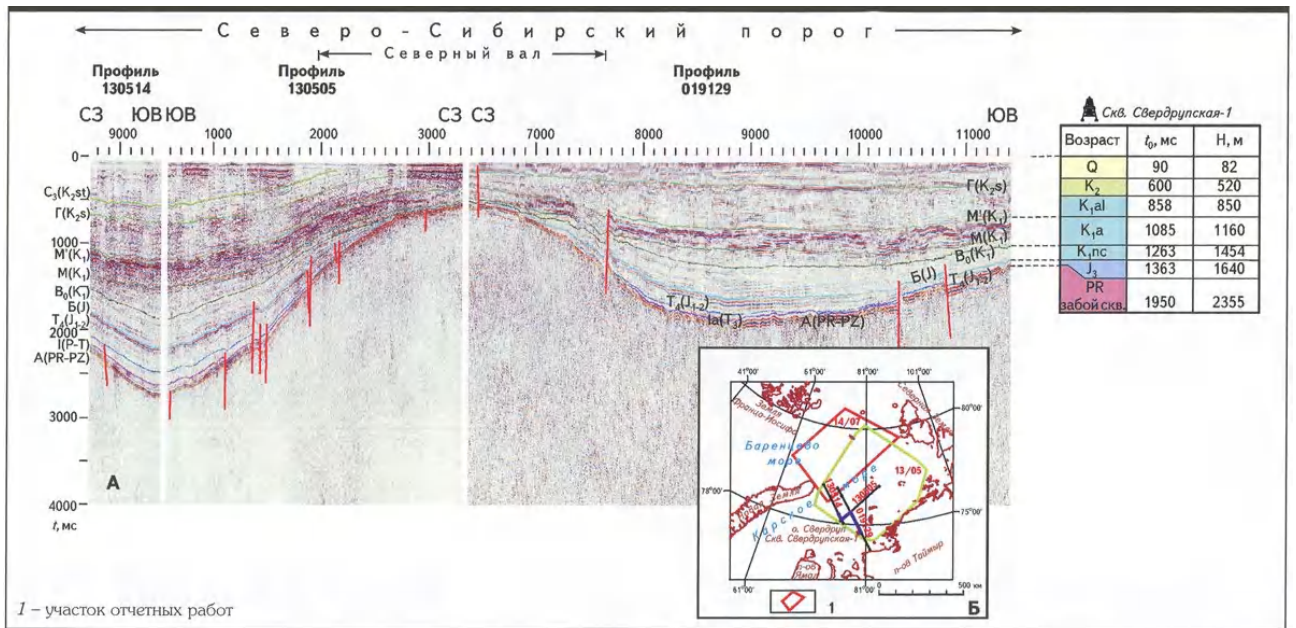


Рис. 1.14 Стратиграфическая привязка отражающих горизонтов к скв. Свердрупская-1 (А) и схема расположения профилей (Б) (по К.А. Долгунову и др., 2011).

По сейсморазведочным данным в диссертационной работе Г.В. Ульянова (Ульянов, 2011), мощность осадочного чехла составляет не менее 1 км на валах и до 5 км в прогибах Южно-Карской впадины (рис. 1.15).

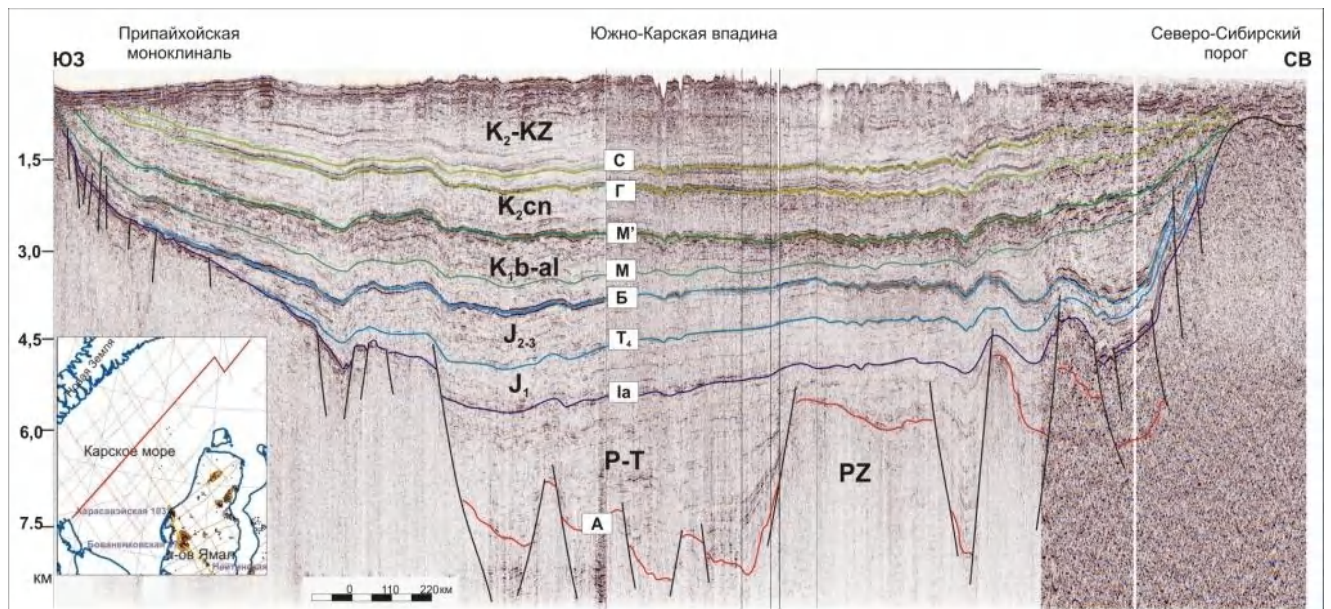


Рис. 1.15 Глубинный сейсмический разрез Южно-Карской впадины (по Г.В. Ульянову, 2011).

На шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского выделяется *Новосибирская система грабенов и горстов и Лаптевский бассейн*. Природа фундамента на шельфе моря Лаптевых до сих пор остается дискуссионной. Считается, что фундаментом для Новосибирской системы горстов и грабенов послужили консолидированные образования мезозоя Верхояно-Колымской складчатой области, обнажающиеся на о. Котельный (Драчев, 2000). Породы мезозойского фундамента перекрыты на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского осадочным чехлом мощностью от 1 до 12 км. Возраст осадочного чехла определяется как верхний мел–кайнозой (Драчев, 1999).

В Новосибирскую систему грабенов входят: Новосибирский, Бельковско-Святоносский, Небен и Анисинский грабены и Анжу, Котельнический, Бельковский и Восточно-Лаптевский горсты (рис. 1.16).

Строение грабенов на шельфе моря Лаптевых имеет ассиметричную особенность. Юго-западный борт большинства грабенов приподнят, тогда как северо-восточный – опущен. Поперечные сечения горстов, разделяющих грабены, и хребта Ломоносова также имеют сходство. Подобная закономерность свидетельствует о региональном распределении полей напряжений в ЮЗ-СВ направлении для всего шельфа моря Лаптевых.

Шельфы морей Лаптевых и Восточно-Сибирского от впадины Нансена и Амундсена, по мнению многих исследователей, отделяет разлом Чарли. Комплексная интерпретация геофизических данных не подтвердила в данном регионе крупноамплитудных перемещений в осадочном чехле. Также в этой зоне отсутствуют центры землетрясений по сейсмологическим данным. Указанные данные свидетельствуют не о разрывных, а о скалывающих, дугообразных движениях на кромке шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (Драчев, 1999).

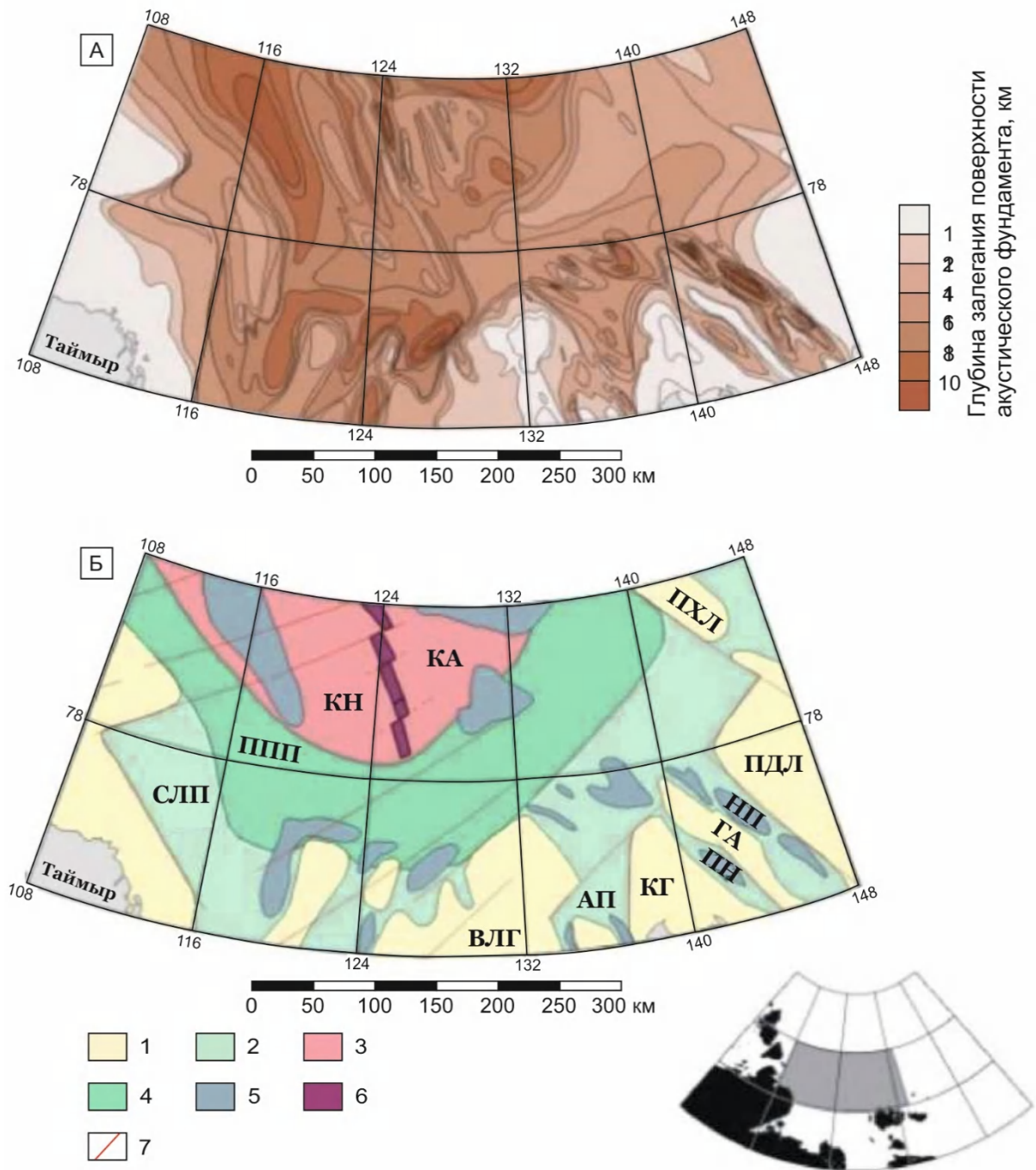
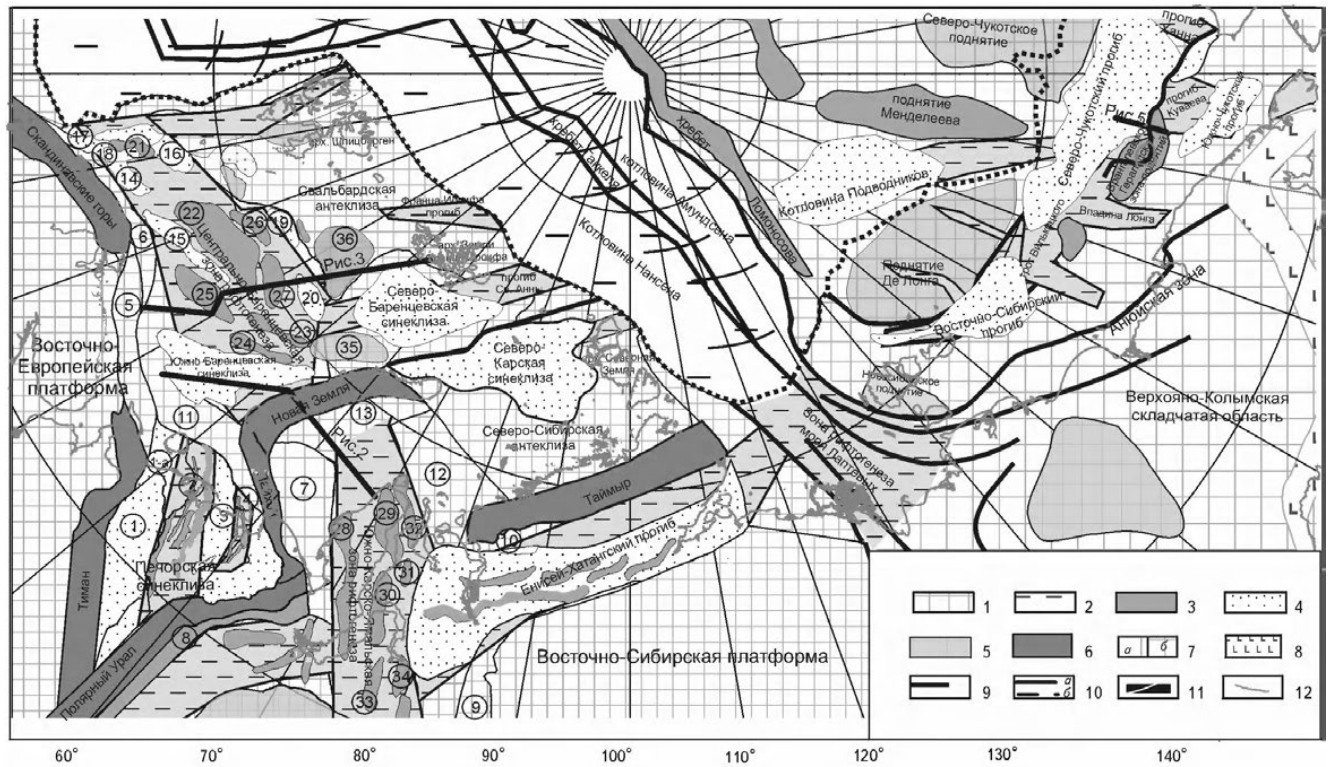


Рис. 1.16. Схема поверхности акустического фундамента (А) и региональная тектоническая схема (Б) (по А.Ф. Драчеву, 2000).

/ — горсты и структурные поднятия на континентальной коре, ВЛГ — Восточно-Лаптевоморский горст, КГ — Котельнический горст, ПДЛ — поднятие Де-Лонга, ГА — горст Анжу, ПХЛ — поднятие хребта Ломоносова; 2 — грабенообразные прогибы рифтогенной природы и структурные понижения: СЛП — Северо-Лаптевский прогиб; 3 — океаническая кора: КЦ — котловина Нансена, КА — котловина Амундсена; 4 — структурная терраса континентального склона: ППП — Присевероземельский периокеанический прогиб; 5 — центральные части грабеноподобных прогибов на шельфе и периокеанических прогибов, сформированных на коре переходного типа: АП — Анисинский прогиб, ПН — прогиб Небен, НП — Новосибирский прогиб; 6 — рифтовая долина хребта Гаккеля; 7 — разломы

Современные представления о геологической истории развития шельфа Российской Арктики и его нефтегазоносности (Бурлин и др., 2008) свидетельствует о его сложном блоковом строении (рис. 1.17)



1 – относительно стабильно развивающиеся участки древней платформы; 2 – региональные зоны континентального рифтогенеза с последующим развитием глубоких впадин и инверсионных валов; 3 – валы инверсионные; 4 – впадины, наложенные на структуры более древнего заложения; 5 – сводовые поднятия; 6 – складчатые области; 7 – киммерийское основание восточного сектора Арктики: а – более дислоцированное, б – менее дислоцированное; 8 – вулканические пояса; 9 – рифтогенез с возможным образованием коры океанического типа; 10 – глубинные разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 11 – линии сейсмогеологического разреза; 12 – береговая линия; 13 – структурные элементы: Печорская синеклиза: 1 – Ижма-Печорская впадина, 1а – Мальземельско-Колтуевская моноклинал, 2 – Печоро-Колвинский авлакоген, 3 – Большеземельский блок (Хорейверская впадина), 4 – Варандей-Адзвинская структурная зона; Баренцево-Карский шельф: моноклинали – 5 – Кольская, 6 – Финмарк, 7 – Припайхойская, 8 – Приуральская, 9 – Приенисейская, 10 – Притаймырская; зоны тектонических ступеней: 11 – Южно-Баренцевская, 12 – Восточно-Карская, 13 – Пахтусовская; Центрально-Баренцевская зона рифтогенеза: прогибы: 14 – Хаммерфест, 15 – Нордкап, 16 – Бьёрная, 17 – Харстад, 18 – Тромсё, 19 – Св. Ольги, 20 – Малыгинский грабен; валы (инверсионные): 21 – поднятие Логпа, 22 – поднятие Бьярмелэнд, 23 – Демидовско-Лудловский мегавал, 24 – Штокмановская седловина, 25 – свод Фельнского, 26 – поднятие Центральной банки, 27 – поднятие Ферсмана; Южно-Карско-Ямальская зона рифтогенеза: валы (инверсионные): 28 – Нурминский, 29 – Малыгинский, 30 – Ямбургский, 31 – Гыданский, 32 – Преображенско-Зеленомысовский, 33 – Уренгойский, 34 – Тазовский; сводовые поднятия: 35 – Адмиралтейский вал, 36 – поднятие Вернадского

Рис. 1.17. Схема расположения основных тектонических элементов Арктики (по Ю.К. Бурлину и А.В. Ступаковой, 2008).

1.4.3. Геологическое строение шельфа

Докембрийское основание шельфа Баренцева моря объединяет три микроплиты: на западе – Норвежскую, в центре – Свальбардскую и на востоке – Тимано-Печорскую. Осадочный чехол представлен палеозойскими отложениями, пермско-триасовым вулканогенно-осадочным комплексом и верхнеюрско-

нижнемеловым вулканогенно-осадочным комплексом. Мощность осадочного чехла в западной части составляет более 10 км. В центральной части (Свальдбарская плита) расположены поднятия: Центрально-Баренцевское, Адмиралтейское, Мурманское, Персея. Здесь характерны сокращенная мощность осадочного чехла и острова, представляющие собой вершины подводных поднятий (о-ва Виктории и Земли Франца Иосифа). К востоку от Свальдбарской плиты простирается крупнейшая структура на шельфе Баренцева моря – Восточно-Баренцевский прогиб. Прогиб имеет субмеридиональное простирание и объединяет две впадины – Северо-Баренцевскую и Южно-Баренцевскую, разделенные Лудловским сводом. Мощность отложений чехла в Северо-Баренцевской впадине составляет до 15 км. В Южно-Баренцевской впадине отсутствует континентальная кора, а мощность осадочного чехла достигает 20 км. (Богданов, 2004).

В южной части шельфа Баренцева моря располагается Печорская плита, консолидировавшаяся в байкальское время. Центральную часть плиты занимает Печороморская впадина. Мощность осадочного чехла впадины достигает 7 км. Особенностью Печороморской впадины является наличие здесь пологих валов с простиранием от северо-западного до субширотного, сложенных отложениями перми и триаса. Породы фундамента Печорской плиты представлены рифей-вендскими кварцитами и метаморфизованными песчаниками, обнажающимися на Канинской гряде, полуострове Рыбачий и Варангер (Пискарев и др., 2002).

Шельф Карского моря можно разделить на две части – южную и северную как по возрасту пород фундамента, так и по мощности осадочного чехла.

Южную часть шельфа занимает Южно-Карская впадина, являющаяся продолжением Западно-Сибирской плиты. Фундамент здесь представляют метаморфические породы рифея и палеозоя. Фундамент разбит рифтовыми структурами и горстами (Рогозинский, Русановский). Фундамент Южно-Карской впадины перекрыт осадочным чехлом, который представлен толщей палеозойских терригенных отложений и толщей терригенных отложений юрско-

мелового возраста, перекрытых кайнозойским чехлом терригенных отложений. Общая мощность осадочного чехла достигает 14 км.

Северную часть шельфа Карского моря занимает Карская плита. В пределах Карской плиты располагаются архипелаг Северная Земля, Северный Таймыр и острова поднятия Визе. Фундамент поднятия Визе представлен кристаллическими сланцами протерозой-рифейского возраста. Чехол слагают отложения рифея–палеозоя морского происхождения и толщи меловых и кайнозойских пород прибрежно-континентального генезиса. Мощность осадочного чехла в пределах сводов поднятия составляет по геофизическим данным не менее 2 км, а в прогибах – до 10 км (Грамберг и др., 2000).

Осадочный чехол на шельфе моря Лаптевых представлен осадочными толщами верхнемелового-кайнозойского возраста. В океанических впадинах моря Лаптевых верхнемеловой осадочный чехол перекрывает базальты фундамента океанической коры. На бортах впадин наблюдается замещение осадочной толщи верхнего мела вулканогенной толщей океанической коры. В кайнозойском осадочном комплексе можно выделить мощную позднеолигоценовую осадочную толщу, свидетельствующую о прогибании океанического бассейна в это время (Гусев и др., 2002).

Строение шельфа и континентального склона моря Лаптевых представлено на сейсмическом профиле 90700, выполненном ОАО «МАГЭ» (рис. 1.18). Сейсмический профиль пересекает хребет Гаккеля в северной его части по 79°40' с.ш. в районе подножья континентального склона. Анализируя сейсморазведочные данные А.Ф. Драчев предполагает наличие рифтовых долин и гор у подножья континентального склона, перекрытых палеоцен-эоценовым осадочным чехлом (Драчев, 1999). Структуру рифтовой долины по данным сейсморазведки можно объяснить продолжительным осадконакоплением при отсутствии тектонической активности бассейна в мел-миоценовое время. Мощность осадочного чехла достигает здесь 8 км. Характерна выдержанность и однотипность осадочной толщи. Гребни гор хребта Гаккеля по

сейсморазведочным данным представляют собой протрузии базальтов сквозь осадочную толщу (рис. 1.19).

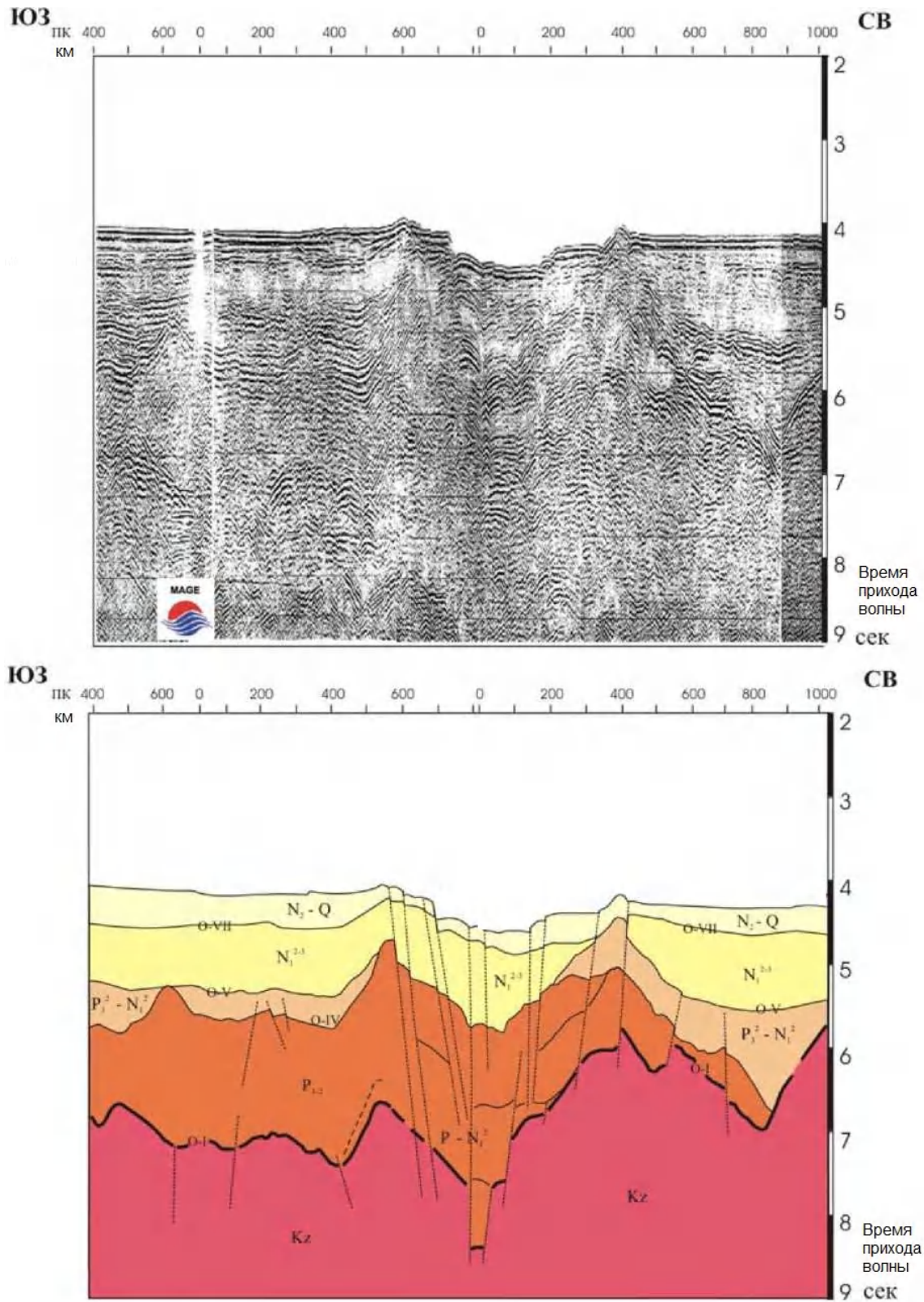


Рис. 1.18. Схема интерпретации сейсмического профиля 90700 в крест простирания хребта Гаккеля (по А.Ф. Драчеву, 1999).

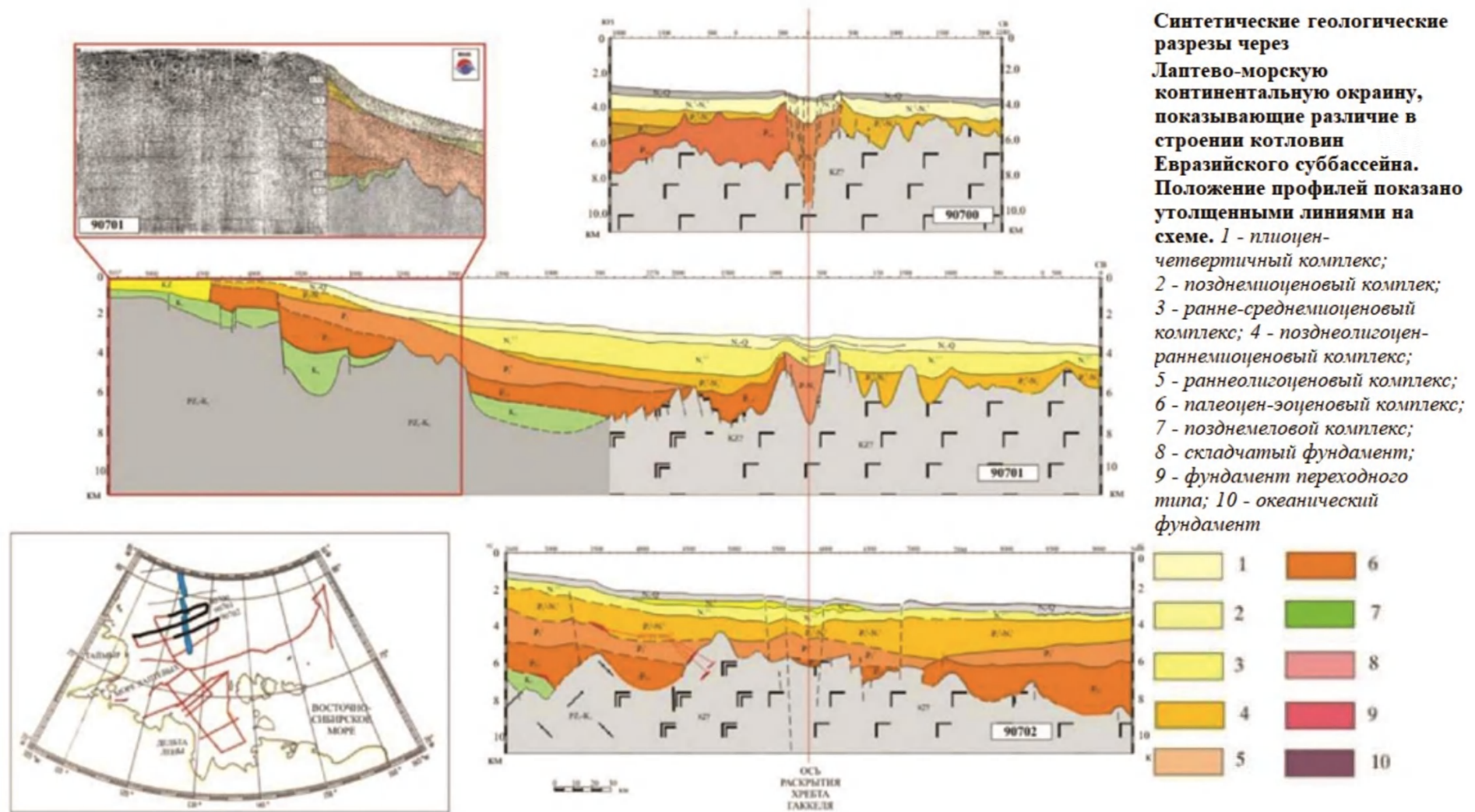


Рис. 1.19. Синтетические геологические разрезы через хребет Гаккеля (по А.Ф. Драчеву, 2000).

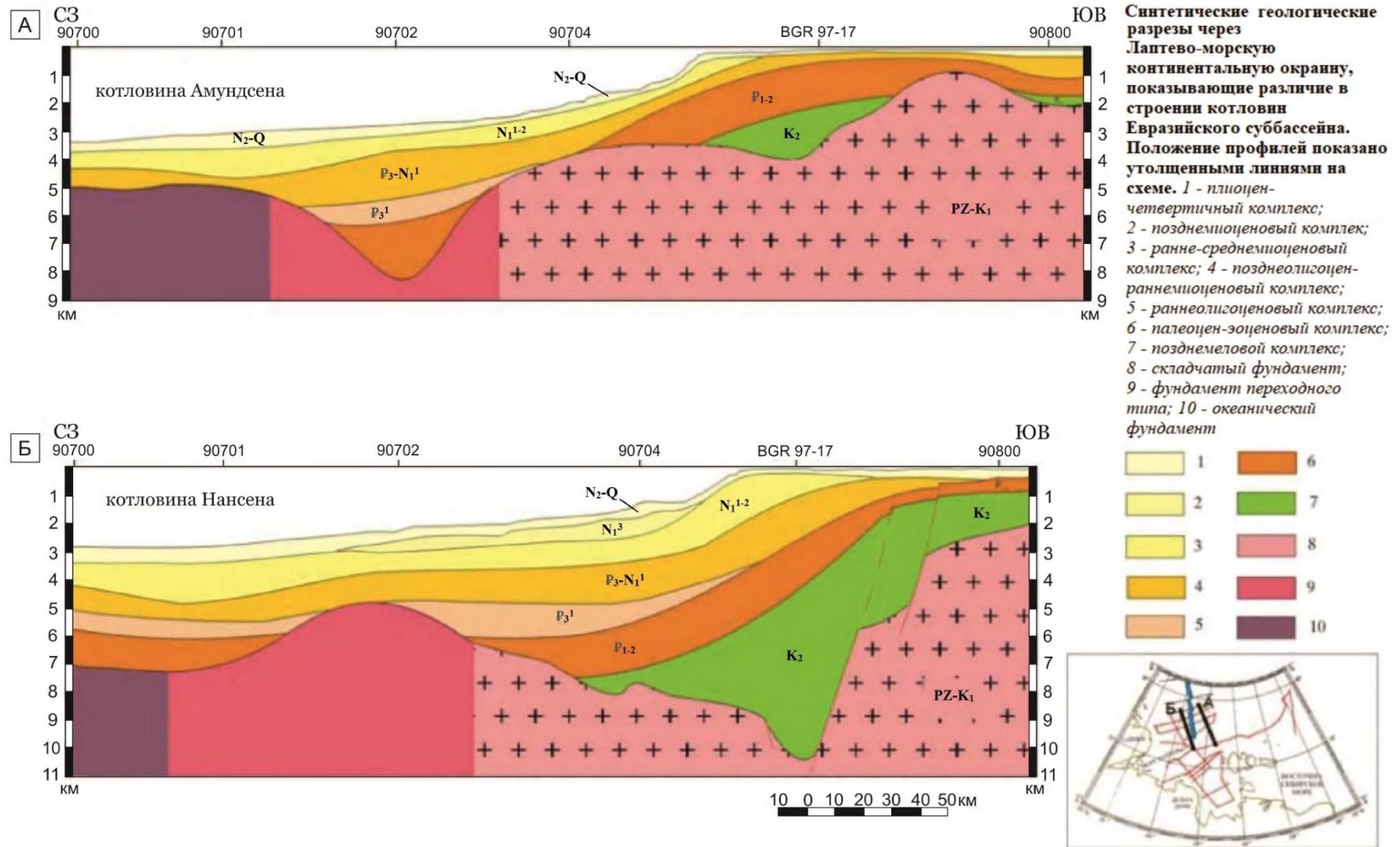


Рис. 1.20. Синтетические геологические разрезы через Лаптевоморскую континентальную окраину (по А.Ф. Драчеву, 2000): А – через котловину Амундсена, Б – через котловину Нансена.

Мощность осадочного чехла на шельфе моря Лаптевых составляет не менее 1–2 км по данным сейморазведки и сейсмоакустики. Пример строения осадочного чехла в северной части шельфа представлен на рисунке 1.20. Двухкилометровая толща осадков представлена позднемеловым, палеоцен-эоценовым, позднеолигоцен-раннемиоценовым, ранне-среднемиоценовым, плиоцен-четвертичным комплексами.

По результатам исследований С.С. Драчева и др. (2001) составлены сейсмогеологические разрезы Восточно-Сибирского бассейна, рисунок 1.21 иллюстрирует структуру и сеймостратиграфию западной части шельфа Восточно-Сибирского моря (положение разреза приведено на карте-врезке).

Однако, проблема возраста сейсмокомплексов при отсутствии буровых скважин на шельфе Восточно-Сибирского моря не может быть решена сколько-нибудь однозначно.

Предварительная оценка может быть дана путем корреляции сейсмических горизонтов с региональными несогласиями, известными в циркумарктической области. К таковым относятся несогласия между нижним и верхним мелом, на уровнях маастрихта и верхнего палеоцена, на границе эоцена и олигоцена, которые мы сопоставляем с подошвой ВС-2, горизонтом II, горизонтом III и горизонтом IV соответственно (рис.1.22). Сеноман-туронские отложения о. Новая Сибирь могут быть рассмотрены как вероятные аналоги ВС-2, эоценовая анжуйская свита и олигоцен-нижнемиоценовая нерпичинская толща о. Фаддеевского — как аналоги ВС-5 и ВС-6. Верхи последнего, возможно, включают морские отложения канарчакской толщи (верхний плиоцен-нижний плейстоцен).

1.4.4. Субмаринная криолитозона

В пределах Баренцева моря субмаринная криолитозона в основном представлена охлажденными породами. Многолетнемерзлые породы вскрыты в юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море). По данным (Мельников, Спесивцев, 1995), на Варандейском месторождении кровля многолетнемерзлых была обнаружена на глубине 63,2 м при глубине акватории 15,5 м. Скважина прошла по мерзлым породам до глубины 109,5 м и не достигла их подошвы. На месторождении Приразломное наблюдалось переслаивание мерзлого песка и суглинка с массивной криотекстурой в скв. 384 на глубинах 23,5–25,7 при глубине акватории 21 м (Жигарев, 1997). Полученные данные, по мнению Жигарева, свидетельствуют о существовании отдельных массивов и линз многолетнемерзлых пород, приуроченных к пескам, на акватории Печорского моря.

В береговой зоне Печорского моря многолетнемерзлые породы уходят вертикально вниз. Мощность многолетнемерзлых пород на берегу бухты Варнек составляет 130 м (Жигарев, 1997).

В пределах наибольшей части акватории Карского моря распространены охлажденные породы. На дне Обской, Гыданской, Юрацкой губ также зафиксированы охлажденные породы (Трофимов и др., 1980).

Субмаринные многолетнемерзлые породы на западно-ямальском шельфе известны в пределах Харасавэйского (рис. 1.22) и Русановского месторождений. В районе Харасавэйского месторождения (мыс Бурунный, о-ва Шараповы Кошки) субмаринная криолитозона изучалась в прибрежной зоне с глубинами до 11–12 м путем бурения скважин глубиной 15–30 м.

На Харасавэйском мелководье, данные по которому обобщены в работах (Григорьев, 1987) и (Мельников, Спесивцев, 1995), выделяется несколько областей, отличающихся с геокриологической точки зрения: аккумулятивные образования преимущественно песчаных пляжей, кос и баров; участки побережья

вблизи стабильных берегов; участки побережья вблизи берегов, подвергающихся термоабразии.

В пределах аккумулятивных образований, верхняя часть которых возвышается над уровнем моря (гребни кос и баров, верхняя часть пляжа), в настоящее время происходит новообразование мерзлых пород путем промерзания сверху эпикриогенным способом. В песчаных грунтах миграция влаги к фронту промерзания не происходит, поэтому поровые воды отжимаются по мере промерзания вниз. Это приводит к тому, что на определенной глубине температура их кристаллизации (температура фазового перехода, температура замерзания) становится ниже, чем среднегодовые температуры пород, и в песчаных отложениях образуются линзы высокоминерализованных вод–криопэггов (рис.1.23). Этому процессу могут способствовать неоднородности состава отложений, например, более супесчаные или суглинистые прослой, работающие как локальные водоупоры. Мощность линз криопэггов составила 0,5–3 м, мерзлые породы, разделяющие их, имели массивные криогенные текстуры и твердомерзлое состояние. Таким образом, даже в пределах верхних горизонтов наблюдается криогенная слоистость в породах криолитозоны.

Участки побережья вблизи стабильных берегов, т.е. не подверженных интенсивной термоабразии и не отступающих с большой скоростью, обычно связаны с аккумулятивными берегами, где сформированы пляжи. Пример мерзлотно-геологического профиля, пройденного севернее пос. Харасавэй (рис.1.24).

Кровля мерзлых толщ, расположенная на суше непосредственно под сезонно-талым слоем, при переходе в субмаринные условия круто погружается вниз, как только глубина воды становится больше мощности морского льда. Обычно это связывается с тем, что у стабильных берегов море длительное время располагается на одном месте (порядка 4–5 тыс. лет), имеет на мелководье положительную среднегодовую температуру воды и за это время толща мерзлых пород имеет возможность протаять полностью или на большую глубину.

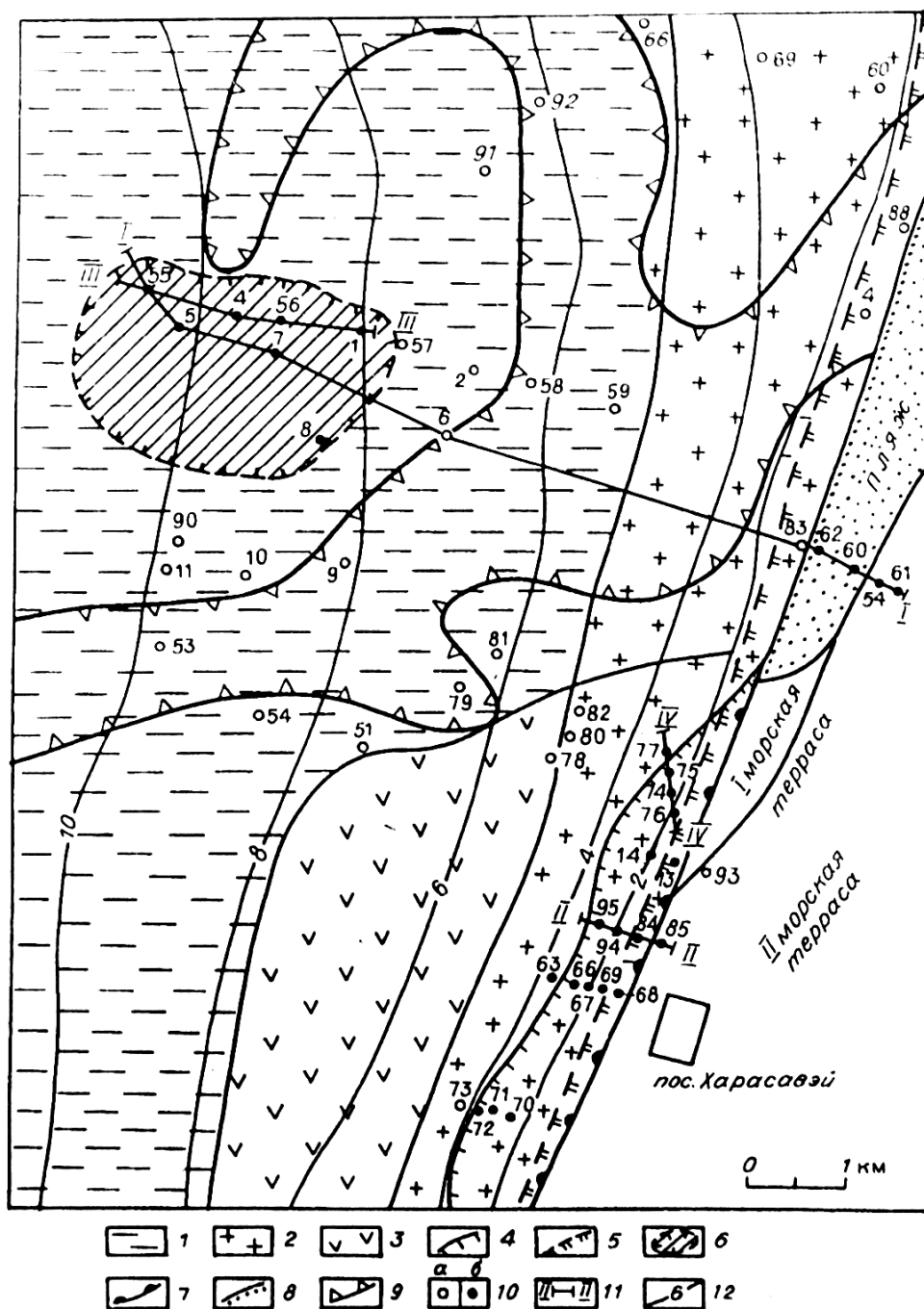


Рис. 1.23. Карта-схема криолитозоны Харасавэйского мелководья (по В.П. Мельникову и В.И. Спасивцеву, 1995).

Условные обозначения: 1 – многолетнеохлажденные породы с островами реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью более 50 м, находящиеся в стационарном состоянии; 2 – нестационарная криолитозона с ММП у абразионных берегов мощностью до 200 м и температурой $-4...-5^{\circ}\text{C}$; 3 – зона деградированных ММП абразионного типа, перешедших в многолетнеохлажденное стационарное состояние; 4 – границы ММП абразионного типа; 5 – границы сезоннопромерзающих пород на отмели; 6 – границы реликтовых ММП; 7 – абразионные и 8 – стабильные берега; 9 – границы палеодолины; 10 – скважины и их номер (а – не вскрывшие ММП, б – вскрывшие ММП); 11 – линии геокриологических профилей и их номер; 12 – изобаты, м

Температурное поле пород вблизи берега при этом характеризуется субвертикальным положением изотерм, а их температура под морем обычно имеет безградиентное распределение по глубине. Само же значение температуры, по крайней мере в приповерхностных горизонтах отложений, близко к среднегодовым значениям температуры воды, т.е. составляет от -1 до $-1,8^{\circ}\text{C}$.

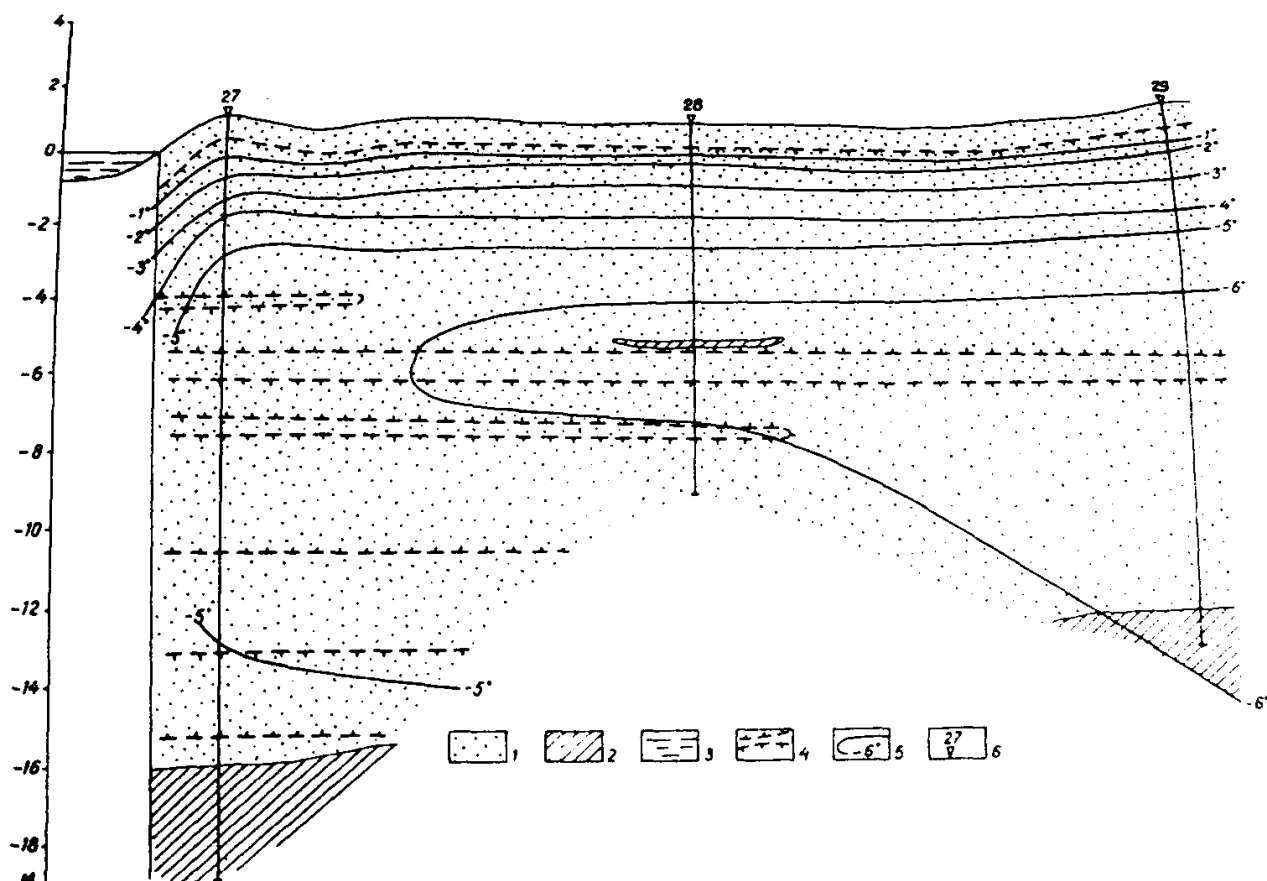


Рис. 1.24. Мерзлотно-геологический профиль через пляжевые отложения в районе мыса Бурунного (по Н.Ф. Григорьеву, 1987).

1 – песок, 2 – суглинок, 3 – морская вода, 4 – прослой отрицательно-температурных (охлажденных) пород, 5 – изотермы, 6 – местоположение и номера скважин

Совершенно иная ситуация наблюдается вблизи термоабразионных берегов, где за счет интенсивной термоабразии береговая линия смещается в сторону суши со скоростью от 1 до 2–3 м/год (Григорьев, 1987; Васильев и др., 2006). Здесь кровля мерзлых пород залегает под небольшим углом, бóльшим, чем уклоны дна, и по мере удаления от берега погружается на все большую глубину. Такая картина

известна на западном побережье п-ва Ямал вблизи пос. Харасавэй (рис. 1.24), аналогичная ситуация описана для побережья моря Лаптевых на разных его участках (Куницкий; 1989; Слагода, 2004).

Поведение кровли мерзлых толщ объясняется в данном случае временем нахождения того или иного участка дна под водой. По мере удаления от берега время нахождения мерзлых пород под морем увеличивается, и, соответственно, увеличивается глубина их протаивания сверху в области существования положительно температурных морских вод.

В зависимости от состава и льдистости прибрежных мерзлых пород, температуры воды и скорости отступления берега уклон кровли мерзлых пород может меняться. В случае относительно ровной поверхности кровли мерзлых пород, зная скорость термоабразии и глубину залегания кровли на каком-то расстоянии от берега, можно приблизительно оценить среднегодовую скорость протаивания мерзлых пород сверху.

Например, для участка берега в районе пос. Харасавэй (рис. 1.25) расстояние от береговой линии до скважины №95 составляет около 275 м, а глубина протаивания в точке бурения скважины составила около 4,5 м (от поверхности воды). При скорости термоабразии 3 м/год данная точка перешла в субмаринный режим около 92 лет назад, значит, среднегодовая скорость протаивания составляет около 5 см/год. При этом необходимо помнить, что это именно среднегодовая скорость, т.к. при малых глубинах воды скорость протаивания будет выше, а по мере накопления оттаявшего слоя и уменьшения температурного градиента в его толще скорость будет уменьшаться.

По мере удаления от берега кровля мерзлых толщ или погружается (вблизи термоабразионных берегов), или не фиксируется по скважинам. Исходя из этого многими исследователями делается вывод, что на расстоянии первых десятков километров от берега мерзлые породы должны исчезать (Жигарев, 1997). Однако, как показывают крайне немногочисленные фактические данные, распространение и залегание мерзлых пород имеет более сложный характер.

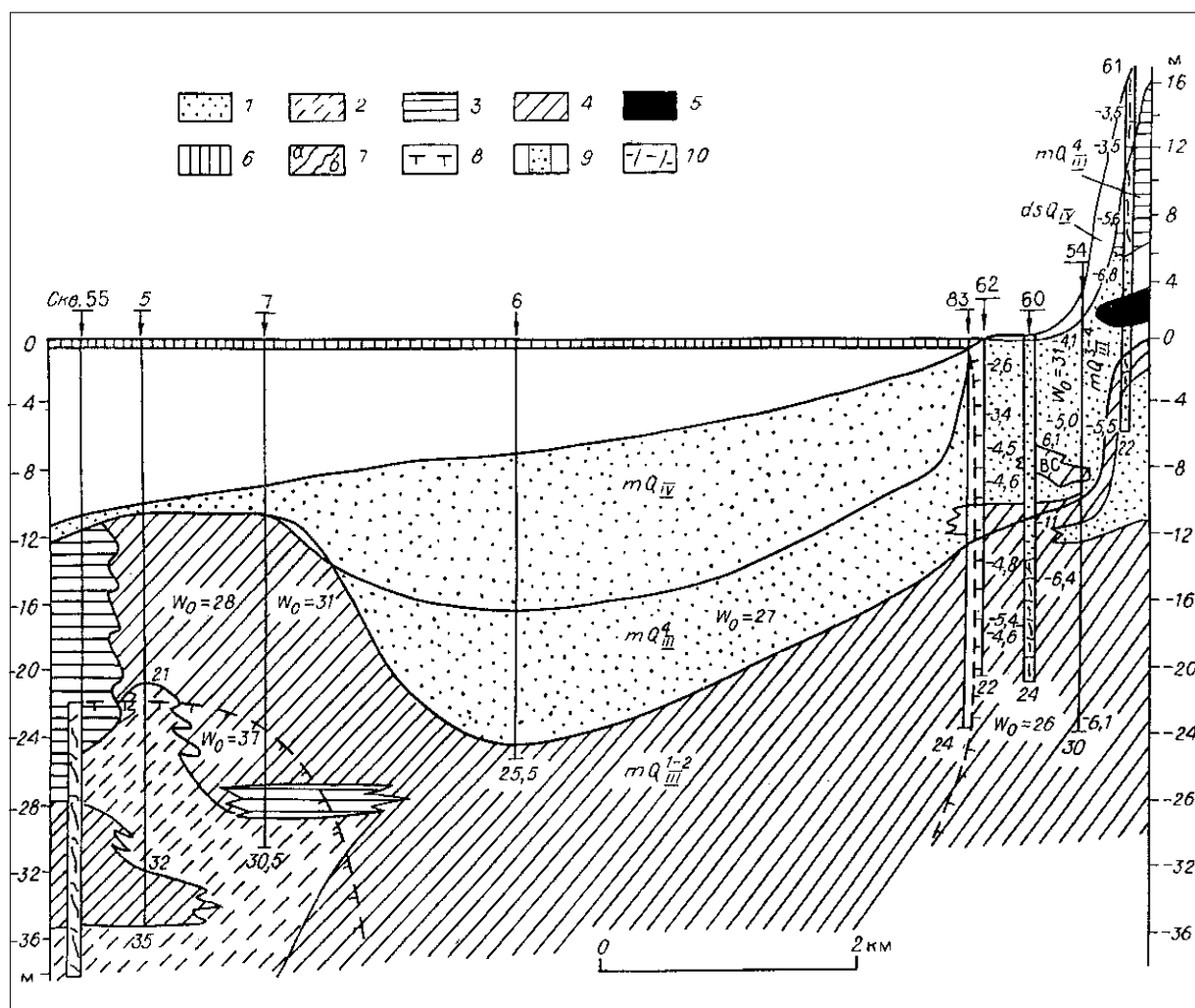


Рис.1.25. Мерзлотно-геологический профиль у стабильного берега, пройденный в 5 км севернее пос. Харасавэй (по В.П. Мельникову и В.И. Спесивцеву, 1995).

1 – песок, 2 – супесь, 3 – глина, 4 – суглинок, 5 – пластовый лед, 6 – морской лед, 7 – границы (а – возрастные, б – литологические), 8 – граница ММП, 9 – массивная криотекстура, 10 – крупношлуровая

Так, в пределах Харасавэйского мелководья на расстоянии около 5 км от берега, на траверзе стабильного берега, были вскрыты реликтовые мерзлые породы скважинами №55, №5 и №7 (рис. 1.23). Кровля их расположена на глубине около 22 м, по составу это супеси и суглинки. Анализируя приводимый мерзлотно-геологический разрез, можно предположить, что заглубление кровли мерзлых пород между скважинами №83 и №7 связано с длительным существованием на этом участке побережья лагуны, положение которой маркируется линзами песков mQIII4 и mQIV. Со временем внешний край лагуны был размыв, но мерзлые породы под ним сохранились в реликтовом виде.

На больших глубинах мерзлые породы были вскрыты в скважинах № 206, №253 и №254 в районе Русановского месторождения. Скважина №206 расположена в юго-восточной части Русановской площадки на глубине моря 81 м. Верхние горизонты скважины до глубины 51 м представлены тонкослоистыми глинистыми алевритами, в которых в интервале 17,2-17,3 м в отложениях наблюдается вертикальная и горизонтальность отдельность, тугопластичная консистенция. Из этого горизонта «... при извлечении керна из бурового снаряда выпали 2 куска чистого прозрачного пресного льда размером $3 \times 5 \times 1-2$ см, который является, по-видимому, текстурообразующим» (Литостратиграфическое изучение опорных ..., 1992). Больше в керне скважины лед не был обнаружен. По мнению В.П. Мельникова и В.И. Спесивцева, мерзлые породы в этой скважине начинаются с глубины 9,5 м и имеют тугопластичную консистенцию, а с примерно 20 м — твердомерзлую (по данным статического зондирования). Однако по первичному описанию керна скважины на глубине 20 м глинистые алевриты сменяются алевритами с песчаными прослоями, и кровля «твердомерзлых пород» может иметь чисто литологическое обоснование, а породы выше находятся в охлажденном состоянии. В самом керне лед не обнаружен, за исключением вышеупомянутых двух кусков.

Наиболее глубоководные мерзлые породы описаны в скважинах №253 (рис. 1.26) и №254, отстоящих друг от друга на 600 м, и пробуренных на участке Русановского месторождения при глубине моря 114 м. Интересной ее особенностью является вскрытие льдонасыщенных пород мощностью более 10 м на столь больших глубинах шельфа. Верхняя часть разреза представлена переслаивающейся пачкой супесей, суглинков и песков, находящихся в охлажденном состоянии при температуре $-1,6^{\circ}\text{C}$. В интервале глубин 13,5–19 м вскрыто ледяное тело, состоящее из слоев чистого пресного льда и слоев мерзлого суглинка, подстилающееся суглинком с мощными вертикальными ледяными шлирами общей мощностью 4,7 м. Ниже аналогичный суглинок, но с массивной криогенной текстурой, прослеживается еще на 8,8 м, а ниже в скважине до

глубины 50 м вскрыты тугопластичные глины, супеси и суглинки без видимых включений льда.

Таким образом, в скважине №253 в интервале 13,5–32,5 м вскрыты достоверно мерзлые породы общей мощностью 19 м, а ниже – еще 17,5 м предположительно пластично-мерзлых пород. В скважине №254 сходные, но менее льдистые глины и суглинки (без прослоев чистого льда) вскрыты в интервале 8,4–18,5 м (мощность 10,1 м), т.е. еще ближе к поверхности. Данные по засоленности отложений мерзлой части разреза не приводятся, можно только предполагать, что эти отложения имеют незначительное засоление. Судя по всему, отложения представляют собой толщу ледово- или ледниково-морских отложений, но могут являться и фрагментом изначально-мерзлой морены, сформированной в первой половине позднего неоплейстоцена (Павлидис и др., 1998). Сохранение в субмаринных условиях описанной пачки мерзлых отложений и льдов может объясняться совокупностью нескольких причин. С одной стороны, их сохранение вблизи поверхности дна возможно только при быстром затоплении мерзлых толщ и переходе температуры донных осадков в отрицательные значения. Это как раз характерно для относительно глубоководных участков шельфа, где скорости трансгрессии на начальных этапах были велики. С другой стороны, в условиях охлажденной криолитозоны уничтожение мерзлых пород возможно сверху только за счет миграции солей солёностной деградации), которая при высокой льдистости отложений и присутствии прослоев чистого льда протекает весьма медленно (Баду, 1974).

Работы автора показали, что в районе перехода газопровода Бованенково-Ухта через Байдарацкую губу Карского моря многолетнемерзлые породы имеют ограниченное распространение на акватории. В результате инженерно-геологического бурения с припайного льда и геофизических исследований на акватории было установлено, что в районе Уральского берега перехода мерзлые породы распространяются в сторону акватории на небольшие расстояния 10–50 м и далее обрываются с характерной вертикальной границей (рис. 1.27).

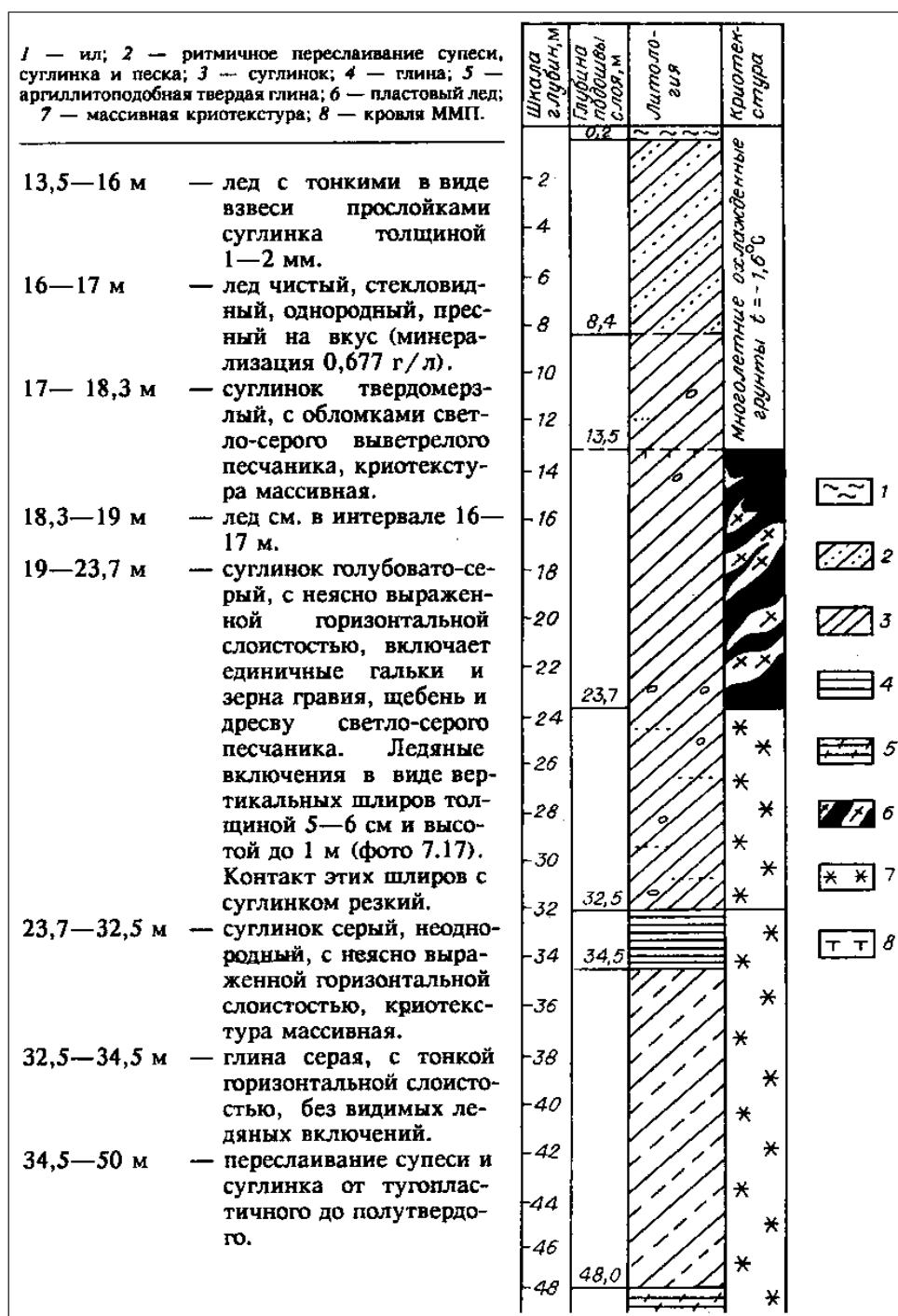


Рис. 1.26. Колонка скважины №253 и ее описание (по В.П. Мельникову и В.И. Спасивцеву, 1995). 1—ил, 2—ритмичное переслаивание супеси, суглинка и песка, 3—суглинок, 4—глина, 5—аргилитоподобная твердая глина, 6—пластовый лед, 7—массивная криотекстура, 8—кровля ММП

Совершенно иная картина наблюдается на Ямальском берегу перехода. Здесь мерзлые породы имеют форму козырька (рис. 1.28) мощностью от 2 до 10 м и распространяются на акваторию на сотни метров (Выполнение инженерно-геологических...ООО «МГУ-геофизика», 2010).

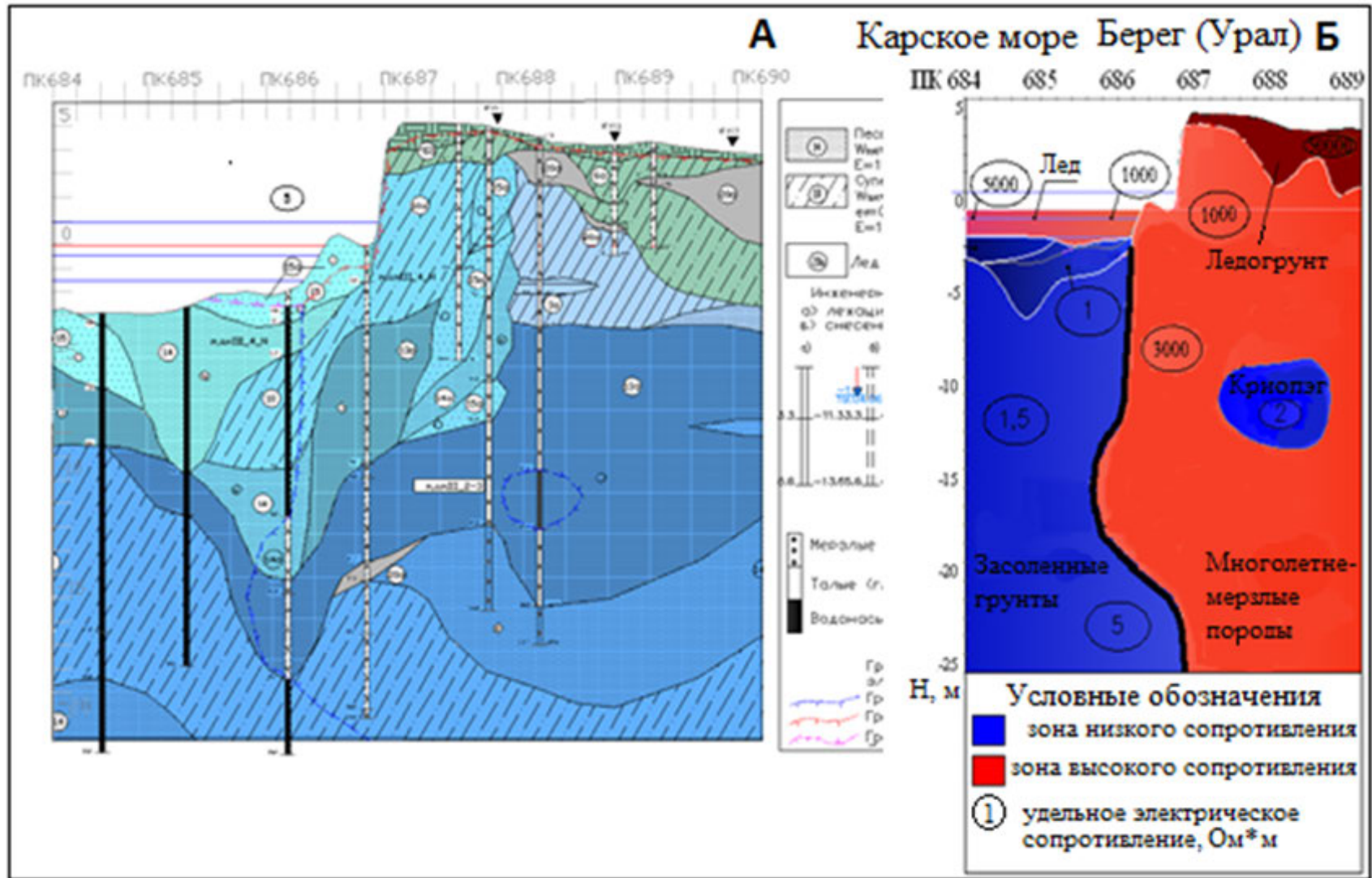


Рис. 1.27. Сравнение результатов инженерно-геологического бурения и геофизических исследований. А – Результаты инженерно-геологического бурения и Б – геофизических исследований на Уральском берегу перехода газопроводом Бованенково–Ухта через Байдарацкую губу. Работы автора.

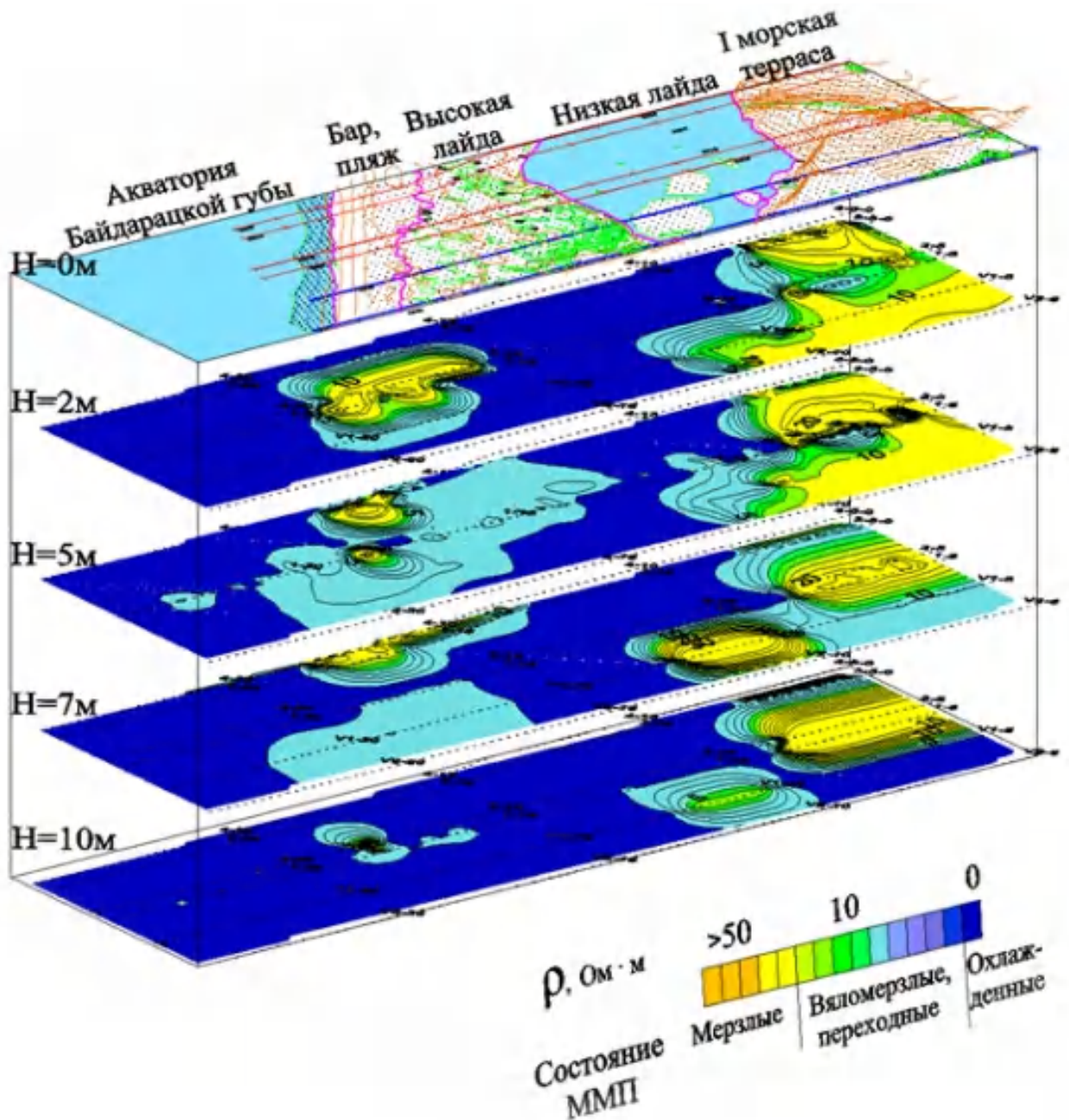


Рис. 1.28. Результаты инженерно-геологического бурения, термометрии и геофизических исследований на Ямальском береговом участке. Работы автора.

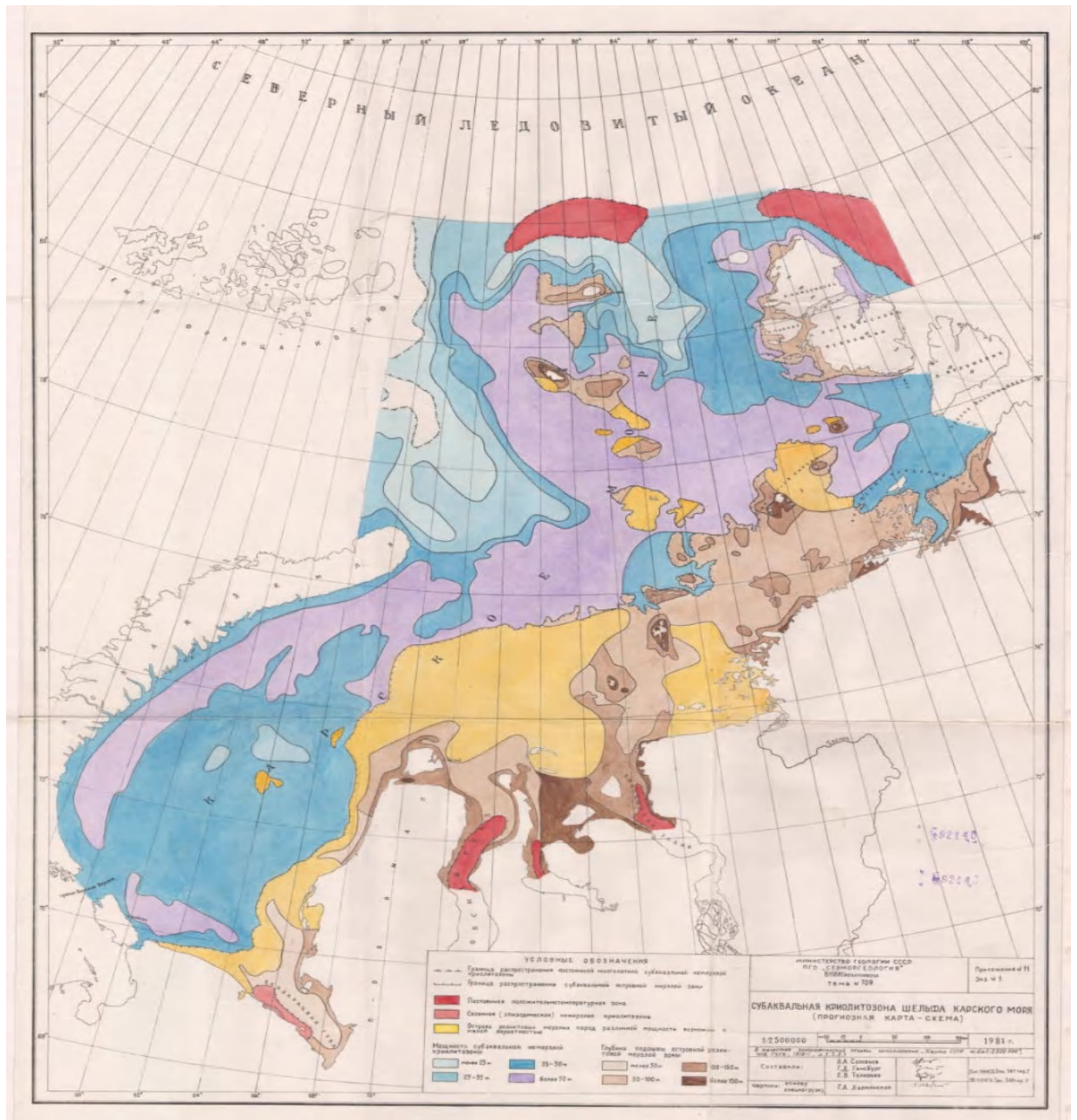
Имеющиеся фактические данные, приведенные выше, и теоретические представления позволяют предполагать, что в настоящее время на шельфе Карского моря толща мерзлых пород имеет островное распространение и находится в деградирующем состоянии (Данилов и др., 1998). Однако характер ее распространения остается до настоящего времени совершенно не исследованным.

А.Л. Чеховским (Чеховский, 1972) в пределах шельфа Карского моря выделено две зоны: *субокеаническая*, с глубинами моря 20–200 м, где в зырянскую эпоху (холодный период в первой половине позднего неоплейстоцена) формировались мерзлые породы мощностью 600–650 м, протаявшие впоследствии снизу на 500 м, причем сохранившиеся 100–150 м залегают, согласно представлениям А.Л. Чеховского непосредственно вблизи дна, и *субконтинентальная* — с глубинами моря до 20 м, где в результате влияния Обь-Енисейского течения с температурами $+0,3^{\circ}\text{C}$... $+0,5^{\circ}\text{C}$ маломощные мерзлые породы сохранились лишь на большой глубине. Принципиально такой же точки зрения придерживается Ф.Э. Арэ (Арэ, 1976), по мнению которого мерзлые породы быть встречены в тех районах шельфа, которые представляли собой сушу в последнее геологическое время.

Противоположной точки зрения придерживается В.А. Соловьев, который считает, что распространение мерзлых пород в арктических морях крайне ограничено и возможно только в узкой полосе вдоль побережья (Соловьев и др., 1981). Прогнозная карта криолитозоны шельфа Карского моря приведена на Рис. 1.29.

Более современные карты распространения мерзлых толщ (Рокос и др., 2009; Рекант, Васильев, 2011; и др.) обычно отражают только границы их предполагаемого распространения (рис. 1.30).

Мощности образовавшейся к концу сартанского похолодания криолитозоны возможно оценить по результатам математического моделирования. Одной из последних работ, посвященных математическому моделированию криолитозоны на шельфе Карского моря, является работа А. Портнова (Portnov et al., 2014). Не останавливаясь здесь на деталях палеогеографического сценария и математической основы модели, можно отметить, что в основу моделирования поставлено решение тепловой задачи Стефана, граничные условия учитывали изменение среднегодовой температуры воздуха и воды, а также колебания уровня моря (рис. 1.31).



Условные обозначения

- — — Граница распространения постоянной многолетней субаквальной немерзлой криолитозоны
 - Граница распространения субаквальной островной мерзлой зоны
 - Постоянная положительнотемпературная зона
 - Сезонная (эпизодическая) немерзлая криолитозона
 - Острова реликтовых мерзлых пород различной мощности возможны с малой вероятностью
- Мощность субаквальной немерзлой криолитозоны**
 ■ менее 25 м ■ 35 - 50 м
 ■ 25 - 35 м ■ более 50 м
- Глубина подошвы островной реликтовой мерзлой зоны**
 ■ менее 50 м ■ 100 - 150 м
 ■ 50 - 100 м ■ более 150 м

Рис. 1.29. Прогнозная карта-схема криолитозоны Карского моря (по В.А.Соловьеву и др., 1981)

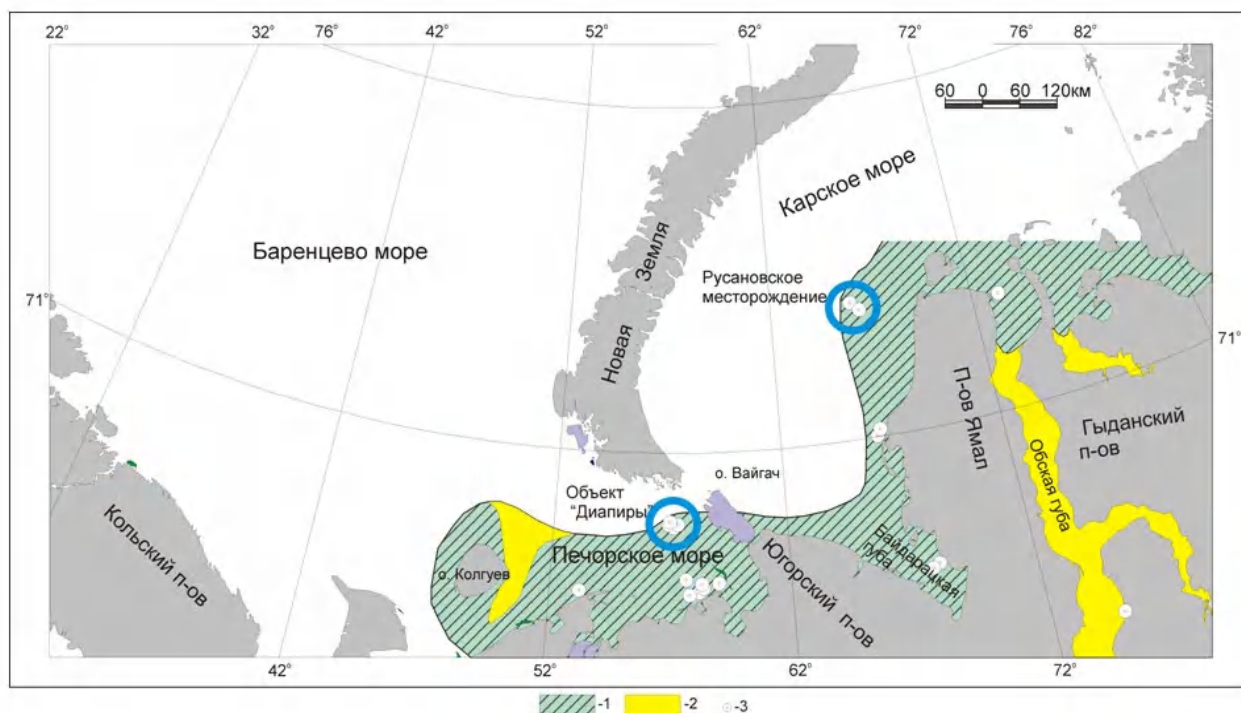


Рис. 1.30. Область распространения многолетнемерзлых пород на шельфе Баренцева и Карского морей (по С.И. Рокосу и др., 2009).

1 – Область распространения многолетнемерзлых пород; 2 – талики; 3 – инженерно-геологические скважины, вскрывшие многолетнемерзлые породы

Существенным недостатком модели является, исходя из ее описания, упрощенное геологическое строение моделируемого разреза, состоящего из одного слоя с неизменными теплофизическими свойствами.

С учетом вариабельности граничных условий было рассчитано несколько вариантов эволюции криолитозоны на шельфе западного Ямала. Крайние результаты – наиболее и наименее благоприятные для развития криолитозоны приведены на рисунке 1.31 b и c.

Согласно полученным результатам, мощности криолитозоны вблизи современной береговой линии перед началом постледниковой трансгрессии могли составлять от 250–300 до почти 400 м, а распространение мерзлых пород было сплошное до современных изобат около 110 м.

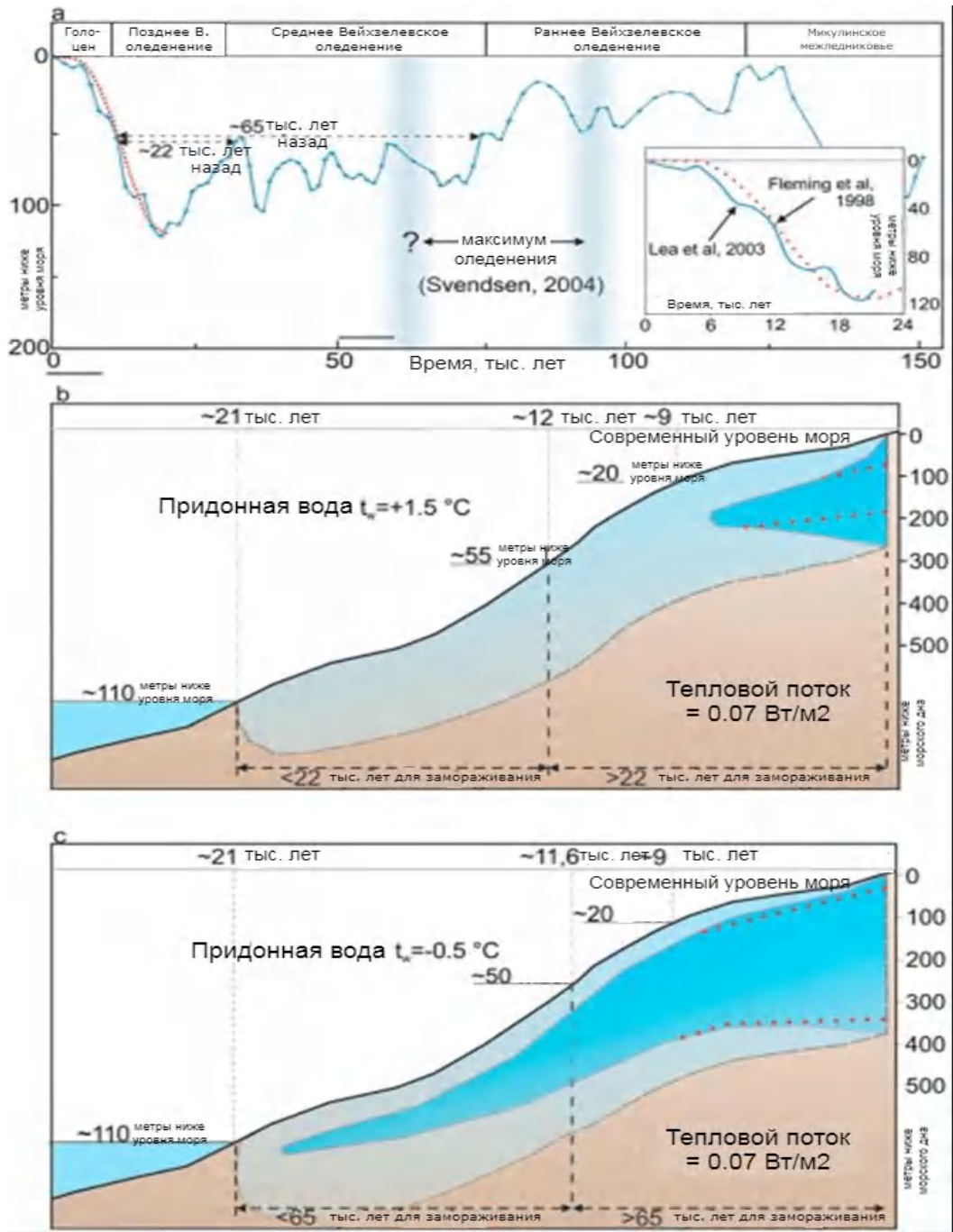


Рис. 1.31. Колебания уровня моря (а) и результаты моделирования динамики мощности криолитозоны (b и c) на шельфе западного Ямала (Portnov et al., 2014). *t_{bsl}* – метры ниже уровня моря; *ka*, *kur* – тыс. лет назад, *b* – результаты моделирования по наиболее неблагоприятному сценарию для формирования криолитозоны (высокие значения теплового потока, высокие температуры воды), *c* – результаты моделирования по наиболее благоприятному сценарию для формирования криолитозоны (низкие значения теплового потока, низкие температуры воды). Голубым цветом показано распространение и мощность криолитозоны на максимум регрессии (20-18 тыс. лет назад), синим – после окончания трансгрессии (современность). Красными точками показаны вероятные границы криолитозоны во время высокого стояния уровня моря около 5 тыс. лет назад

Мощность их вблизи береговой линии сартанского времени, согласно расчетам, могла составлять 100–200 м. В зависимости от граничных условий в ходе деградации мерзлых толщ предполагается, что мерзлые породы могли сохраниться в настоящее время либо в прибрежной части моря с глубинами менее 20 м (рис. 1.31 б), либо частично сохраниться до современных изобат почти 100 м, однако сильно сократившись по мощности (рис.1.31 с).

Исходя из результатов моделирования А. Портнов предположил, что на глубинах более 20 м реликтовые мерзлые толщи имеют островное и редкоостровное распространение (область discontinuous permafrost, рис. 1.32), с чем связывается формирование многочисленных каналов прорыва газов.

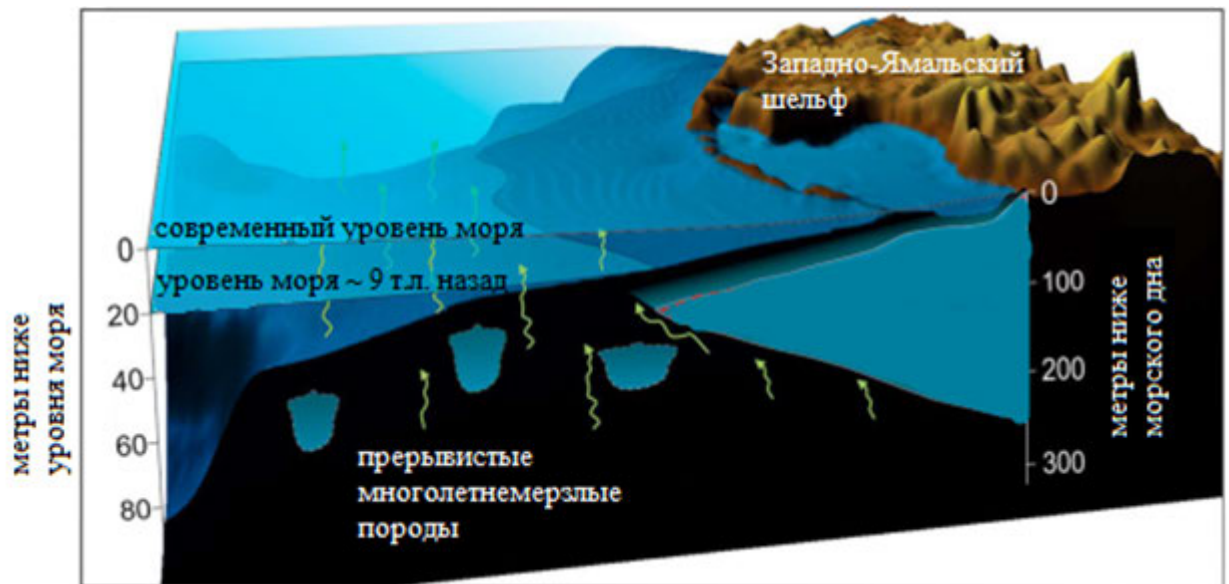


Рис. 1.32. Блок-схема строения субмаринной криолитозоны на шельфе к западу от п-ва Ямал по результатам математического моделирования (Portnov et al., 2014).

Суровость климата и небольшие глубины способствовали сохранению многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых. Наличие реликтовых многолетнемерзлых пород было отмечено В.М. Пономаревым в бухте Кожевникова. Скважина вскрыла многолетнемерзлые породы на глубине моря 3 м. Забой скважины находился на глубине 66 м, однако подошвы

многолетнемерзлых пород достичь не удалось. В Анабарском заливе наблюдалась аналогичная картина. При глубинах 3 и менее метров многолетнемерзлые породы были вскрыты скважиной на глубине 16 м от дна. На глубинах более 3 м мерзлые породы не были обнаружены (Жигарев, 1997).

Аналогичные данные были получены автором при бурении с припайного льда в бухте Нордвик (Выполнение инженерно-геокриологических..... ООО «МГУ-геофизика», 2017). На рисунке 1.33 приведено расположение бурового профиля в бухте Нордвик Хатангского залива.



— - Положение бурового профиля □ - Район работ

Рис.1.33. Расположение бурового профиля в бухте Нордвик.

Многолетнемерзлые породы были обнаружены бурением в трех скважинах – БН13-17, БН1-17, БН2-17 на удалении не более 4 км от берега. На скважинах, которые расположены мористее, многолетнемерзлые породы не были обнаружены до глубин 50 м (забой скв) при глубине акватории 5–7 м. По результатам геофизических исследований, заверенных буровыми работами,

многолетнемерзлые породы отсутствуют на большей части бухты Нордвик и в районе скважин БН2-17 – БН3-17 уходят вертикально вниз (рис. 1.34).

В заливе губы Буор-Хая на шельфе моря Лаптевых мерзлые породы были вскрыты несколькими скважинами на разных глубинах от 20 до 40 м в зависимости от места расположения и глубины акватории. В скважине 4D-12 были обнаружены на глубине 24,5 м от дна при глубине акватории 6 м (Кошурников и др., 2016).

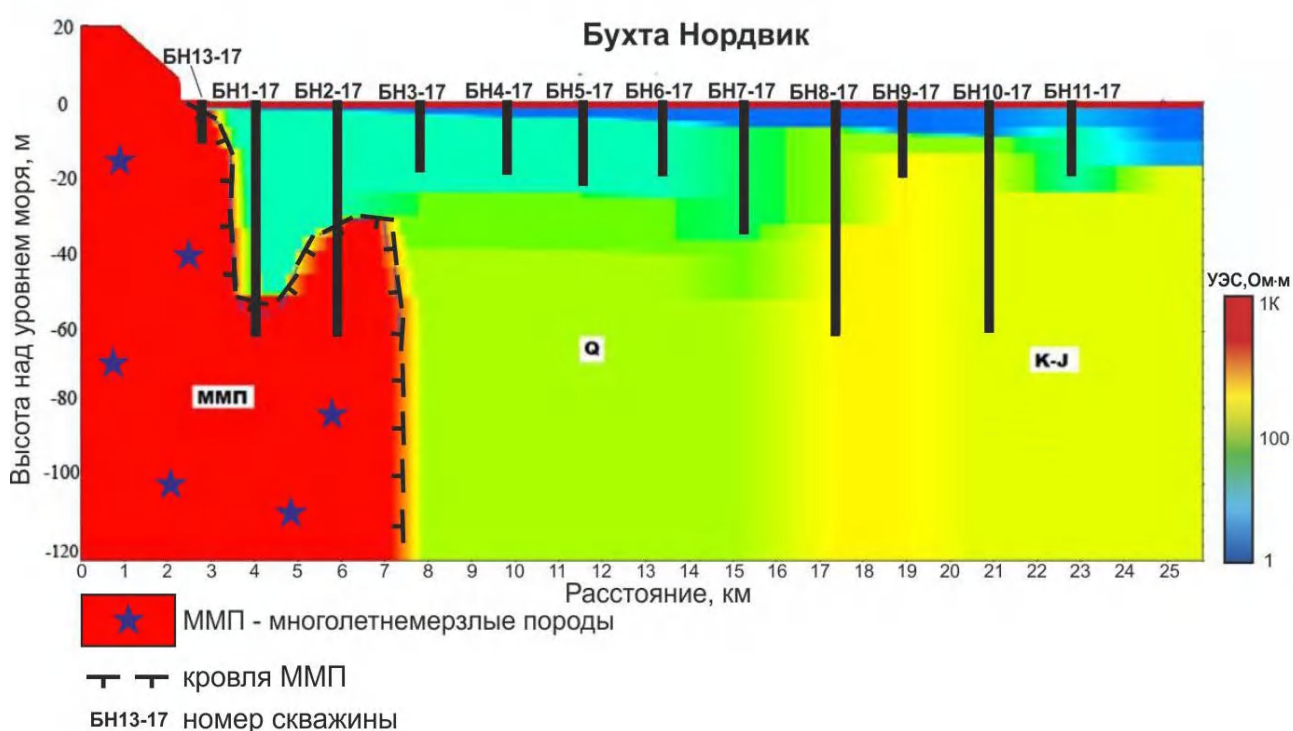


Рис. 1.34. Распространение многолетнемерзлых пород вдоль бурового профиля по геофизическим и буровым данным в бухте Нордвик. (Koshurnikov et al., 2020).

Своеобразным многолетним полигоном для изучения динамики многолетнемерзлых пород во времени на шельфе моря Лаптевых является геотраверс мыс Муостах п-ова Быковского – о. Муостах. Первые исследования были выполнены здесь Н.Ф. Григоревым и Е.Н. Молочушкиным в 1969 г. В работе (Shakhova et al., 2017) приводится современное обобщение всех данных по указанному геотраверсу (рис. 1.35). Автором в период 2012–2013 гг. выполнены

геофизические исследования на профиле мыс. Муостах – о. Муостах. На рисунке 1.36 показано положение кровли многолетнемерзлых пород на 2014 год. Геофизические данные заверены бурением на скважинах 4D-13, 2D-13, 4D-12 выполненным в 2012–2013 гг.

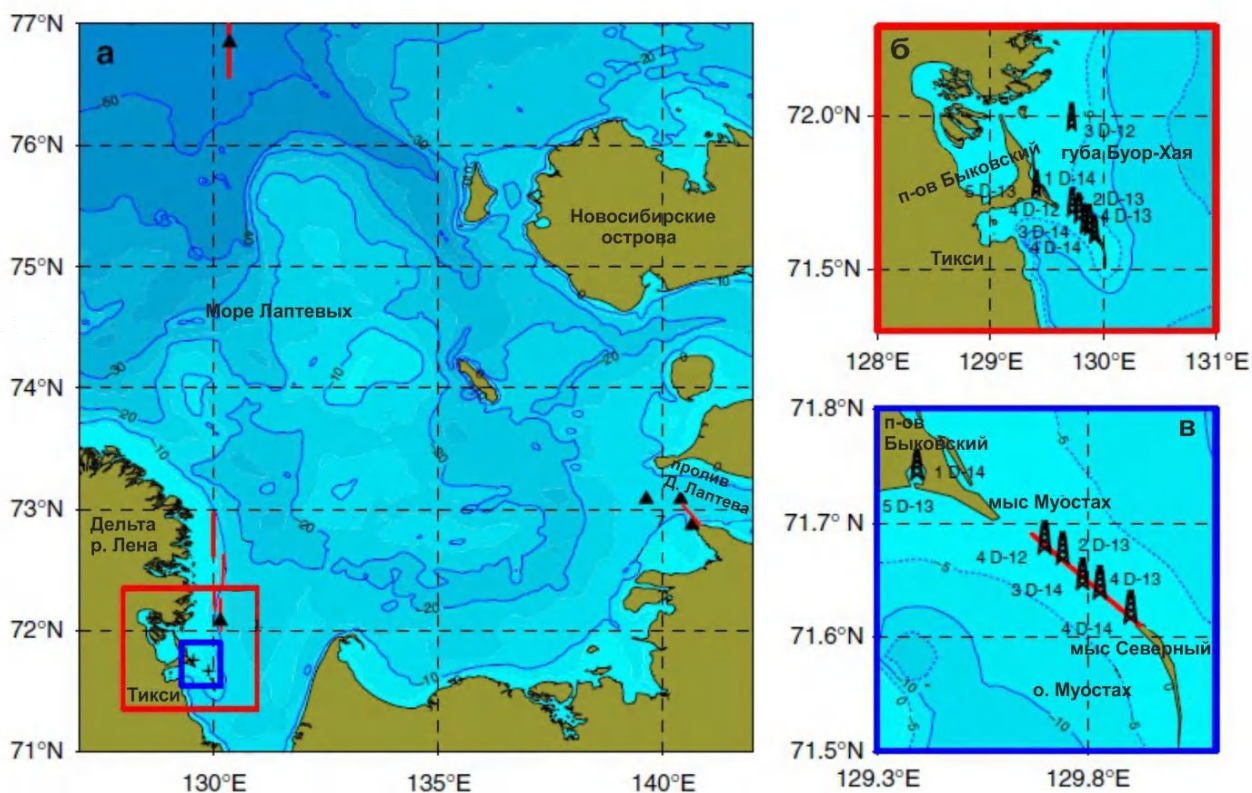


Рис. 1.35. Район работ в заливе губы Буор-Хая (Shakhova et al., 2017).

Многолетнемерзлые породы были обнаружены в Ванькиной губе мощностью до 150 м на глубинах акватории 0–1,7 м. Температуры на глубине нулевых годовых колебаний были установлены следующие: на коренном берегу губы -25°C при глубине 17 м, на уресе воды $-5,8^{\circ}\text{C}$ при глубине 11,5 м, на расстоянии 400 м от берега $+0,4^{\circ}\text{C}$ при глубине от дна 10 м. В устье Ванькиной губы, в районе песчаной банки, были обнаружены сильно льдистые ММП. Скважина вскрыла их кровлю на глубине 86 м и не достигла подошвы на глубине 100 м (Жигарев, 1997).

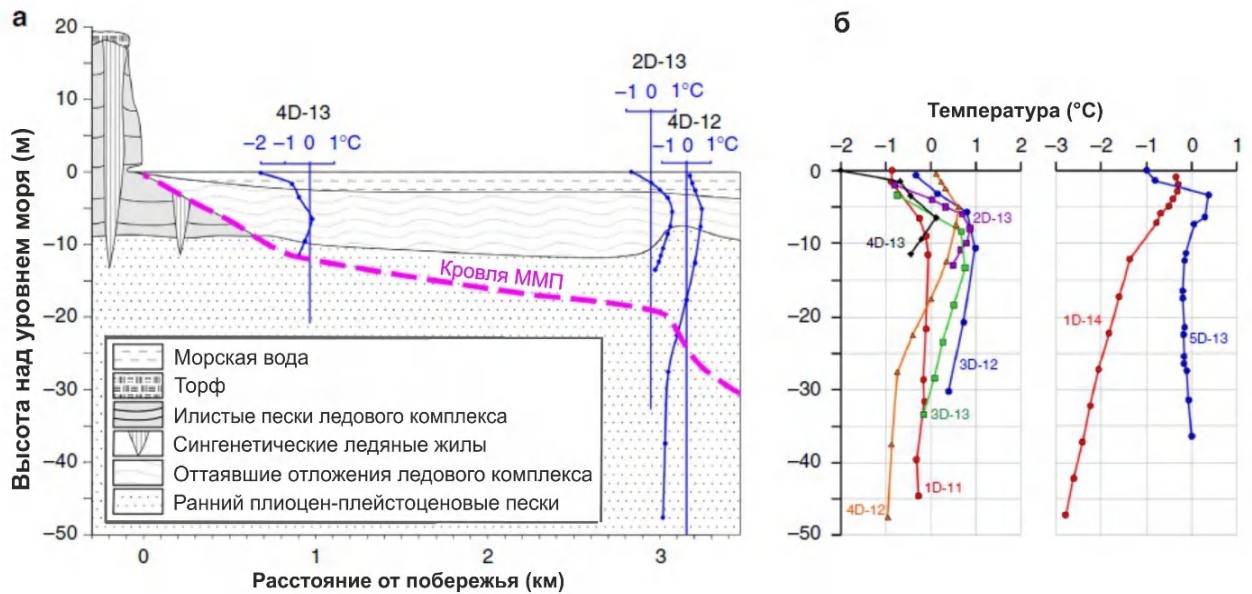


Рис. 1.36. Результаты: а – геофизических и буровых работ, б – термометрии на геотраверсе мыс Муостах – о. Муостах (Shakhova et al., 2017).

Считается, что реликтовые мерзлые толщи сохранились на месте недавно разрушенных о-вов Васильевский и Семеновский на шельфе моря Лаптевых. Сейчас на их месте остались песчаные банки с глубинами моря 0,5 м. В конце плейстоцена острова представляли единый огромный остров – «Земля Васема». Мощности многолетнемерзлых пород оцениваются в этом районе до 400 м (Жигарев, 1997).

Многочисленные результаты бурения на шельфе моря Лаптевых убеждают о широком распространении многолетнемерзлых пород на акватории. Небольшие глубины моря позволяют предполагать наличие реликтовых многолетнемерзлых пород практически на большей площади шельфа моря Лаптевых.

Вместе с тем на шельфе моря Лаптевых зафиксировано аномальное содержание метана в поверхностных и придонных водах (Shakhova et al., 2017), породах (Miller et al., 2016, 2017) и аномальные электрические проводимости пород шельфа в этих зонах (Charkin et al., 2017), что является индикатором субмаринных таликов, где мерзлые породы полностью деградировали и возможно движение газов сквозь толщу мерзлых пород. Вероятно, источником

этого метана являются ЗСГГ под многолетнемерзлыми толщами и ее деградация. Математическое моделирование мощности ММП и ЗСГГ было выполнено Н.Н.Романовским (Романовский и др., 2006).

Выводы.

Основные особенности субмаринной криолитозоны арктического шельфа следующие:

1. Западный сектор арктического шельфа (Баренцево и Карское моря) характеризуется преимущественным распространением охлажденных пород на шельфе. Исключением являются юго-восточная часть Баренцева моря (Печорское море) и прибрежные воды Карского моря. Здесь по геофизическим данным и результатам бурения зафиксированы многолетнемерзлые породы на глубинах от 0 до 80 м от дна при глубинах акватории до 0–100 м.

2. Восточный сектор арктического шельфа (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) характеризуется преимущественным распространением реликтовых многолетнемерзлых пород в силу суровости палеоклиматической и гидрологической обстановок и мелководностью бассейна. По многочисленным данным бурения и геофизических исследований мерзлые породы обнаружены на глубинах 0–30 м от дна при глубине акватории до 20 м. Необходимо также отметить, что несмотря на широкое распространение многолетнемерзлых пород на акватории, в разные годы и различными исследователями обнаружены сквозные таликовые зоны, часто коррелирующие с выбросами метана.

1.5. Выводы. Нерешенные проблемы. Задачи исследований

Арктический шельф изучается на протяжении нескольких веков. Криолитозона на шельфе арктических морей изучается более 100 лет, однако, проблемных вопросов, связанных с субмаринной криолитозоной, остается много. Сегодня нет однозначного мнения о границах распространения субмаринной криолитозоны, ее строении, сплошном или прерывистом ее распространении на

шельфе арктических морей. Неизвестна ее мощность, глубины кровли и подошвы. Неизвестно, в каком состоянии находятся мерзлые породы и породы их подстилающие.

Геофизические методы (сейсмические и сейсмоакустические) давно применяются для изучения тектонического строения шельфа, литологического расчленения осадочной толщи шельфа, поиска зон газонасыщения и залежей углеводородного сырья. Определение кровли многолетнемерзлых пород по данным сейсмоакустики не всегда информативно. Определение подошвы многолетнемерзлых пород по данным сейсмоакустики затруднительно.

Для ответа на эти проблемные вопросы автор поставил перед собой следующие задачи:

- выполнить анализ и обобщение данных о геокриологических условиях арктического шельфа;
- разработать методику комплексных геокриолого-геофизических исследований для изучения многолетнемерзлых толщ на шельфе;
- изучить строение и свойства многолетнемерзлых пород шельфа морей Российской Арктики;
- разработать модели теплового режима горных пород на шельфе;
- установить границы распространения и строение многолетнемерзлых толщ шельфа;
- определить условия формирования и динамику многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе;
- выполнить типизацию многолетнемерзлых пород арктического шельфа и составить схему их распространения.

Глава 2. Методика геолого-геофизических полевых исследований криолитозоны шельфа и результаты лабораторных исследований свойств пород

Методика геолого-геофизических исследований криолитозоны шельфа включает лабораторные испытания пород шельфа, электромагнитные исследования, подтверждение геофизических результатов бурением, термометрию в пробуренных на шельфе скважинах и тепловое моделирование на шельфе арктических морей (Основы..., 2020).

2.1. Методы лабораторных исследований

Актуальность выполнения лабораторных испытаний на образцах пород шельфа арктических морей объясняется с одной стороны необходимостью выбора геофизической технологии изучения субмаринной криолитозоны и с другой стороны потребностью в количественных характеристиках талых и мерзлых пород для выполнения математического моделирования (электромагнитного и теплового) применительно к району исследований. Такими характеристиками являются скорости продольных и поперечных волн талых и мерзлых пород для интерпретации данных сейсморазведки и сейсмоакустики, УЭС и поляризуемости талых и мерзлых пород шельфа арктических морей. Эти характеристики необходимы для достоверной интерпретации данных электроразведки. Результаты лабораторного определения плотности, теплопроводности и теплоемкости талых и мерзлых пород шельфа арктических морей применялись для решения тепловых задач.

Объектом лабораторных испытаний являлись породы естественного сложения, полученные при полевых инженерно-геологических изысканиях на переходе газопровода Бованенково-Ухта через Байдарацкую губу, Нярмейском лицензионном участке, Хатангском заливе, заливе губы Буор-Хая, Чаунской губе.

Электрические свойства

Для изучения электрических свойства пород были выбраны два метода электроразведки: резистивиметрия (разновидность метода сопротивлений) и метод вызванной поляризации.

При лабораторных испытаниях пород автором на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.), в заливе губы Буор-Хая на шельфе моря Лаптевых (2012 г.), в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015 г.), на приямальском шельфе в районе о. Белый на шельфе Карского моря (2015, 2017 гг.), пород в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых (2017 г.) использовался комплект аппаратуры «СПЕКТР» – (производитель ООО «Измерительные системы»), состоящий из Генератора («СПЕКТР-1Г») и измерителя («APL-02»), разработанному по техническому заданию автора (рис. 2.1).

Электроразведочный генератор «Спектр-1Г» предназначен для генерации токовых импульсов «меандр» различной частоты. Генератор применяется для работ методами ВЭЗ, ЧЗ, ВП.



Рис. 2.1. Аппаратурный комплекс «СПЕКТР». Генератор «Спектр-1Г» (а) и измеритель «APL-02» (б).

Заключение соответствия характеристикам в Приложении Д.

Частотный диапазон генератора «Спектр-1Г» и измерителя «APL-02» синхронизирован и составляет от 1,22 до 625 Гц. С помощью измерителя «APL-02» регистрировались значения амплитуд нечетных гармоник и фазовых параметров.

Для выполнения исследований были изготовлены резистивиметры – цилиндрические пластиковые формы определенных размеров: высота – 8,5 см, площадь поперечного сечения – 19,6 см² и объем – 166,8 см³). Измерения удельных электрических сопротивлений (УЭС) ρ и вызванной поляризации (ВП) η осуществлялись на низкочастотном (4,88 Гц) переменном токе. Установка – четырехэлектродная АМNB, представляла собой 4 электрода, вмонтированных в резистивиметры и обеспечивающая точечный контакт электродов с породой (рис. 2.2). Герметичность резистивиметров достигалась за счет промазывания краев установок герметиком в месте их соприкосновения с формой. Перед измерениями на породах шельфа была произведена калибровка резистивиметров (таблица 2.1). Она заключалась в определении их геометрических коэффициентов k с помощью измерений, выполнявшихся на растворах NaCl с заданной концентрацией.

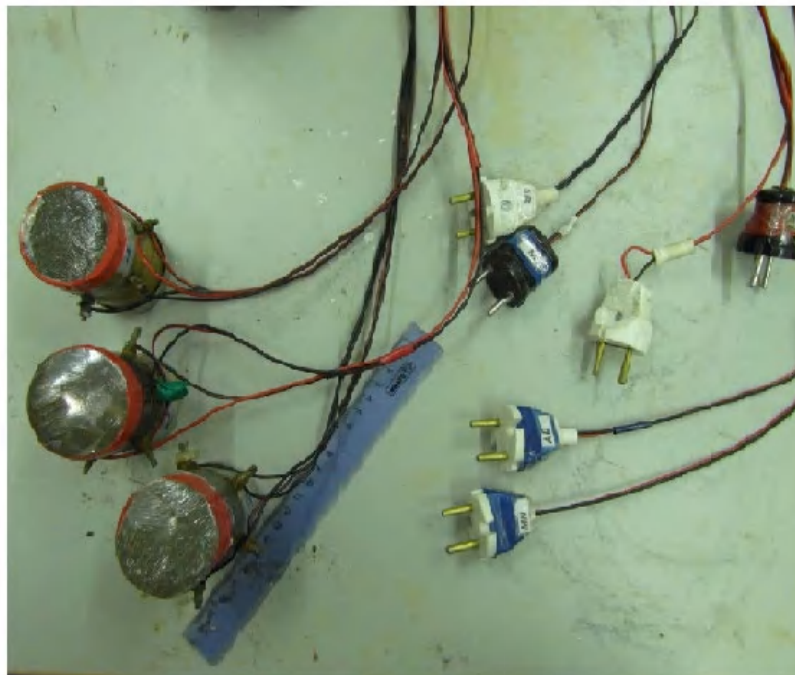


Рис. 2.2. Внешний вид исследуемых образцов в цилиндрах – резистивиметрах.

Таблица 2.1. Калибровка резистивиметров

№ резистивиметра	U, мВ	I, мА	ρ , Ом·м	k, м
1	1378.7	200	2.6857	0.39264
2	1129.7	200	2.6857	0.47778
3	1434.3	200	2.6857	0.37436
4	1160.1	200	2.6857	0.46468
5	1126.8	200	2.6857	0.47641
6	1060.9	200	2.6857	0.50806
11	1350.1	200	2.6857	0.39960
12	1151.9	200	2.6857	0.46656
13	1429.6	200	2.6857	0.37661
14	1205.3	200	2.6857	0.44428
15	1153.6	200	2.6857	0.46373
16	1107.1	200	2.6857	0.48518

Для выявления общих зависимостей влияния засоленности и гранулометрического состава пород на их электрические свойства, выполнялись измерения на пастах – образцах, изготовленных из грунтов разного гранулометрического состава, с искусственно заданными значениями влажности и засоленности. Приготовленные пасты помещались в резистивиметры методом послойного утрамбования до заданной плотности.

Степень засоления (засоленность) D_{sal} по СНиП 2.02.04-88 равна отношению массы легкорастворимых солей (m_c) к массе сухого грунта (m_r):

$$D_{sal} = \frac{m_c}{m_r} \cdot 100\%$$

Концентрация порового раствора C_{ps} , (доли единицы) зависит от влажности и засоленности породы и определяется по формуле:

$$C_{ps} = \frac{D_{sal}}{D_{sal} + W},$$

где W_{tot} - суммарная влажность мерзлого грунта (%).

Для определения удельного электрического сопротивления и коэффициента поляризуемости пород в их естественном сложении, из керна вырезался образец заданной геометрии и помещался в резистивиметр.

Сразу после приготовления образцы консервировались при помощи пищевой пленки, чтобы исключить потерю влажности и помещались в холодильник с температурой -20°C . Замораживание при столь низких температурах позволяет получить массивную криогенную структуру.

Измерения производились в холодильной камере в цикле повышения температуры с температурным шагом в 2°C в диапазоне температур от -20°C до $+20^{\circ}\text{C}$.

В ходе эксперимента производились измерения следующих параметров:

- амплитуды гармоник $U_{1\div 5}$, напряжения на приемных электродах;
- разность фаз $\Delta\phi_{1-3}$, между первой и третьей гармониками напряжения.

Поскольку используемая в эксперименте аппаратура имеет ограниченные возможности по величине выходного тока (минимальный ток, который может генерировать СПЕКТР-1Г – 1 мА), к образцам, имеющим высокое сопротивление параллельно подключался шунт, чтобы уменьшить общее сопротивление в цепи. Принципиальная схема представлена на рисунке 2.3.

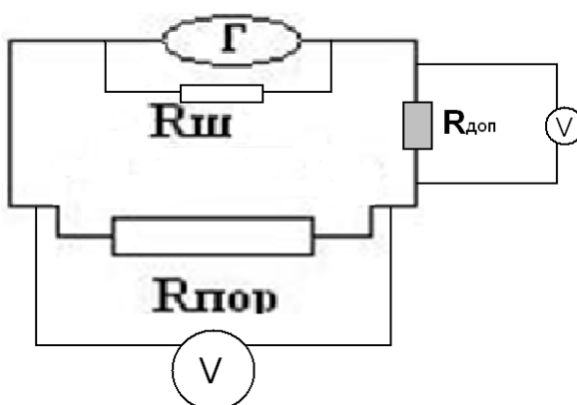


Рис. 2.3. Схема включения шунта.

Γ – генератор, $R_{пор}$ – сопротивление образца, включающее переходные сопротивления R_{AB} , $R_{ш}$ – сопротивление шунта, $R_{доп}$ – дополнительное сопротивление, позволяющее измерить ток в цепи, V – вольтметр

Величина шунта подбиралась исходя из того, что максимальное выходное напряжение генератора составляет 400 В, а минимальный ток 1 мА, тогда максимальное сопротивление, при котором генератор способен работать составляет 400 кОм. Дополнительное сопротивление добавлялось последовательно к изучаемому образцу. На нем измерялось падение напряжения и по закону Ома определялся ток в цепи. Далее измерялось падение напряжения на участке с образцом.

С помощью измерителя «APL-02» выполнялись одновременные измерения амплитуд $U_{1,3,5}$ первой, третьей и пятой гармоник напряжения на приемных электродах, и разности фаз $\Delta\varphi_{1-3}$, между первой и третьей гармониками. Таким образом, был получен цифровой материал, который подвергался дальнейшей обработке.

Расчет значений удельного электрического сопротивления производился по формуле:

$$\rho_k = k \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}},$$

где:

k – геометрический коэффициент установки;

U_{MN} – напряжение, измеренное на исследуемом образце;

I_{AB} – ток, рассчитанный по закону Ома на участке с дополнительным сопротивлением.

Расчет коэффициента вызванной поляризации производился по эмпирической формуле:

$$\eta = -2.5 \cdot \Delta\varphi_{1-3}$$

Далее строились температурные зависимости этих показателей от литологии и засоления. Полученные графические материалы были проанализированы.

Акустические свойства

Для определения скоростей распространения упругих волн чаще всего используют два способа – просвечивание и профилирование. В первом случае скорость рассчитывается как отношение базы просвечивания ко времени распространения продольных волн или поперечных волн. Истинные значения времени получаются путем введения поправок в измеренные величины времени. Поправка учитывает время прохождения волны в мембранах излучателя и приемника, в устройствах, обеспечивающих преобразование продольных волн в поперечные, в концентраторах и др. Для определения поправки используются эталоны, скорости в которых известны (Зыков, 2007).

Измерения на образцах дают незаменимый материал для определения зависимости скоростей упругих волн от параметров состава, строения и состояния мерзлых пород, а также для изучения связей между упругими, с одной стороны, и прочностными и деформационными свойствами – с другой. При этом возможность моделирования мерзлых пород с заранее заданными характеристиками позволяет производить точные и детальные исследования. Именно таким экспериментальным способом установлено большинство зависимостей и связей, которые описаны в данной работе.

Исследования образцов в лабораторных условиях производят, как правило, в ультразвуковом диапазоне частот. Это связано с тем, что для получения четких первых вступлений упругой волны размеры образцов должны быть небольшими, а необходимость соблюдения соотношения длины волны и геометрических параметров образцов вынуждает обращаться к измерениям на высоких частотах, где $f > 20 \text{ кГц}$ (Зыков, 2007).

Измерения проводились с помощью прибора дефектоскоп УД 4-130 (рис. 2.4) с пьезоэлектрическими датчиками 60 кГц, который позволяет получить волновые картины в цифровом виде. Одним из наиболее распространенных видов исследований, обеспечивающих автономные измерения (без извлечения образцов из холодильной камеры) является «просвечивание», когда излучатель и приемник

находятся на противоположных параллельных плоскостях образца (Зыков и др., 2013). Форма образца для измерения скорости продольных волн представляла собой полую пластиковую кубическую емкость (длина 6 см, ширина 3 см) со столь тонкими стенками, что возможность прохождения по ним акустической волны отсутствовала. Оптимальный контакт пьезоэлектрических датчиков с грунтом обеспечивался при помощи незамерзающей смазки (солидола).



Рис. 2.4. Ультразвуковой дефектоскоп УД 4-130.



Рис. 2.5. Образец породы, размещенный в сейсмоакустической установке.

Усилие прижима образца к датчику подбиралось с помощью сейсмоакустической установки для измерения продольных и поперечных акустических волн (рис. 2.5).

Измерения проводились в цикле оттаивания при ступенчатом повышении температуры. При каждой температуре образцы выстаивались не менее 4 часов, до равномерного распределения в них температурного поля. Далее в программном пакете RadExpro рассчитывались скорости и длины продольных волн, соответствующие каждой температуре, и строились графики зависимости $V_p(t, ^\circ\text{C})$.

Теплофизические свойства

Теплофизические характеристики грунтов. Под термином "теплофизические характеристики" обозначаются следующие характеристики: коэффициент теплопроводности – λ (Вт/(м·К)), коэффициент температуропроводности – a (м²/с), теплоемкость удельная (массовая) – C (Дж/(кг·К)) и объемная – C_p (Дж/(м³·К)); теплота фазовых переходов Q (МДж/кг), Температура начала замерзания грунта $T_{нз}$ (°С) и кривая незамерзшей воды (W_w от t) (Теплофизические свойства..., 1984).

Рассматривать и прогнозировать изменение теплофизических свойств, а также других физических и механических свойств мерзлых пород, невозможно без анализа фазового состава воды в них. В термодинамическом плане мерзлые породы – многофазные и многокомпонентные системы. К основным компонентам пород относятся: органоминеральный скелет, поровый раствор и поровый газ. Вода может находиться в жидкой, твердой и газообразной фазах.

Фазовый состав воды — это содержание льда, незамерзшей воды и пара в мерзлых, промерзающих и оттаивающих породах при отрицательной температуре. Формирование фазового состава влаги в мерзлых породах происходит в диапазоне отрицательных температур под влиянием энергетического воздействия минеральной поверхности, порового льда и ионов растворенных солей. Наиболее важной характеристикой фазового состава воды

является температурная зависимость содержания незамерзшей воды $W_w = f(t)$. Содержание незамерзшей воды W_w измеряются в % или долях единицы по отношению к сухому грунту.

Определение теплоты фазовых переходов выполнялось расчетным способом:

$$Q = L \cdot W_{\text{tot}} \cdot \rho_d,$$

где L – удельная теплота таяния льда, равная 335 МДж/кг; W_{tot} – суммарная влажность породы, д.е.; ρ_d – плотность скелета грунта, кг/м³.

Удельная теплоемкость (C) пород также определяется расчетным способом, так как вне области фазовых переходов с достаточной для практических целей точностью может быть определена по аддитивным соотношениям через удельные доли составляющих грунт компонентов:

$$C = \frac{C_{ск} \cdot 100 + C_w \cdot W_w + C_l \cdot (W - W_w)}{100 + W},$$

где W и W_w – соответственно, весовая влажность образца и содержание в нем незамерзшей воды, %, C_w и C_l – теплоемкости воды и льда (брались из справочной литературы) равны, соответственно, 4200 и 2100 Дж/(кг·К), $C_{ск}$ – скелета грунта принималась равной для песка 700, супеси – 750, суглинка – 800, глины – 850 Дж/(кг·К).

Для заторфованных грунтов удельная теплоемкость определялась по формуле

$$C = \frac{C_{ск} \cdot (100 - c_{орг}) + C_w \cdot W_w + C_l \cdot (W - W_w) + C_T \cdot c_{орг}}{100 + W},$$

где $c_{орг}$ – содержание органического вещества, %; C_T – удельная теплоемкость торфа, принималась равной 1670 Дж/(кг·К).

Определение температуры начала замерзания пород выполнялось криоскопическим методом. В полевых условиях выполнялось с помощью

электронного термометра ЛТ-300 (рис. 2.6), в лабораторных условиях – с помощью термопары и электронного вольтметра.

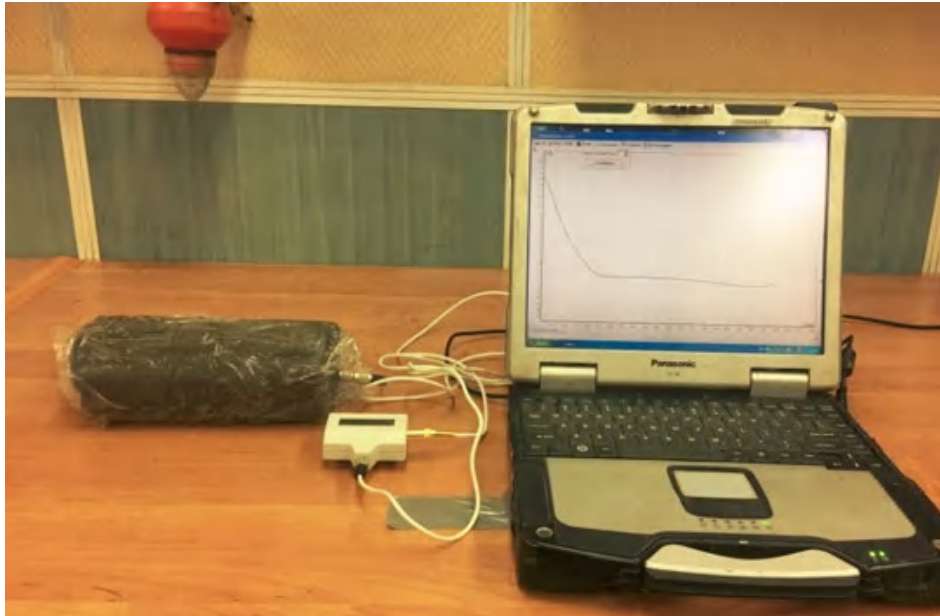


Рис. 2.6. Определение температуры начала замерзания в керне прибором ЛТ-300.

Суть криоскопического метода заключается в фиксации на графике температуры образца от времени выделения скрытой теплоты кристаллизации (или же поглощение теплоты плавления) и понижение температуры замерзания (плавления) воды в порах породы (Руководство..., 1973, Методы..., 2004). Выделение или поглощение тепла на графике температуры образца от времени приводит к «закрплению» (уменьшению скорости изменения) температуры, что позволяет определить точку начала замерзания или точку окончания оттаивания. Обычно при определении температуры начала замерзания рассматривается цикл оттаивания, так как в цикле промерзания возможно образования переохлажденной воды в образце, что не позволяет с достаточной точностью определить точку начала замерзания. В общем виде график изменения температуры образца от времени представлен на рисунке 2.7. На графике зависимости температуры от времени выделяются 3 участка: I – участок, где затраты тепла в основном тратятся на нагрев мерзлой породы (за счет ее теплоемкости); II – участок, где затраты тепла происходят преимущественно на фазовый переход льда в воду; III – участок, где затраты тепла идут на нагрев

талого образца. Определение же температуры начала замерзания происходит путем продления линий тренда на участках II и III до их пересечения, а точка их пересечения является токой окончания оттаивания, то есть $T_{нз}$.

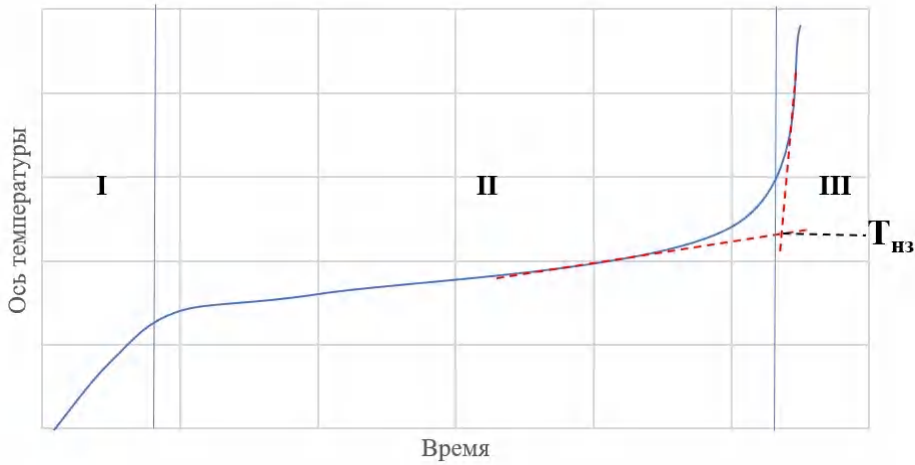


Рис. 2.7. График определения температуры начала замерзания.

Для определения кривой незамерзшей воды из одного образца породы подготавливаются несколько образцов пасты с разной влажностью и для каждого из этих образцов выполняется определение температуры начала замерзания. После серии определений, полученные значения наносятся на график влажности от времени. Учитывая, что при температуре начала замерзания влажность образца является и его влажностью за счет незамерзшей воды, полученный график

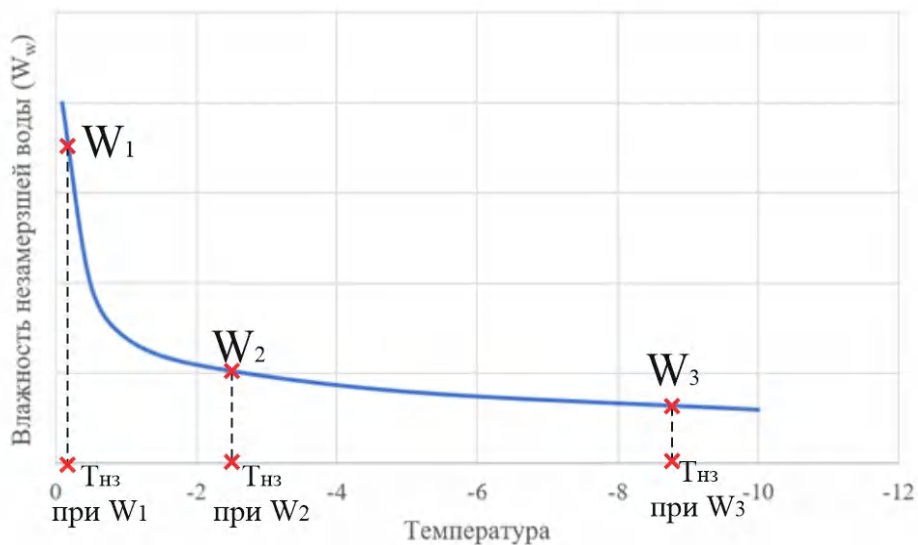


Рис. 2.8. Пример кривой незамерзшей воды.

отражает зависимость влажности незамерзшей воды от температуры породы.

Определения теплопроводности пород в полевых условиях выполнялось методом игольчатого зонда, основанном на теории нестационарного линейного источника тепла с помощью прибора KD2Pro (рис. 2.9). Суть метода игольчатого зонда состоит в интерпретации термограммы зонда на больших временах при постоянной мощности нагрева внутри зонда. Преимуществом метода является отсутствие необходимости специальной подготовки образца и высокая скорость измерений.



Рис. 2.9. Определение теплопроводности в полевых условиях.

В лабораторных условиях определения теплопроводности выполнялись методом регулярного режима I рода, как наиболее оптимального с точки зрения соотношения точности и скорости выполнения определений. Суть метода заключается в нагреве или охлаждении образца при постоянной внешней температуре. При этом тангенс угла наклона кривой логарифма температуры образца от времени пропорционален температуропроводности образца, что позволяет определить его коэффициент теплопроводности. Для поддержания постоянной внешней температуры обычно используется жидкостный термостат.

Схема и фото установки для определения температуропроводности методом регулярного режима I рода представлена на рисунке 2.10.

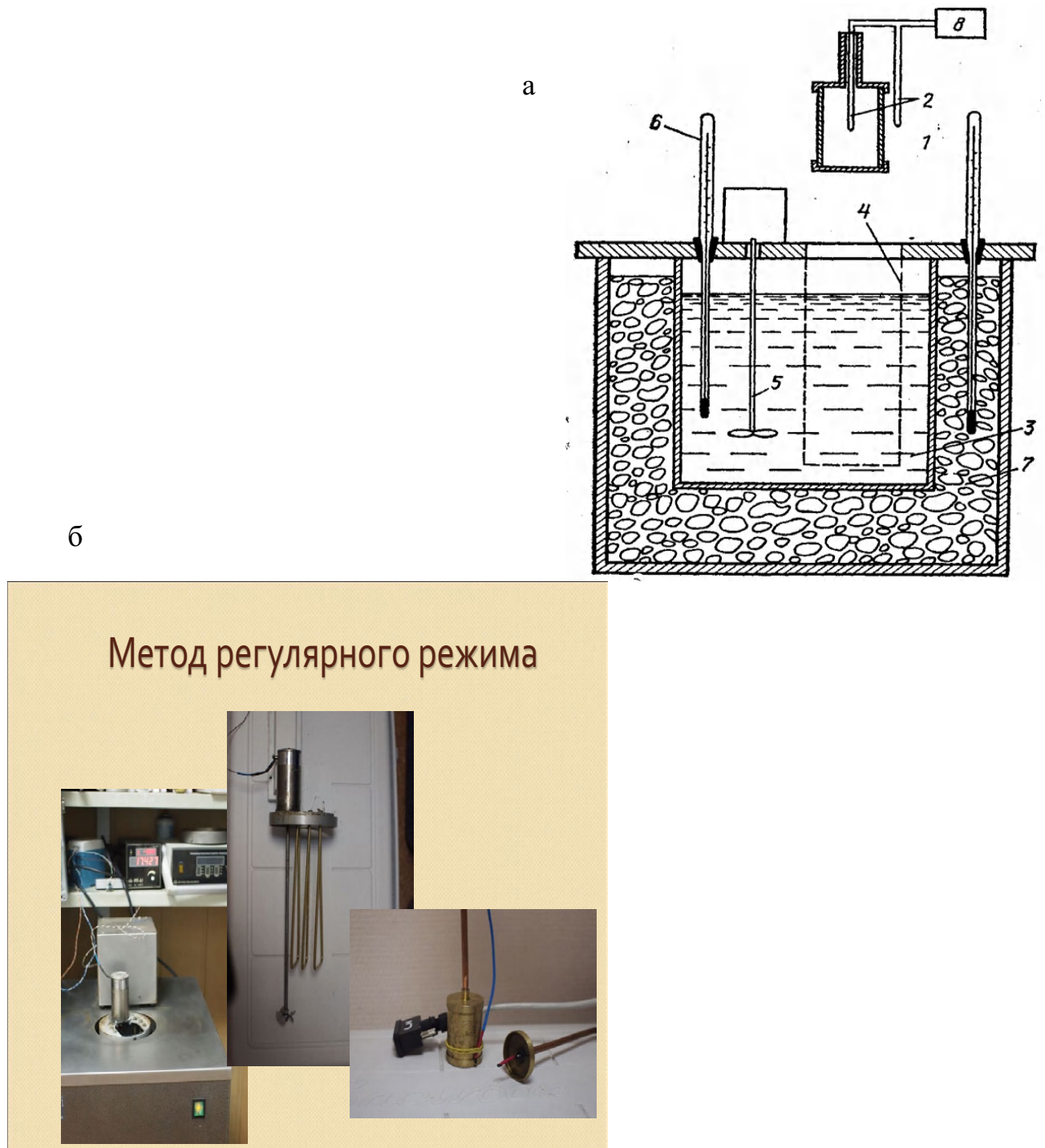


Рис. 2.10. Установка для определения температуропроводности методом регулярного режима I рода.

а – Схема установки.

1 – образец грунта; 2 – дифференциальная термопара; 3 – термостатирующая жидкость; 4 – сетка для образца; 5 – мешалка; 6 – термометр; 7 – термостатирующая оболочка, заполненная эвтектической смесью; 8 – измерительный прибор (Методы..., 2004)

б – Работа установки. (Фото Р.Г. Мотенко).

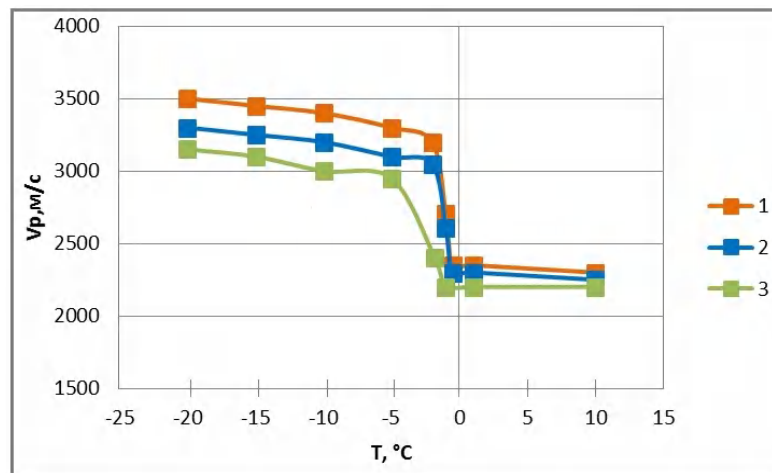
2.2. Результаты лабораторных исследований акустических свойств пород, отобранных на шельфе арктических морей

Общее количество образцов с шельфа арктических морей, на котором выполнялись испытания, составило более 500 за период 2006–2018 гг., на каждом опорном участке было отобрано 15–20 литологических разностей и выполнено 3–5 определений акустических свойств.

Анализ скоростей упругих колебаний, выполненный автором для грунтов с шельфа Карского, Лаптевых, Чукотского морей, позволяет утверждать, что при переходе через температуру начала замерзания происходит резкий скачок значений V_p . Во всех грунтах зафиксирована одинаковая картина. Скорости упругих колебаний в грунтах уменьшаются от песков к суглинкам с одной стороны и возрастают при уменьшении засоления в породах.

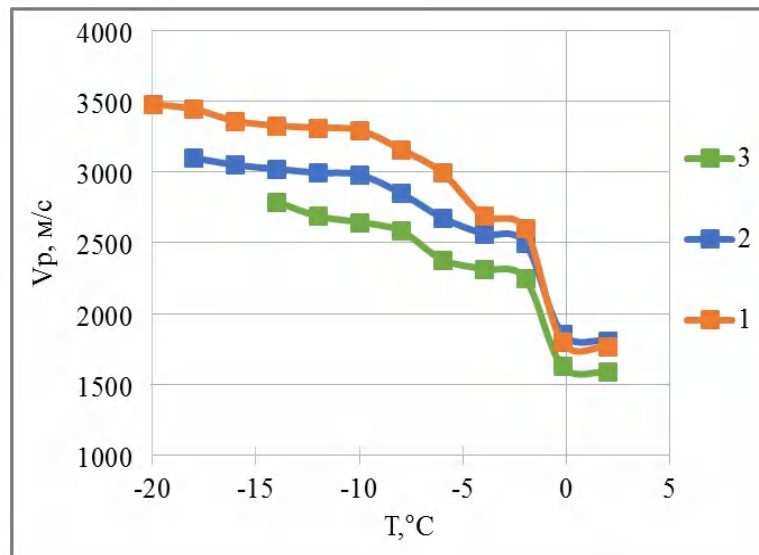
На рисунках 2.11 и 2.12 представлены примеры температурные зависимости скоростей прохождения продольных волн в породах разного гранулометрического состава и засоления для приямальского шельфа.

Пример зависимости скоростей продольных волн от температуры для песков приведен на рисунке 2.11, для суглинков — на рисунке 2.12.



1 – $D_{sal} = 0\%$; 2 – $D_{sal} = 1\%$; 3 – $D_{sal} = 2\%$

Рис. 2.11. Зависимости скоростей прохождения продольных волн (V_p) от температуры для песков с различным засолением. Приямальский шельф.



1 – пески, 2 – супеси, 3 – суглинки

Рис. 2.12. Зависимости скорости прохождения продольных волн от температуры и литологии пород. Приямальский шельф.

2.3. Результаты лабораторных исследований электрических свойств пород, отобранных на шельфе арктических морей

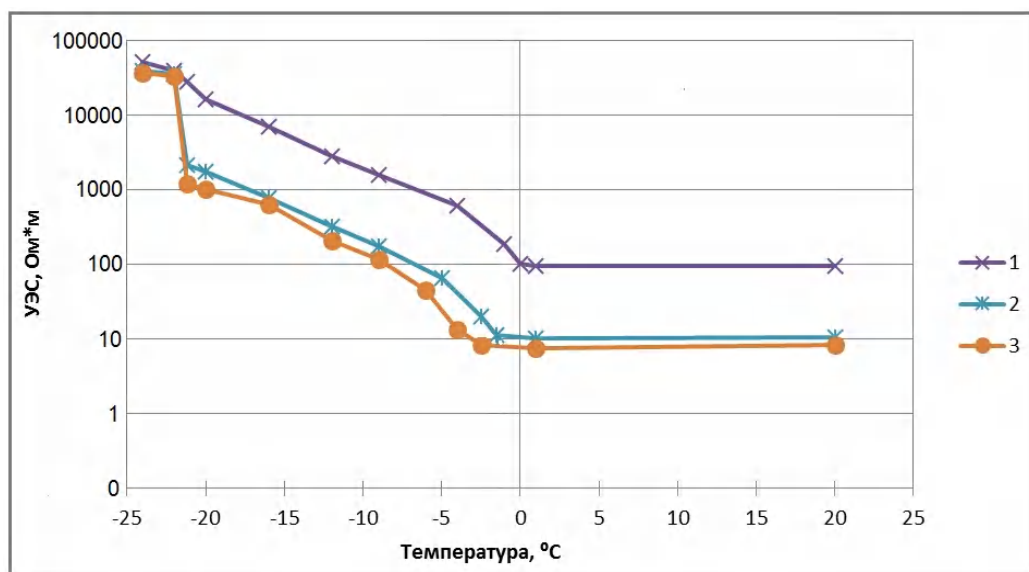
Общее количество образцов с шельфа арктических морей, на котором выполнялись испытания, составило более 500 за период 2006–2018 гг., на каждом опорном участке было отобрано 15–20 литологических разностей и выполнено 3–5 определений электрических свойств.

Анализ, выполненный автором для грунтов с шельфа Карского, Лаптевых, Чукотского морей, позволяет утверждать, что удельные электрические сопротивления пород в целом понижаются в ряду пески – супеси-суглинки, но решающим фактором для определения удельных электрических сопротивлений грунтов является их засоление.

Выявлено, что в области положительных температур засоление оказывает сильное влияние на УЭС (ρ) супесей за счет увеличения концентрации порового раствора, что влечет за собой уменьшение общего сопротивления породы. Так, в области положительных температур, в образцах с засолением $D_{sal} = 0\%$ и $W = 10\%$, УЭС составляет 95 Ом·м, в то время как у образцов с засолением

1% и 2%, УЭС равняется 10,5 Ом·м и 8 Ом·м соответственно. В области отрицательных температур влияние засоления на электрические свойства грунтов сказывается еще сильнее. При переходе через температуру начала замерзания грунта ($t_{\text{нз}}$) в сторону отрицательных температур наблюдается достаточно резкое увеличение УЭС незасоленных пород и более плавное увеличение значений для пород с $D_{\text{sal}} = 1\%$ и 2% . Пример изменения УЭС от температуры для супесей с Байдарацкой губы приведен на рисунке 2.13.

Диапазон температур, в котором проводились электрометрические измерения на образцах супесей, был специально расширен, чтобы оценить влияние изменения фазового состава грунта при температурах ниже температуры эвтектики раствора NaCl. При переходе через $-21,2^{\circ}\text{C}$ в сторону более низких температур происходит полное вымерзание порового раствора грунта, что приводит к повышению УЭС засоленных образцов до значений, полученных на незасоленных.

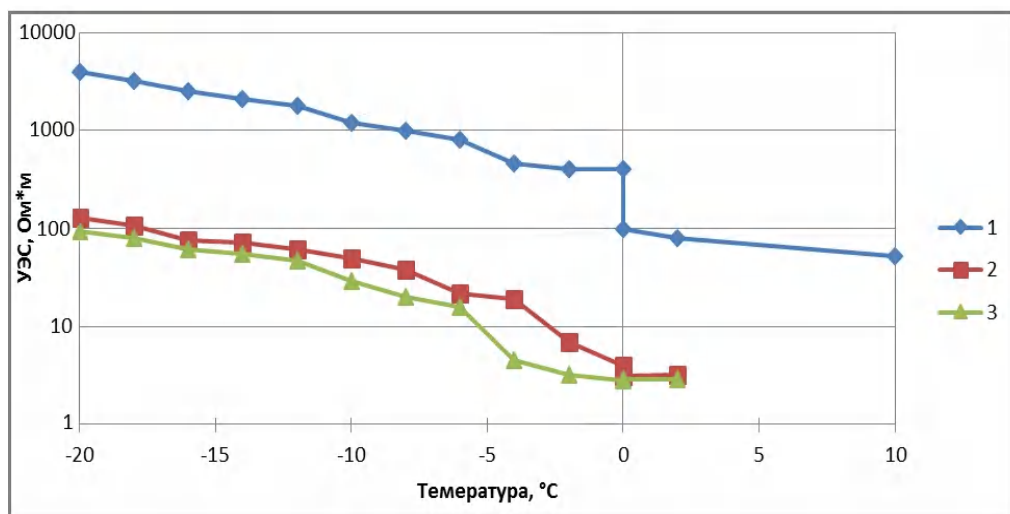


1 – $D_{\text{sal}}=0\%$; 2 – $D_{\text{sal}}=1\%$; 3 – $D_{\text{sal}}=2\%$

Рис. 2.13. Температурные зависимости УЭС супесей от засоления ($W=10\%$).

В области положительных температур УЭС незасоленных образцов суглинка составляет 80 Ом·м, в то время как УЭС засоленных – 3,5 и 2,9 Ом·м для образцов с засолением 1% и 2% соответственно. При переходе через

температуру начала замерзания незасоленного грунта происходит резкое возрастание УЭС со 100 Ом·м до 400 Ом·м. При дальнейшем понижении температуры происходит монотонное возрастание значений УЭС до 4000 Ом·м при температуре -20°C . В засоленных образцах суглинка не происходит резкого скачка УЭС, при достижении породами температур ниже температуры начала замерзания происходит плавное вымерзание порового раствора, что приводит к повышению УЭС грунта от 3–7 Ом·м при температуре -3°C до 90–130 Ом·м при температуре -20°C . Пример изменения УЭС от температуры для суглинков с Байдарацкой губы приведен на рисунке 2.14.

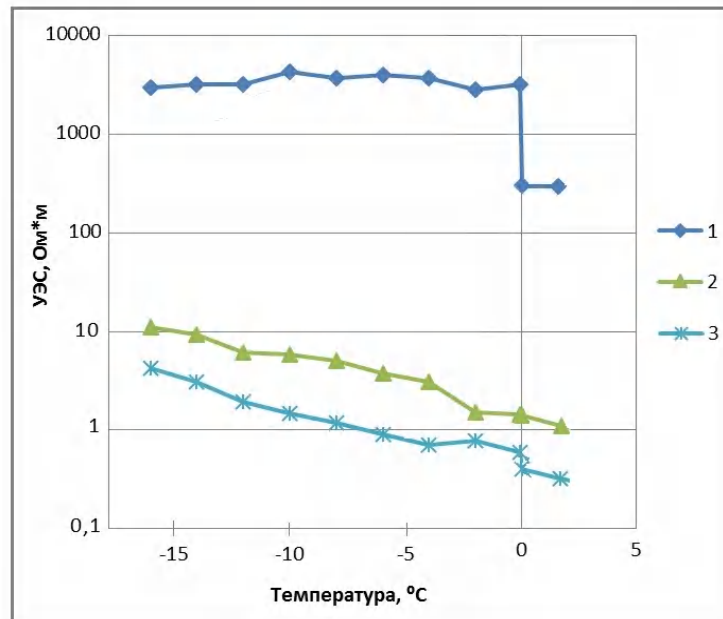


1 – $D_{\text{sal}} = 0$; 2 – $D_{\text{sal}} = 1$; 3 – $D_{\text{sal}} = 2$ %

Рис. 2.14. Зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) от температуры (T) для засоленного суглинка ($W=23$ %).

Наиболее выраженное влияние засоления на УЭС грунта наблюдается на образцах, приготовленных из песка. В области положительных температур УЭС уменьшается с 200 Ом·м в незасоленных образцах до 1,5 и 0,5 Ом·м в образцах с засолениями $D_{\text{sal}} = 1\%$ и 2% соответственно. В области отрицательных температур в незасоленных образцах происходит скачкообразное увеличение УЭС до 3000 Ом·м и практически не меняется при дальнейшем понижении температуры в связи с полным вымерзанием поровой влаги. В засоленных образцах песка при прохождении $T_{\text{нз}}$ породы и дальнейшем понижении температуры происходит плавное повышение значений УЭС до 10 Ом·м в

образцах с засолением 1% и до 4,5 Ом·м в образцах с засолением 2%. Пример изменения УЭС от температуры для песков с Байдарацкой губы приведен на рисунке 2.15.



1 – $D_{sal} = 0$; 2 – $D_{sal} = 1$; 3 – $D_{sal} = 2$ %

Рис. 2.15. Температурная зависимость УЭС для песка с разным засолением ($W = 15$ %).

Так, наибольшие значения УЭС ($n \cdot 10^3$ Ом·м) получены на образцах с засолением 0%, наименьшие – на образцах с засолением 2% (1 Ом·м). Полученные результаты опыта объясняются тем, что определяющее влияние на УЭС грунтов имеет влажность незамерзшей воды, т.к. сопротивление грунтов определяется ионной проводимостью раствора, а не минеральным скелетом и льдом, которые обладают высокими УЭС. Поэтому наибольшие значения УЭС получены на образцах с нулевым засолением, а наименьшие – на образцах с засолением 2%.

Понижение УЭС засоленных грунтов связано не только с повышением проводимости порового раствора, но и с увеличением W_w при внесении в систему солей. При понижении температуры грунта ниже $t_{нз}$ происходит вымерзание чистой воды из порового раствора, что влечет за собой повышение концентрации поровой влаги. Но дальнейший рост УЭС при понижении

температуры говорит о том, что определяющее влияние на формирование УЭС грунта оказывают уменьшение ионной проводимости раствора при понижении температуры, увеличение извилистости пор за счет появления новой минеральной составляющей (льда) и защемление порового раствора в кристаллической решетке льда при его образовании. При достижении температуры $-21,2^{\circ}\text{C}$ (точка эвтектики раствора NaCl) происходит почти полное вымерзание поровой влаги в засоленных грунтах, что приводит к резкому повышению УЭС засоленных грунтов с $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, до УЭС, характерного для грунтов незасоленных – $30000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Также следует отметить, что наибольшие изменения УЭС грунтов происходят при изменении засоления с 0 до 1% (удельное электрическое сопротивление изменяется на 1–2 порядка). Последующее увеличение засоления грунтов приводит к дальнейшему понижению УЭС, но к менее ощутимому – УЭС меняется в 2–3 раза. Если рассматривать влияние засоления на грунты разного гранулометрического состава, то наибольшее влияние засоление оказывает на пески, так как удельное электрическое сопротивление изменяется более чем на $4000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, в то время как на образцах суглинка и каолиновой глины – на 2800 и на $2500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ соответственно.

При засолении во всех исследуемых грунтах наблюдается понижение УЭС во всем диапазоне исследуемых засолений. Помимо того, что засоление оказывает влияние на УЭС грунтов за счет увеличения влажности, за счет незамерзшей воды, а также при засолении грунтов сильно уменьшается УЭС свободной воды, находящейся в грунтах. Наибольшее влияние засоление оказывает на УЭС песка, так как его электрические свойства полностью определяются свойствами порового раствора.

В области положительных температур УЭС грунтов практически не изменяются, при температурах ниже температуры начала замерзания УЭС грунтов постепенно увеличивается вплоть до точки эвтектики порового раствора. Ниже температуры основных фазовых переходов УЭС песка незасоленного на 3

порядка выше, чем песка с засолением 2%, в глинистых грунтах УЭС изменяется на 1,5–2 порядка.

При температурах ниже эвтектических для данного раствора влияние засоления сводится на нет, так как при этих температурах поровый раствор полностью вымерзает, образуя тонкодисперсную смесь льда и соли. Наиболее интенсивное понижение УЭС грунтов происходит при засолении грунтов до 1%, дальнейшее увеличение засоления приводит к менее значительным изменениям УЭС. Незасоленные грунты разного гранулометрического состава обладают разными значениями УЭС, но при высоких значениях засоления УЭС грунтов разного гранулометрического состава сближаются и определяются, в первую очередь концентрацией порового раствора.

2.4. Результаты лабораторных исследований теплофизических свойств пород, отобранных на шельфе арктических морей

Анализ более 500 измерений теплофизических свойств, выполненный автором совместно с коллегами, для пород с шельфа Карского, Лаптевых, Чукотского морей, позволяет утверждать, что теплофизические свойства пород зависят от температуры, влажности, литологического состава грунтов и засоления.

В таблице 2.2 приведена ведомость, а в таблице 3.2 приведен пример результатов определения теплофизических свойств пород на участке Приямальского шельфа для образцов, отобранных из скважин №1, №2 и №2.1; №3, №4, №5, №6, №7, №13, №14 и №15 (Таблица 2.2).

Таблица 2.2. Ведомость образцов пород на участке Приямальского шельфа

№№ п/п	№ скв.	Глубина отбора, м	*Наименование грунта (полевое)
1	1	5,2–5,5	Суглинок засоленный с прослоями песка

№№ п/п	№ скв.	Глубина отбора, м	*Наименование грунта (полевое)
2	1	2,5–2,65	Песок мелкозернистый ожезненный с прослоями суглинка
3	2.1	3,3–3,6	Песок, переслаивание с черным суглинком
4	2.1	4,9–4,7	Суглинок
5	2	2,5–2,8	Песок мелкозернистый
6	3	1,75–2,0	Песок пылеватый ожезненный неоднородный
7	3	2,3–2,55	Песок пылеватый ожезненный
8	3	3,2–3,6	Песок пылеватый с растительными остатками с ожезнением
9	3	5,1–5,5	Супесь
10	4	5,0–5,2	Песок пылеватый
11	5	4,4–5,0	Супесь оторфованная
12	5	5,0–5,7	Супесь оторфованная
13	6	3,4–3,5	Супесь
14	6	5,0–5,2	Песок
15	7	1,5–1,6	Супесь серая оторфованная
16	7	5,3–5,6	Песок
17	13	2,1–2,3	Супесь, переслаивание с глиной
18	14	2,4–2,6	Торф
19	14	4,9–5,1	Супесь оторфованная
20	15	2,0–2,2	Супесь

В таблице 2.3 приведены значения теплофизических характеристик исследованных грунтов для талого состояния, а именно, коэффициента температуропроводности (a_{th}), коэффициента теплопроводности (λ_{th}), удельной теплоемкости (C_{th}) и объемной теплоемкости C_{pth} , и, соответственно, для мерзлого грунта — a_f , λ_f , C_f , C_{pf} . Экспериментальные определения проведены для талого состояния при температуре +10°C, для мерзлого состояния — при –15°C.

Для исследованных песков диапазоны изменения влажности от 21 до 25%, плотности от 1,95 до 2,09 г/см³. Температура замерзания, в основном, изменяется

от 0 до $-0,19^{\circ}\text{C}$, только для образца №3 она равна $-1,52^{\circ}\text{C}$, что связано с переслаиванием с более дисперсным грунтом и, по-видимому, с его большой засоленностью. Диапазоны изменения коэффициента температуропроводности для талого состояния (a_{th}) $0,580 \cdot 10^{-6}$ – $0,866 \cdot 10^{-6}$ м²/с и для мерзлого (a_{f}) $1,103 \cdot 10^{-6}$ – $1,422 \cdot 10^{-6}$ м²/с, коэффициента теплопроводности λ_{th} от 1,63 до 2,31 Вт/(м·К) и λ_{f} от 2,19 до 2,72 Вт/(м·К) и удельной теплоемкости C_{pf} от 1300 до 1400 Дж/(кг·К), C_{f} от 900 до 1000 Дж/(кг·К).

Для супесей диапазоны изменения влажности от 24% до 35 %, плотности от 1,86–2,01 г/см³. Температура начала замерзания изменяется от 0 до $-0,84^{\circ}\text{C}$. Диапазоны изменения коэффициента температуропроводности для талого состояния (a_{th}) $0,446 \cdot 10^{-6}$ – $0,646 \cdot 10^{-6}$ м²/с и мерзлого (a_{f}) $0,837 \cdot 10^{-6}$ – $1,050 \cdot 10^{-6}$ м²/с, коэффициента теплопроводности λ_{th} от 1,02 до 1,89 Вт/(м·К) и λ_{f} от 1,05 до 2,21 Вт/(м·К) и удельной теплоемкости C_{pf} от 1400 до 1600 Дж/(кг·К), C_{f} от 1000 до 1200 Дж/(кг·К).

Для суглинков диапазоны изменения влажности от 27% до 29 %, плотности от 2,04–2,06 г/см³. Температура начала замерзания довольно низкая и изменяется от $-2,45$ до -3 °С и связано это с засоленностью исследуемых образцов. Диапазоны изменения коэффициента температуропроводности для талого состояния (a_{th}) $0,523 \cdot 10^{-6}$ – $0,579 \cdot 10^{-6}$ м²/с и мерзлого (a_{f}) $0,661 \cdot 10^{-6}$ – $0,675 \cdot 10^{-6}$ м²/с, коэффициента теплопроводности λ_{th} от 1,63 до 1,84 Вт/(м·К), λ_{f} от 1,67 до 1,77 Вт/(м·К) и удельная теплоемкость C_{pf} изменяется от 1500 до 1600 Дж/(кг·К) C_{f} от 1200 до 1300 Дж/(кг·К).

Для торфа диапазоны изменения влажности от 240% до 290 %, плотности от 1,10–1,15 г/см³, температуры начала замерзания от $-0,25$ до $-0,43$ °С. Коэффициент температуропроводности для талого состояния (a_{th}) равен $0,162 \cdot 10^{-6}$ м²/с и мерзлого (a_{f}) – $0,682 \cdot 10^{-6}$ м²/с, коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{th}} = 0,64$ Вт/(м·К) и $\lambda_{\text{f}} = 1,59$ Вт/(м·К) и удельная теплоемкости $C_{\text{pf}} = 3490$ Дж/(кг·К) и $C_{\text{f}} = 2060$ Дж/(кг·К).

В ходе научных и производственных работ автора аналогичные испытания грунтов выполнены для следующих участков арктического шельфа:

1. Шельф Чукотское моря, Чаунская губа (А.М.Фирсов, изыскания ООО «МГУ-геофизика», 2010 г.)
2. Шельф моря Лаптевых, Залив губы Буор-Хая (Е.М.Чувилин, совместные работы с автором по гранту РФФИ 2012–2015 гг.)
3. Шельф моря Лаптевых, Хатангский залив (В.В.Скосарь, изыскания ООО «МГУ-геофизика», 2017 г.)
4. Приямальский шельф Карского моря (В.В.Скосарь, изыскания ООО «МГУ-геофизика», 2016 г.)
5. Байдарацкая губа, Ямальский, Уральский участок. Шельф Карского моря (Р.Г.Мотенко, Д.М.Алексютина по заказу ООО «МГУ-геофизика», 2009 г.).

Общее количество образцов с шельфа арктических морей, на котором выполнялись испытания, составило более 500 за период 2006–2018 гг., на каждом опорном участке было отобрано 15-20 литологических разностей и выполнено 3-5 определений для каждого вида физических свойств.

Полученные данные приведены и используются в Главе 3 Моделирование теплового режима и распространения мерзлых пород на шельфе.

Таблица 2.3. Теплофизические свойства исследуемых пород

№п/п	№ скв.	Глубина отбора, м	Наименование	Плотность ρ , г/см ³	Плотность в сухом состоянии ρ_d , г/см ³	Влажность W_{tot} , %	Температура начала зам. (отг.) $t_{бз}$, °С	Коэффициент температуропроводности		Коэффициент теплопроводности		Удельная теплоемкость		Объемная теплоемкость	
								$a_{th} \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$a_f \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ_{th} , Вт/(м·К)	λ_f , Вт/(м·К)	C_{th} , Дж/(кг·К)	C_f , Дж/(кг·К)	$C_{рth} \cdot 10^6$, Дж/(м ³ ·К)	$C_{рf} \cdot 10^6$, Дж/(м ³ ·К)
1	1	5,2-5,5	Суглинок засоленный, тугопласт.	2,05	1,63	25,5	-3	0,533	0,702	1,63	1,75	1491	1215	3,06	2,49
				2,07	1,62	27,9	-3	0,514	0,62	1,64	1,58	1542	1231	3,19	2,55
				*2,06	1,63	26,7	-3	0,523	0,661	1,63	1,67	1516	1223	3,12	2,52
2	1	2,5-2,65	Песок мелкозерн. с прослоями ожелезнения и черной супеси	2,06	1,70	21,5	0	0,900	1,499	2,45	2,93	1319	948	2,72	1,95
				1,98	2,02	21,5	0	0,833	1,345	2,18	2,52	1319	948	2,61	1,88
				2,02	1,66	21,5	0	0,866	1,422	2,31	2,72	1319	948	2,67	1,91
3	2.1	3,3-3,6	Песок светлый, переслаивание с черным	2,03	1,64	23,9	-1,86	0,770	1,108	2,19	2,47	1399	1096	2,84	2,22
				2,08	1,66	25,4	-1,18	0,688	0,958	2,05	2,21	1433	1108	2,98	2,30
				2,05	1,64	24,7	-1,52	0,729	1,033	2,12	2,33	1417	1102	2,91	2,26
4	2.1.	4,9-4,7	Суглинок	2,05	1,59	28,8	-2,48	0,588	0,688	1,88	1,81	1560	1286	3,20	2,64
				2,03	1,58	28,3	-2,42	0,570	0,663	1,79	1,73	1550	1283	3,15	2,60
				2,04	1,59	28,5	-2,45	0,579	0,675	1,84	1,77	1554	1284	3,17	2,62
5	2	2,5-2,8	Песок мелкозерн	2,10	1,71	23	-0,26	0,733	1,19	2,12	2,48	1379	993	2,90	2,09
				1,97	1,64	20,2	-0,12	0,828	1,38	2,14	2,63	1313	967	2,59	1,91
				2,04	1,68	21,6	-0,19	0,781	1,29	2,15	2,58	1346	980	2,75	2,00
6	3	1,75-2,0	Песок пылев. ожелезненный неоднородн	1,94	1,57	23,6	-0,19	0,669	1,164	1,81	2,29	1393	1012	2,70	1,96
				1,98	1,60	24	-0,06	0,6	1,159	1,67	2,33	1402	1015	2,78	2,01
				1,96	1,58	23,8	-0,13	0,635	1,162	1,74	2,31	1397	1014	2,74	1,99
7	3	2,3-2,55	Песок пылеватый ожелезнен.	2,01	1,59	26,3	0	0,62	1,17	1,81	2,42	1453	1030	2,92	2,07
				1,98	1,62	22,1	0,08	0,541	0,996	1,45	1,96	1358	993	2,69	1,97
				2,00	1,61	24,2	0,04	0,58	1,083	1,63	2,19	1406	1012	2,81	2,02
8	3	3,2-3,6		1,98	1,59	24,3	0	0,666	1,143	1,86	2,27	1408	1001	2,79	1,98

№п/п	№ скв.	Глубина отбора, м	Наименование	Плотность ρ , г/см ³	Плотность в сухом состоянии ρ_d , г/см ³	Влажность W_{tot} , %	Температура начала зам. (отг.) t_{bf} , °C	Коэффициент температуропроводности		Коэффициент теплопроводности		Удельная теплоемкость		Объемная теплоемкость	
								$a_{th} \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$a_f \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ_{th} , Вт/(м·К)	λ_f , Вт/(м·К)	C_{th} , Дж/(кг·К)	C_f , Дж/(кг·К)	$C_{pth} \cdot 10^6$, Дж/(м ³ ·К)	$C_{pff} \cdot 10^6$, Дж/(м ³ ·К)
			Песок пылеватый с раст. ост. и с ожелезнен.	2,03	1,63	24,5	0	0,664	1,062	1,90	2,16	1413	1003	2,87	2,04
				2,01	1,62	24,4	0	0,665	1,103	1,89	2,22	1411	1002	2,84	2,01
9	3	5,1-5,5	Супесь серая	1,99	1,58	25,6	0	0,554	0,933	1,60	1,92	1453	1035	2,89	2,06
				1,97	1,55	26,9	0	0,572	1,149	1,67	2,37	1481	1046	2,92	2,06
				1,98	1,57	26,2	0	0,563	1,041	1,63	2,14	1466	1040	2,90	2,06
10	4	5,0-5,2	Песок пылеватый	2,10	1,71	23,0	-0,1	0,690	1,308	2,00	2,80	1379	1020	2,90	2,14
				2,09	1,70	23,1	0	0,606	0,989	1,75	2,11	1381	1021	2,89	2,13
				2,09	1,70	23,1	-0,05	0,648	1,144	1,87	2,44	1381	1021	2,89	2,13
11	5	4,4-5,0	Супесь оторфф.	1,87	1,46	28,5	-0,12	0,442	0,967	1,28	2,03	1554	1121	2,91	2,10
				1,90	1,49	27,2	-0,56	0,48	1,133	1,39	2,39	1527	1111	2,90	2,11
				1,89	1,48	27,8	-0,34	0,461	1,05	1,34	2,21	1540	1116	2,91	2,11
12	5	5,0-5,7	Супесь темно-серая оторфван.	1,76	1,43	25,0	-0,06	0,590	0,827	1,54	1,56	1480	1068	2,60	1,88
				1,96	1,58	23,9	-0,03	0,325	0,847	0,93	1,76	1456	1059	2,85	2,08
				1,86	1,51	24,5	-0,04	0,458	0,837	1,25	1,66	1469	1064	2,73	1,98
13	6	3,4-3,5	Супесь	1,89	1,50	25,6	-0,53	0,606	1,023	1,66	2,10	1453	1084	2,75	2,05
				1,90	1,53	24,1	-0,62	0,685	1,042	1,85	2,12	1420	1071	2,70	2,04
				1,90	1,52	24,9	-0,58	0,646	1,033	1,76	2,12	1438	1078	2,73	2,05
14	6	5,0-5,2	Песок	2,02	1,63	24	0	0,767	1,127	2,13	2,35	1377	1030	2,78	2,08
				1,89	1,51	25,1	0,1	0,745	1,151	1,97	2,26	1402	1040	2,65	1,96
				1,95	1,57	24,5	0,05	0,756	1,139	2,05	2,30	1389	1035	2,71	2,02
15	7	1,5-1,6	Супесь серая оторфван.	1,85	1,37	35	-0,05	0,565	0,868	1,76	1,91	1681	1191	3,11	2,20
				1,94	1,45	34	-0,15	0,571	0,818	1,84	1,99	1663	1185	3,23	2,30

№п/п	№ скв.	Глубина отбора, м	Наименование	Плотность ρ , г/см ³	Плотность в сухом состоянии ρ_d , г/см ³	Влажность W_{tot} , %	Температура начала зам. (отг.) t_{bf} , °C	Коэффициент температуропроводности		Коэффициент теплопроводности		Удельная теплоемкость		Объемная теплоемкость	
								$a_{th} \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$a_f \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ_{th} , Вт/(м·К)	λ_f , Вт/(м·К)	C_{th} , Дж/(кг·К)	C_f , Дж/(кг·К)	$C_{pth} \cdot 10^6$, Дж/(м ³ ·К)	$C_{pf} \cdot 10^6$, Дж/(м ³ ·К)
				1,90	1,41	34,5	-0,1	0,568	0,839	1,80	1,89	1672	1188	3,18	2,26
16	7	5,3-5,6	Песок	2,06	1,65	24,5	0	0,765	1,359	2,19	2,85	1389	1018	2,86	2,10
				1,93	1,54	25,4	0	0,657	1,328	1,79	2,63	1409	1025	2,72	1,98
				2,01	1,61	25	0	0,711	1,343	2,00	2,76	1400	1022	2,81	2,05
17	13	2,1-2,3	Супесь, переслаивание с глиной	1,98	1,54	28,7	-0,74	0,611	0,809	1,88	1,86	1550	1164	3,07	2,30
				2,04	1,59	28,6	-0,93	0,602	0,88	1,90	2,09	1548	1163	3,16	2,37
				2,01	1,56	28,7	-0,84	0,605	0,845	1,89	1,98	1550	1164	3,12	2,34
18	14	2,4-2,6	Торф	1,15	0,34	240,0	-0,43	0,16	0,685	0,63	1,60	3435	2058	3,95	2,37
				1,10	0,28	290,0	-0,25	0,164	0,675	0,64	1,55	3533	2063	3,89	2,27
				1,13	0,31	265	-0,34	0,162	0,682	0,64	1,59	3488	2061	3,94	2,33
19	14	4,9-5,1	Супесь оторфованная	1,98	1,56	26,8	-0,38	0,65	1,012	1,95	2,32	1519	1158	3,01	2,29
				1,92	1,52	26,2	-0,42	0,439	0,92	1,27	2,04	1506	1153	2,89	2,21
				1,95	1,54	26,5	-0,4	0,545	0,961	1,61	2,17	1512	1155	2,95	2,25
20	15	2,0-2,2	Супесь	1,87	1,36	38	-0,22	0,483	0,85	1,54	1,87	1700	1175	3,18	2,20
				1,97	1,49	32,4	-0,25	0,484	0,879	1,52	1,97	1594	1136	3,14	2,24
				1,92	1,42	35,2	-0,24	0,484	0,865	1,53	1,92	1648	1156	3,16	2,22

Обозначения:

a_{th} , a_f – коэффициент температуропроводности соответственно талого и мерзлого грунта;

λ_{th} , λ_f – коэффициент теплопроводности соответственно талого и мерзлого грунта;

C_{th} , C_f – удельная теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунта;

C_{pth} , C_{pf} – объемная теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунта

2.5. Методы электроразведки на шельфе

Анализ физических свойств талых, промерзающих и мерзлых пород шельфа арктических морей, выполненный в Главах 1–2, свидетельствует, что наиболее информативным физическим свойством горных пород при картировании талых мерзлых пород является удельное электрическое сопротивление (УЭС). Лабораторные испытания на породах различного состава показали, что при замерзании грунтов УЭС увеличивается в $1-10^5$ раз, тогда как скорости продольных волн увеличиваются в 1,5–2 раза. Поэтому для исследования субмаринной криолитозоны автор выбрал технологии электроразведки, как наиболее информативные для решения геокриологических задач. Электромагнитные зондирования являются второй составляющей комплексного анализа геолого–геофизических данных для изучения многолетнемерзлых пород и газовых гидратов на арктическом шельфе (Основы, 2020).

Основы теории электромагнитных методов геофизики.

Предварительные замечания

В основе теории электромагнитных (ЭМ) методов геофизики лежит классическая электродинамика (Тамм, 1949; Стрэттон, 1948). История ее создания охватывает конец XVIII и более половины XIX века и включает открытия, сделанные Шарлем де Кулоном, Хансом Кристианом Эрстедом, Андре-Мари Ампером, Майклом Фарадеем и Джеймсом Максвеллом. Последний сформулировал систему уравнений, полностью определяющих ЭМ поле, которую мы называем системой уравнений Максвелла.

В отличие от созданной позднее квантовой электродинамики, оперирующей на атомно-молекулярном уровне, в классической электродинамике рассматриваются сплошные среды, обладающие макроскопическими ЭМ свойствами, которые могут плавно или скачкообразно меняться в пространстве. Постановка задачи электромагнитного зондирования в геофизике принципиально

важна в наших исследованиях. Согласно исследованиям, проведенным в Главах 1 и 2, одни и те же горные породы могут иметь как свойства проводника, так и диэлектрика в зависимости от их температуры.

Горные породы чаще всего представляют собой многофазные среды (твердый скелет, заполняющие поры флюиды). Из-за электрических процессов, происходящих на границе двух фаз, могут возникать поляризационные явления, которые выходят за рамки электродинамики. Эти эффекты искажают ЭМ геофизические данные, однако во многих случаях могут дать полезную дополнительную информацию о геоэлектрическом строении земли. Мы оставим теорию поляризационных эффектов за рамками данной главы, поскольку в данной работе они используются ограниченно. Однако заметим, что для изучения многолетнемерзлых пород на суше, и особенно для незасоленных пород, поляризационные эффекты часто вносят решающий вклад в регистрируемое поле при электромагнитных зондированиях.

Прежде, чем непосредственно перейти к изложению основ теории ЭМ поля, введем понятие физического поля и определим операторы его дифференцирования.

Дифференцирование полей, уравнения стационарного поля

Сформулируем три фундаментальные аксиомы о физическом поле, которые обобщают наш опыт и служат основой для всех дальнейших математических построений (Альпин, 1966; Кауфман, 2000; Кауфман и др., 2016):

1. Поле возникает в результате действия особых физических объектов. Если нет этих объектов, то нет и поля. Эти объекты – возбудители поля.
2. Возбудители поля занимают ограниченную часть пространства.
3. Поле распределено вблизи возбудителей поля и непрерывно убывает до нуля при удалении от возбудителей.

Физическое поле может быть скалярным (иметь одну компоненту в каждой точке пространства) и векторным (три компоненты).

При дифференцировании скалярного поля $a(\vec{r})$ (\vec{r} - радиус-вектор точки наблюдения) в декартовой системе координат можно вычислить три частные производные

$\frac{\partial a}{\partial x}$, $\frac{\partial a}{\partial y}$, $\frac{\partial a}{\partial z}$. Эти три частные производные образуют вектор градиента:

$$\text{grad} a = \frac{\partial a}{\partial x} \mathbf{1x} + \frac{\partial a}{\partial y} \mathbf{1y} + \frac{\partial a}{\partial z} \mathbf{1z}, \quad (2.1)$$

где $\mathbf{1x}$, $\mathbf{1y}$ и $\mathbf{1z}$ - орты в декартовой системе координат. В других системах координат (цилиндрической, сферической) правая часть формулы (2.1) будет существенно иной, поэтому удобно использовать краткое инвариантное по отношению к выбору системы координат выражение $\text{grad} a$.

При дифференцировании векторного поля $\vec{A}(\vec{r})$ можно взять девять частных производных. В теории поля применяются две их комбинации, называемые дивергенцией и ротором поля, и в декартовой системе координат записываемые в виде:

$$\text{div} \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}, \quad (2.2)$$

$$\text{rot} \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{1x} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{1y} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{1z}. \quad (2.3)$$

Как следует из этих формул, $\text{div} \vec{A}$ является скалярной, а $\text{rot} \vec{A}$ - векторной величиной. Как и градиент, эти операторы выбраны таким образом, что являются инвариантными по отношению к выбору системы координат.

Возможно также вычисление вторых производных скалярных и векторных полей, при этом важную роль играет оператор Лапласа или лапласиан:

$$\Delta a = \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

$$\Delta \vec{A} = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} \mathbf{1x} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} \mathbf{1y} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \mathbf{1z} \quad (2.5)$$

Для физических полей доказаны теоремы единственности. Для простоты, рассмотрим случай стационарных во времени полей u и \vec{B} . Теоремы единственности утверждают, что в этом случае скалярное поле u может быть однозначно определено уравнением:

$$\text{grad } u = \vec{B}, \quad (2.6)$$

а векторное поле \vec{B} – системой уравнений:

$$\begin{cases} \text{div} \vec{B} = q \\ \text{rot} \vec{B} = \vec{j} \end{cases} \quad (2.7)$$

В правой части этих уравнений стоят возбудители поля, при этом q называется источником, а \vec{j} – вихрем векторного поля, они имеют наглядный смысл в гидродинамике, когда рассматривается поле течения.

Также скалярное и векторное поля однозначно определяются уравнениями Пуассона:

$$\Delta u = q, \quad (2.8)$$

$$\Delta \vec{B} = \text{grad } q - \text{rot } \vec{j} \quad (2.9)$$

Электромагнитное поле в вакууме

Если подходить к электродинамике в исторической ретроспективе, переходя от ранее открытых простых законов к сложным (Фейман и др, 1966; Кауфман и др, 2016), то начать следует с закона Кулона о взаимодействии электрических зарядов, который в дифференциальной форме записывается как

$$\text{div} \vec{E} = \frac{q}{\varepsilon_0}, \quad (2.10)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля, q – плотность электрических зарядов, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Уравнение говорит о том, что источниками электрического поля являются электрические заряды.

Движущиеся электрические заряды создают электрический ток. Плотность этого тока \vec{j} пропорциональна скорости изменения электрического заряда во времени:

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.11)$$

Закон Ампера фиксирует наблюдение о том, что электрический ток создает магнитное поле, действующее на другие токи. В дифференциальной форме он выглядит следующим образом:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \quad (2.12)$$

где \vec{B} – магнитная индукция, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Связь между переменными электрическим и магнитным полями была установлена законом Фарадея:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.13)$$

свидетельствующим, что переменное магнитное поле является вихрем (возбудителем) электрического поля.

Магнитные заряды в природе не существуют (не обнаружены), поэтому у магнитного поля нет источников:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Обобщив эти законы и теоретически предсказав существование тока смещения, Максвелл сформулировал систему уравнений ЭМ поля:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{(I)} \quad \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\
 \text{(II)} \quad \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \text{(III)} \quad \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\
 \text{(IV)} \quad \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{q}{\varepsilon_0}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Первое уравнение говорит о том, что вихрями магнитного поля являются электрический ток (закон Ампера) и изменение электрического поля во времени (ток смещения). Второе представляет собой закон Фарадея и гласит, что вихрями магнитного поля является переменное электрическое поле. Третье уравнение свидетельствует об отсутствии магнитных зарядов. Четвертое является законом Кулона и говорит, что источниками электрического поля являются электрические заряды.

Электромагнитное поле в веществе

Между зарядами и нейтральной частью вещества существуют связи. Они ограничивают распределение и движение зарядов, поэтому их необходимо учитывать. Это возможно на уровне микрополя, на атомно-молекулярном уровне (квантовая теория поля), и на уровне макрополя, оперируя пространственно осредненными величинами (макроскопическая теория поля).

В макроскопической модели вещества оно рассматривается как сплошная среда, содержащая подвижные и неподвижные заряды. Свойства вещества описываются параметрами ε (диэлектрическая проницаемость), μ (магнитная проницаемость), σ (электропроводность).

Свободные заряды перемещаются на расстояния, существенно превышающие размеры молекул (валентные электроны металлов, ионы электролитов), их плотность – $q^{св}$. Связанные заряды ($q^{свз}$) входят в состав молекул, перемещаются в их пределах. Полная плотность зарядов q равна сумме свободных и связанных зарядов:

$$q = q^{св} + q^{свз}. \quad (2.15)$$

Проводники – среды, содержащие свободные заряды. Под действием внешнего электрического поля \vec{E} возникает движение электрических зарядов, т.е. ток проводимости. Диэлектрики – вещества, содержащие только связанные заряды. Под действием постоянного поля \vec{E} ток не течет, но заряды могут смещаться, т.е. возникает поляризация.

Упорядоченное движение свободных зарядов – ток проводимости \vec{j}^{np} . Опыт показывает, что в проводнике:

$$\vec{j}^{np} = \sigma \vec{E} \quad (2.16)$$

Приведенное соотношение – закон Ома в дифференциальной форме. Здесь σ – удельная электропроводность, она связана с удельным сопротивлением: $\rho = 1 / \sigma$.

Под действием поля \vec{E} в диэлектриках происходит деформация нейтральных и переориентация полярных молекул. Вещество превращается в поляризованный объемный источник, и к внешнему полю \vec{E} добавляется собственное поле этого источника. Можно сказать, что в среде течет поляризационный ток плотностью:

$$\vec{j}^{пол} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}, \quad (2.17)$$

где $\vec{P} = (\varepsilon - \varepsilon_0) \vec{E}$ – поляризация вещества, зависящая от напряженности электрического поля и контраста диэлектрической поляризации вещества и вакуума. Важно отметить, что данное явление сказывается только на высоких частотах и не влияет на результаты низкочастотных ЭМ исследований.

В веществе текут молекулярные токи, создающие квазипостоянное магнитное поле (намагниченность вещества). Плотность тока намагничивания:

$$\vec{j}^{нам} = rot \vec{\mathfrak{S}}, \quad (2.18)$$

где \mathfrak{S} – намагниченность вещества. Эта формула справедлива для диамагнетиков и парамагнетиков и, ввиду постоянной структуры поля, оно не сказывается на результатах электромагнитных исследований.

Уравнения Максвелла в веществе, с учетом влияния сторонних возбудителей (сторонних зарядов q^{cm} и сторонних токов \vec{J}^{cm}) записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j}^{np} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}^{cm} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} &= q^{c\delta\delta} + q^{cm} \end{aligned} \right\}, \quad (2.19)$$

где \vec{D} и \vec{H} – электрическая индукция и напряженность магнитного поля. Эти уравнения необходимо дополнить уравнениями непрерывности токов:

$$\operatorname{div} \vec{j}^{np} = -\frac{\partial q^{c\delta\delta}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \vec{j}^{cm} = -\frac{\partial q^{cm}}{\partial t}, \quad (2.20)$$

а также материальными уравнениями:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{j}^{np} = \sigma \vec{E}. \quad (2.21)$$

Несмотря на то, что магнитных зарядов не существует, в ряде случаев удобно предположить наличие эквивалентных магнитных зарядов и, соответственно, магнитных токов. В ряде задач это обеспечивает получение более компактных решений. Тогда система уравнений Максвелла запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}^* &= \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}^*}{\partial t} - \mu \vec{j}^{M_{cm}} \\ \operatorname{div} \vec{H}^* &= q^{M_{cm}} \\ \operatorname{div} \vec{E} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.22)$$

где $\vec{H}^* = \vec{H} - \vec{\mathcal{S}}^{cm}$, а плотность стороннего магнитного тока и сторонних магнитных зарядов связаны соотношением:

$$\operatorname{div} \vec{j}^{M_{cm}} = -\frac{\partial q^{M_{cm}}}{\partial t}. \quad (2.23)$$

Модели электромагнитного поля

Электростатическая модель. Задано распределение зарядов $q^{cm} = \text{const}(t)$, тогда $\vec{j}^{cm} = 0$. Кроме того, $q^{c\delta} = 0$, и, следовательно, $\vec{j}^{np} = 0$. Существует электрическая поляризация вещества, при этом $q^{cs} = \text{const}(t)$ и $\vec{j}^{nol} = 0$. Система уравнений Максвелла принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}^{np} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}^{cm} = 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} = q^{c\delta} + q^{cm} = q^{cm} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

У магнитного поля нет возбудителей, оно не рассматривается, тогда остается:

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{E} = 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} = q^{cm} \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

Выполняется граничное условие $[E_\tau]_s = 0$. Вертикальная компонента поля \vec{D} в общем случае терпит разрыв: $[D_n]_s = q^{c\delta}$, но поскольку в модели нет свободных зарядов, $[D_n]_s = 0$.

Поле \vec{E} потенциально, и можно ввести электрический потенциал u_E :

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} u_E.$$

Модель используется в методе естественного электрического поля. Похожим уравнениям удовлетворяет гравитационное поле (вместо зарядов в них входят массы).

Магнитоэлектростатическая модель. Существуют замкнутые токи $\vec{j}^{cm} = const(t)$. Происходит намагничивание магнетиков. Рассматривается только магнитное поле:

$$\left. \begin{aligned} rot\vec{H} &= \vec{j}^{cm} \\ div\vec{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Рассматриваются модели с различными распределениями μ и \vec{j}^{cm} .

Граничное условие для поля \vec{H} : $[H_\tau]_s = 0$. В общем случае на границах терпит разрыв вертикальная компонента поля \vec{B} , но в данной модели оно не имеет источников, и $[B_n]_s = 0$.

Можно построить магнитоэлектростатическую модель на основе фиктивных магнитных зарядов и магнитных токов. При этом $\vec{j}^{M_{cm}} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{\zeta}^{cm} = 0$, а система уравнений будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} rot\vec{H}^* &= 0 \\ div\vec{H}^* &= q^{M_{cm}} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Поле \vec{H}^* потенциально, и можно ввести магнитный потенциал u_H : $\vec{H}^* = -grad u_H$.

Модель используется в магниторазведке

Стационарная модель. В проводниках текут токи $\vec{j}^{np} = const(t)$, создающие магнитное поле. Уравнения Максвелла приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j}^{np} + \vec{j}^{cm} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} &= q^{c\sigma\delta} + q^{cm} \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Граничные условия: $[E_\tau]_s = 0$, $[H_\tau]_s = 0$.

В однородной среде поле \vec{E} удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta \vec{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{E} - \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{\operatorname{grad} q^{cm}}{\varepsilon} \quad (2.29)$$

Поле \vec{E} является потенциальным, $\vec{E} = -\operatorname{grad} u_E$.

Модель лежит в основе теории электроразведки постоянным током

Квазистационарная модель. Рассматривается медленно меняющееся поле в проводящей среде. Токами смещения пренебрегаем (по сравнению с токами проводимости):

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \vec{j}^{cm} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} &= q^{c\sigma\delta} + q^{cm} \\ [E_\tau]_s &= [H_\tau]_s = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

В однородной среде поля \vec{E} и \vec{H} удовлетворяют уравнениям диффузии, например,

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{E} - \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} &= \frac{\operatorname{grad} q^{cm}}{\varepsilon} + \mu \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\operatorname{grad} q^{cm}}{\varepsilon} + \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \frac{\partial \vec{j}^{cm}}{\partial t} \\ \Delta \vec{E} - \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \frac{\operatorname{grad} q^{cm}}{\varepsilon} + \mu \frac{\partial \vec{j}^{cm}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Модель используется в низкочастотной (квазистационарной) электроразведке при распространении электрического тока в проводниках.

Волновая модель. Рассматривается быстро меняющееся поле. Пренебрегаем токами проводимости по сравнению с токами смещения. Поле распространяется как электромагнитная волна, отрываясь от источника и существуя за счет внутренних энергетических преобразований:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}^{cm} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} &= q^{c\delta} + q^{cm} \\ [E_r]_s &= [H_r]_s = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

В однородной среде поля \vec{E} и \vec{H} удовлетворяют волновым уравнениям, например:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{E} - \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} &= \frac{\operatorname{grad} (q^{c\delta} + q^{cm})}{\varepsilon} + \mu \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\operatorname{grad} (q^{c\delta} + q^{cm})}{\varepsilon} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial \vec{j}^{cm}}{\partial t} \\ \Delta \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= \frac{\operatorname{grad} (q^{c\delta} + q^{cm})}{\varepsilon} + \mu \frac{\partial \vec{j}^{cm}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Используется в высокочастотной (волновой) электроразведке при распространении электромагнитного поля в диэлектриках.

Разделение уравнений Максвелла

Для простоты ограничимся случаем однородной или кусочно-однородной среды. Уравнения Максвелла при этом имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}^{cm} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{E} &= q^{cm} / \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Разделим эту систему на уравнения для только электрического и только магнитного полей.

Применим ко второму уравнению Максвелла операцию ротирования:

$$\text{rot rot}\vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \text{rot}\vec{H} \quad (2.35)$$

Представим $\text{rot rot}\vec{E} = \text{grad div}\vec{E} - \Delta\vec{E}$ и возьмем $\text{rot}\vec{H}$ из 1-го уравнения:

$$\text{grad div}\vec{E} - \Delta\vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma\vec{E} + \varepsilon \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \vec{j}^{cm} \right) \quad (2.36)$$

Возьмем $\text{div}\vec{E}$ из 4-го уравнения, перенесем слагаемые с \vec{E} в левую часть и изменим знак:

$$\Delta\vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = \frac{\text{grad } q^{cm}}{\varepsilon} + \mu \frac{\partial\vec{j}^{cm}}{\partial t} \quad (2.37)$$

Теперь применим операцию ротирования к первому уравнению Максвелла:

$$\text{rot rot}\vec{H} = \sigma \text{rot}\vec{E} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \text{rot}\vec{E} + \text{rot } \vec{j}^{cm} \quad (2.38)$$

Представим $\text{rot rot}\vec{H} = \text{grad div}\vec{H} - \Delta\vec{H}$ и возьмем $\text{rot}\vec{E}$ из 1-го уравнения:

$$\text{grad div}\vec{H} - \Delta\vec{H} = -\mu\sigma \frac{\partial\vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} + \text{rot } \vec{j}^{cm} \quad (2.39)$$

Возьмем $\text{div}\vec{H}$ из 3-го уравнения, перенесем слагаемые с \vec{H} в левую часть и изменим знак:

$$\Delta\vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial\vec{H}}{\partial t} = -\text{rot } \vec{j}^{cm} \quad (2.40)$$

Получены два уравнения, одно из которых содержит только поле \vec{E} , а другое – только поле \vec{H} . Эти уравнения носят название телеграфных.

Если пренебречь 1-й производной по времени (волновая модель), получим неоднородное волновое уравнение. При этом токи проводимости отсутствуют, скорость распространения ЭМ волны $v_s = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$. Случай при распространении ЭМ волны в диэлектриках (мерзлые породы). Если пренебречь 2-й производной

(квазистационарная модель), получим неоднородное уравнение диффузии или теплопроводности. Тогда отсутствуют токи смещения, скорость диффузионного процесса $v_0 = 1/(\mu\sigma)$. Случай при распространении электрического тока проводниках (талые породы).

Свойства ЭМ поля определяет параметр $|kr|$, где k – волновое число, r – расстояние от источника до приёмника ЭМ поля:

$$k = \sqrt{i\omega \mu_0 \sigma}, \quad (2.41)$$

где i – мнимая единица, ω – круговая частота, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, σ – электропроводность среды.

Если $|kr| \gg 1$, большие r , большие σ , говорят о поле в дальней зоне (ДЗ) источника.

Если $|kr| \ll 1$, малые r , малые σ , говорят о поле в ближней зоне (БЗ) источника.

Рассмотрим зависимости кажущегося сопротивления (КС) для различных установок и зон ЭМ поля источника. КС определяется УЭС среды и геометрией установки, но над однородным пространством равно УЭС среды.

КС в методах постоянного тока вычисляется по формуле:

$$\rho_k = k \frac{\Delta U}{I}, \quad \text{где } k = 2\pi / \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (2.42)$$

Здесь k – геометрический коэффициент четырехэлектродной установки, ΔU – разность потенциалов на MN , I – сила тока в AB (Электроразведка..., 1989).

КС в методе ЧЗ для магнитного гармонического диполя в дальней зоне определяется как:

$$\rho_\omega = i\omega \mu_0 \frac{2\pi r^5}{9M} \text{ Hz}, \quad (2.43)$$

где M – момент диполя, определяемый как произведение силы тока на длину питающей линии AB (Электроразведка..., 1989).

Формула 2.43 (зависимость магнитного поля от сопротивления среды) использовалась при разработке ТЗ на аппаратно-программный комплекс HF-EM, а зависимости определяющие ДЗ и БЗ в 2.43 учтены при описании технологии работ методом ЧЗ для транзитной зоны суша-шельф, подтвержденной патентом № 2280269.

КС в методе ЗСБ для нестационарного электрического диполя в ближней зоне:

$$\rho_{\tau} = \left(\frac{\mu_0}{\pi t} \right)^3 \left(\frac{M}{12E\varphi(t)} \right)^2, \quad \rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{M \cdot r \sin\varphi}{5t \partial Hz(t)/\partial t} \right)^{2/3}. \quad (2.44)$$

КС в методе ЗСБ для нестационарного магнитного диполя в ближней зоне:

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{\pi t} \left(\frac{M r}{40t E\varphi(t)} \right)^{2/3}, \quad \rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{\pi t} \left(\frac{M}{20t \partial Hz(t)/\partial t} \right)^{2/3}. \quad (2.45)$$

где M – момент диполя, r – расстояние от центра источника до центра приёмника установки (Электроразведка..., 1989).

Для установки «петля в петле» в ближней зоне источника (в приближении поля в центральной точке круглой питающей петли):

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{\pi t} \left(\frac{M R}{40t \partial Hz(t)/\partial t} \right)^{2/3}. \quad (2.46)$$

где радиуса R – радиус петли (Пушкарев..., 2017).

По формулам 2.44-2.46 рассчитывались удельные электрические сопротивления при проведении работ на акватории арктического шельфа по технологии ЗСБ, подтвержденной патентом № 2754364.

Важным следствием решения задачи электромагнитного зондирования является зависимость расчетного математического аппарата от частоты ЭМ поля, сопротивления среды и размеров установки. Эту особенность ЭМ зондирований необходимо иметь ввиду при организации работ на шельфе и в транзитной зоне суша-шельф, где в непосредственной близости друг с другом могут располагаться

сильные проводники (криопэги) и диэлектрики (льды, многолетнемерзлые породы).

*Сравнительный анализ информативности различных технологий
электроразведки*

Все технологии электроразведки можно разделить на две большие группы: методы сопротивлений, использующие постоянные электрические поля, и методы электромагнитных зондирований, использующие переменные электромагнитные поля (Хмелевской, 1981). Методы сопротивлений хорошо зарекомендовали себя на суше и акватории для решения малоглубинных инженерно-геологических задач (Кошурников, Зыков, Панин и др., 2008). Особенностью методов является необходимость гальванических заземлений и наличие ограничений, связанных с высокоомными экранами (рис. 2.16). Методы электромагнитных зондирований обладают большей глубиной и не испытывают ограничений при наличии в разрезе высокоомных экранов (например, многолетнемерзлых пород), как было показано в работах автора (Кошурников, Зыков, Пушкарев и др., 2008; Панин и др., 2012; Кошурников и др., 2019).

К достоинствам *первой* группы методов можно отнести простоту математического аппарата для решения обратной задачи, к недостаткам — необходимость увеличивать глубину исследований за счет увеличения длины установки.

К достоинствам второй группы методов можно отнести частотный принцип зондирования и возможность увеличивать глубину исследования за счет понижения частоты электромагнитного поля, а не за счет увеличения генераторных установок (Основы..., 2020). К недостаткам второй группы методов можно отнести сложность математического аппарата для решения обратной задачи (Бердичевский и др., 1999).

На акватории используют следующие методы электромагнитных зондирований: ЗСБ, МТЗ, CSEM (Дмитриев, 2014; Зыков и др., 2008; Зыков и др., 2009; Исаев и др., 2018).

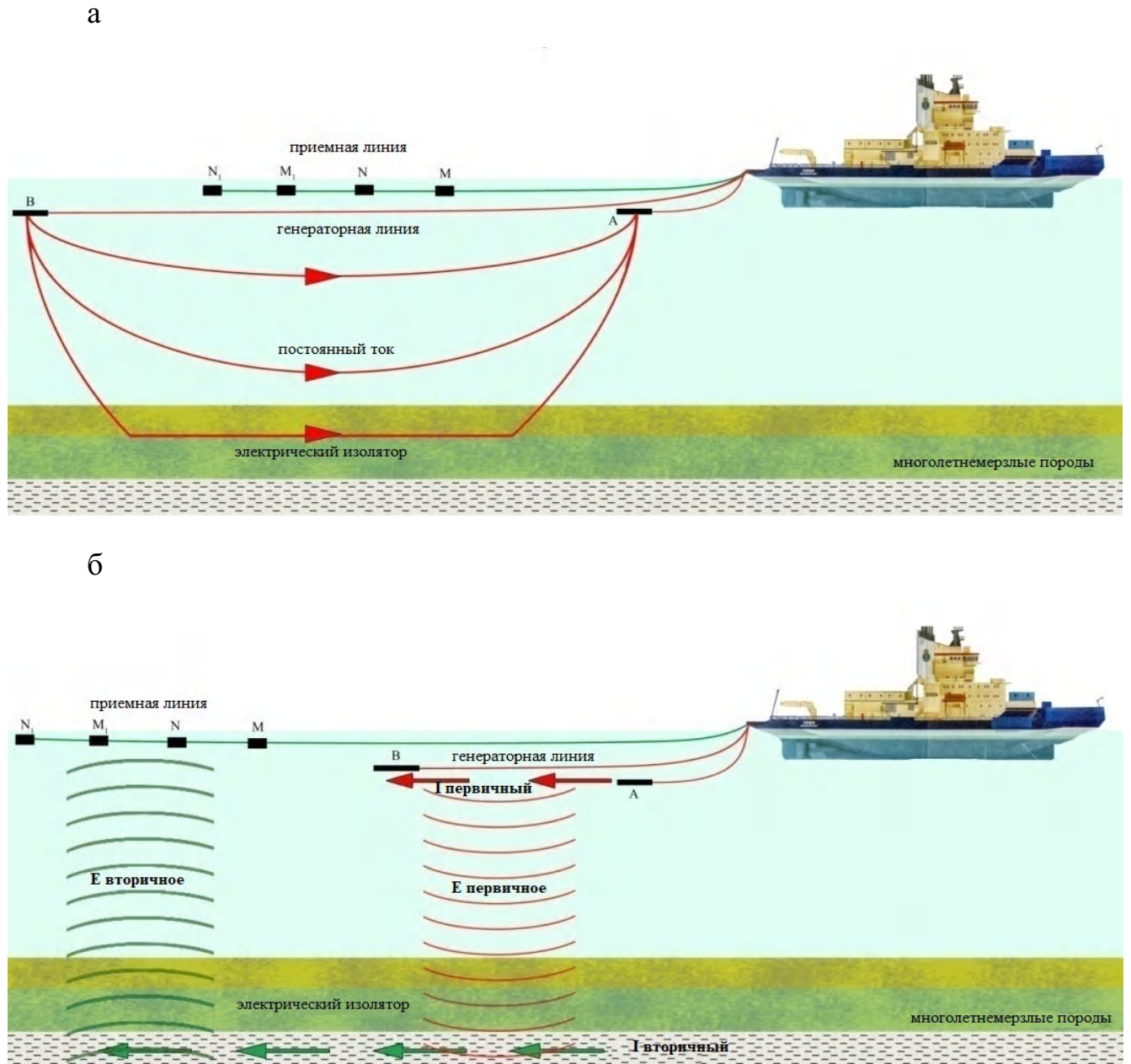


Рис.2. 16. Основные группы методов электроразведки.

а 1 группа – методы сопротивлений,

б 2 группа – методы переменных электромагнитных полей.

Опыт автора при выполнении геофизических исследований на арктическом шельфе свидетельствует, что наиболее информативными в разный периода года

являются технологии ЗСБ при решения геокриологических задач. Анализ чувствительности технологий электромагнитных зондирований к высокоомным средам (субмаринной криолитозоне) показывает, что наиболее информативными технологиями для решения таких задач являются зондирования, использующие электрический диполь (ЗСБ). Результаты математического моделирования свидетельствуют о большей чувствительности технологий ЗСБ к наличию высокоомных зон (ММП), чем, например, технологии МТЗ (рис. 2.17).

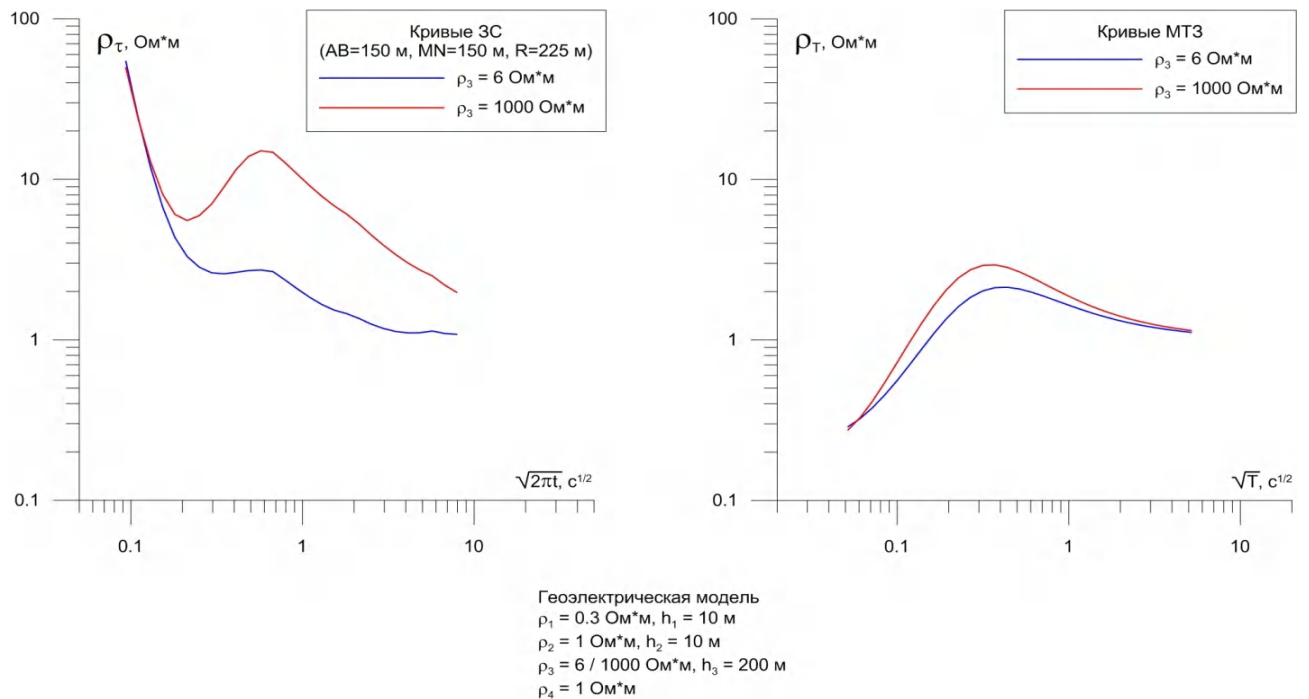


Рис. 2.17. Математическое моделирование чувствительности кривых ЗСБ (слева) и МТЗ (справа) к высокоомному слою. Модель в соответствии с геоэлектрической моделью Няме́йского ЛУ, Карское море. Глубина воды 10 м.

Для выполнения модельных расчет использовался геоэлектрический разрез одного из участков приямальского шельфа. Первый слой в разрезе имеет сопротивление 0,3 Ом·м и мощность 10м (морская вода), второй слой имеет сопротивление 1 Ом·м и мощность 10м (охлажденные породы), третий слой задавался 6/1000 Ом·м и мощность 200м (мерзлые породы). Подстилает разрез однородное полупространство с сопротивлением 1 Ом·м (талые породы).

Расчет кривых кажущегося сопротивления для случая установки ЗСБ приведен на левом рисунке, а для случая установки МТЗ – на правом. Математическое моделирование показало, что при увеличении сопротивления третьего слоя от 6 (синяя кривая) до 1000 Ом·м (красная кривая) большей чувствительностью обладают технологии ЗСБ (рис. 2.17 левый).

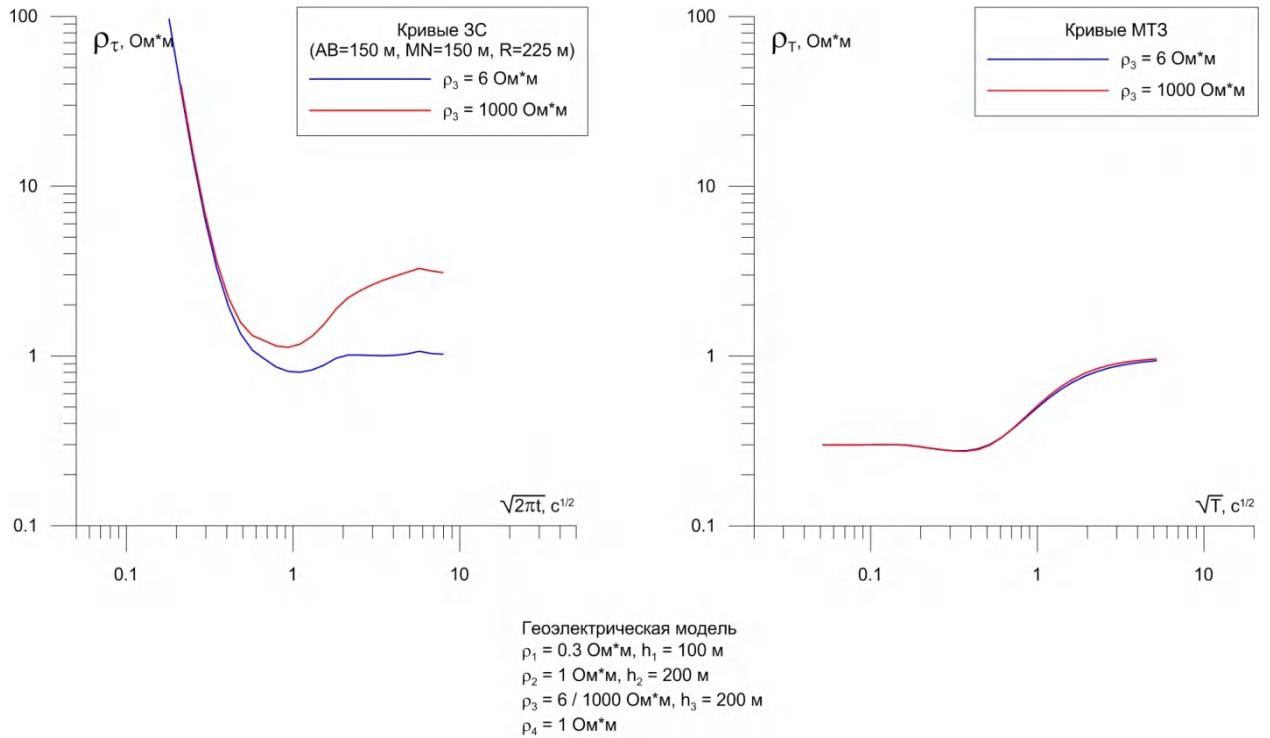


Рис. 2.18. Математическое моделирование чувствительности кривых ЗСБ (слева) и МТЗ (справа) к высокоомному слою. Модель в соответствии с геоэлектрической моделью Няме́йского ЛУ, Карское море. Глубина воды 100 м.

Математическое моделирование свидетельствует, что чувствительность кривых ЗС выше к высокоомному слою, чем кривых МТЗ, а на глубине 100 м технологии МТЗ уже не смогут отличить слой 6 Ом·м и 1000 Ом·м. (рис. 2.18).

Суммируя все вышесказанное, для картирования субмаринных мерзлых толщ автор выбрал технологию зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) на акватории и технологию частотных зондирований (ЧЗ) для работы в транзитной зоне суша–шельф. Выбор технологии зондирования для условий арктического шельфа был сделан в результате опытно-конструкторских работ автора 2006–2010 гг., подтвержденного патентами автора №№ 2280269 и 2754364 и опытно-методическими работами автора (Выполнение ...

ООО «МГУ-геофизика» 2010-2022; Картирование ООО «МГУ-геофизика» 2014-2015, Кошурников, Зыков, Панин и др, 2008; Кошурников, Зыков, Пушкарев и др, 2008; Кошурников и др, 2016; Кошурников, Демидов и др., 2019; Кошурников, Котов, Агапкин, 2019).

Аппаратура для выполнения ЗСБ на шельфе

Для выполнения морских электроразведочных исследований методом ЗСБ согласно Техническому заданию, разработанному автором, ООО «Геосигнал» сконструировало многофункциональный, многоканальный (3 и более каналов) морской телеметрический электроразведочный комплекс «ТЕЛСС-3-Э» (рис. 2.19). С помощью комплекса «ТЕЛСС-3-Э» автор выполнил работы в заливе губы Буор-Хая, прол. Дмитрия Лаптева, северном полигоне на шельфе моря Лаптевых (2012 г.), на геотраверсе о. Колгуев – Тикси на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых морей (2012 г.), в каньоне Геральда на шельфе Чукотского



Рис. 2.19. Аппаратурный комплекс «ТЕЛСС-3-Э». Сертификат соответствия геофизической продукции приведен в приложении Г.

моря (2014 г.), на приямальском шельфе в районе о-ва Белый на шельфе Карского моря (2015, 2017), на геотраверсе о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.), на геотраверсе о. Белый – Карские Ворота на шельфе Карского моря (2017 г.), в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых (2017 г.), на геотраверсе о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.). Общий объем работ составил более 240000 зондирований становлением поля.

Комплекс «ТЕЛСС-3-Э» работает как в телеметрическом, так и в линейном режимах, состоит из блоков, которые соединены между собой сетевыми интерфейсами. Технические характеристики комплекса приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Технические характеристики аппаратуры «ТЕЛСС-3-Э»

Количество каналов	6
Разрядность АЦП	32 бита
Шаг дискретизации	0,25 мс
Степень шага квантования	$\leq 0,6\text{мкВ}$
Входное сопротивление	$\leq 300 \text{ МОм}$
Коэффициент усиления (устанавливается программно)	от 1 до 128 с геометрическим шагом 2 раздельно по каждому каналу
Формирование второй разности потенциалов аналоговой схемой перед поступлением на вход АЦП - позволяет подавить синфазные помехи (теллурические токи)	диапазон до 160 дБ
Балансировка нуля (сдвиг уровня постоянной составляющей)	Есть
Аккумуляторная батарея	12 В
Температурный диапазон, °С	-40 - +70
Временной диапазон измерений	2 – 120000 мс
Сила тока в генераторной установке	до 400 А

Основной отличительной особенностью нового аппаратного комплекса согласно требованиям Технического задания является наличие независимых измерительных каналов измерения сигнала на приемных линиях друг от друга. Эта уникальная особенность измерительного комплекса делает измерительную часть более жизнеспособной в полевых условиях (при выходе из строя одного из каналов, остальные каналы продолжают работать в обычном режиме) с одной стороны, исключает взаимовлияния каналов друг на друга, что резко повышает чувствительность аппаратуры, с другой стороны. Данная архитектура измерительного комплекса заимствована из опыта конструирования сейсморазведочной аппаратуры и ранее не применялась в электроразведке. Сравнение архитектуры различных измерителей ЭМ поля приведено на рисунках 2.20 и 2.21).



Рис. 2.20. Единая измерительная плата аппаратного комплекса ЗСБ Цикл-7. Изготовитель ООО «НТФ Эльта-Гео».



Рис. 2.21. Три разнесенных измерительных канала аппаратного комплекса ЗСБ «ТЕЛСС-3-Э». Изготовитель ООО «Геосигнал».

Для выполнения электроразведочных исследований в транзитной зоне суша–шельф автором была разработана технология малоглубинных частотных зондирований (патент № 2280269, приложение Е 1). По техническому заданию, разработанному автором, ООО «Измерительные системы» сконструировало комплект аппаратного комплекса «HF-EM» для работ методом малоглубинных частотных зондирований (рис. 2.22). С помощью комплекса «HF-EM» автор выполнил работы на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.), в заливе Шарапов Шар на шельфе Карского моря (2010 г.), в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015 г.). Общий объем работ составил более 1000 частотных зондирований.



Рис. 2.22. Аппаратурный комплекс «HF-EM». Заключение соответствия заводским характеристикам приведено в приложении Ж.

Аппаратурный комплекс «HF-EM» используется при проведении геофизических работ методами высокочастотной электроразведки. Область применения аппаратуры ограничивается решением гражданских задач, связанных с изучением электрических свойств горных пород.

Технические характеристики комплекса приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Технические характеристики аппаратуры «HF-EM»

Рабочие частоты (кГц): высокие / низкие	1024,512, 362, 256, 181, 128, 90.5, 64, 45.3 / 45.3, 32, 22.6, 16, 11.3, 8, 5.66, 4,1
Синхронизация приборов	Через Bluetooth, не реже 1 раза в сутки
Габариты корпуса	235 x 170 x 80 мм
Степень защиты	IP-65
Материал корпуса	Алюминиевый сплав
Источники питания	Два внутренних аккумулятора 6 В, 7 А*ч и внешний источник питания 9–15 В
Длительность работы от внутренних аккумуляторов	Не менее 12 часов
Диапазон рабочих температур	От –20 °С до +50 °С

Максимальная выходная мощность	100 Вт
Максимальное выходное напряжение	100 В
Максимальный выходной ток	1 А (на самой низкой частоте диапазона)
Изменение тока с ростом частоты	Обратно пропорционально
Форма выходного тока	Треугольные разнополярные импульсы без паузы, с одинаковыми углами наклона фронтов
Нагрузка (питающие антенны)	Две многовитковые (высоко- и низкочастотная)
Вес	Не более 5 кг
Текстовый ЖКИ	4 строки по 20 символов
Разъемы	ВЧ-антенна, НЧ-антенна, питание
Диапазон входных напряжений	От -2 В до +2 В
Минимальный измеряемый сигнал	5 мкВ
Максимальное усиление	80 дБ
Число разрядов АЦП	16
Микропроцессор	АТmega128
Энергонезависимая память	4 Мбит
Датчик	Многовитковая приемная антенна
Вес	Не более 5 кг
Графический ЖКИ	240 x 180 точек
Клавиатура	16 кнопок (4 x 4)
Разъемы	Приемная антенна, питание

Методика выполнения ЗСБ, ЧЗ на шельфе

Для изучения многолетнемерзлых пород на шельфе методом ЗСБ в качестве приемно-излучающей системы использовалась многоканальная дипольно-осевая морская установка ДОС-2М. В ней питающий и приемные диполи соединены последовательно (рис. 2.23). Параметры установки: длины измерительных и генераторных диполей, разносы были определены по результатам математического моделирования и составили АВ=150 м, MN=150 м, R=150 м, ток 200–400 А для изучения субмаринных мерзлых пород на глубины до 500–1000 м.

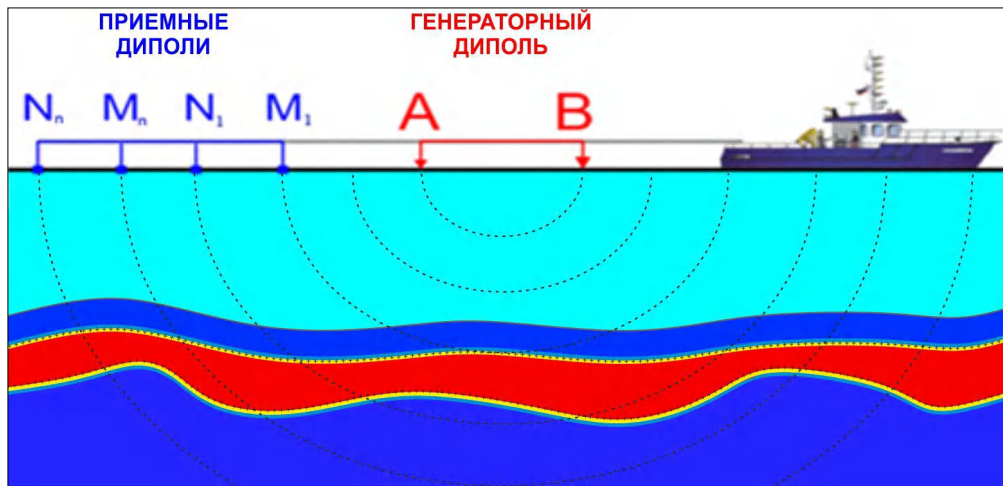


Рис. 2.23. Схематичное изображение установки ДОС-2М и работы методом ЗСБ.

При подаче прямоугольных импульсов постоянного тока в генераторный диполь АВ (рис. 2.23) возникает первичное электромагнитное поле в среде. В случае наличия проводящих зон в среде, в них возникают вторичные токи, порождающие вторичное электромагнитное поле. Измерение напряженности вторичного поля на разных периодах позволяет получить информацию о среде на разных глубинах. На малых временах становления вторичного электромагнитного поля изучается верхняя часть разреза, на больших – нижняя часть разреза. Приемными диполями М1N1 и МnNn регистрируются разности потенциалов, пропорциональные электрической составляющей $\Delta U_E(t)$, а также силе тока (I) в генераторном диполе.

При детальных 3D исследованиях целесообразно одновременно с электрическим полем измерять и магнитное на поверхности акватории (патент № 2754364, приложение Е 2).

Основным параметром, определяемым методом ЗСБ, является кажущееся удельное сопротивление ρ_k :

$$\rho_k = K_6 \left(\frac{I}{\Delta U} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot t^{\frac{5}{3}},$$

где K_{σ} – коэффициент установки, рассчитанный, исходя из данных о типах, размере и расстоянии (r), I – сила тока, ΔU – измеряемая разность потенциалов, t – время становления.

При выполнении ЗСБ на слоистых разрезах величина ρ_k характеризует суммарное сопротивление слоев до глубины, определяемой глубиной проникновения нестационарного поля в землю. Эта величина пропорциональна $\sqrt{2\pi t}$, где t – время становления. Таким образом, ρ_k , определенная для малых значений t , характеризует верхний слой разреза, а для больших значений t – является интегрированной величиной, которая характеризует весь разрез в целом.

Основным исходным материалом для определения истинных параметров геоэлектрического разреза (т. е. для количественной интерпретации) является график зависимости ρ_k от $\sqrt{2\pi t}$, который носит название полевой кривой ЗСБ. Прослеживая изменение ρ_k со временем, можно изучить изменение геоэлектрического разреза от величин, характеризующих верхние горизонты до суммарных, обобщенных характеристик всего разреза (суммарной продольной проводимости).

Технология зондирования становлением поля состоит из следующих этапов:

1. Создание первичного искусственного переменного электромагнитного поля в среде;
2. Процесс стабилизации, становления поля;
3. Регистрация вторичного переменного электромагнитного поля для различных времен становления, меньшее из которых отвечает верхней части разреза, а наибольшее – обобщенной характеристике разреза в целом.

При выполнении работ методом ЗСБ в летний период перед началом работ по профилям судно выходило на намеченный курс и за 3–4 мили до начала профиля производился спуск генераторной и приемной линий. При этом

использовался судовой шпиль. Когда судно пересекало границу площади изысканий, оператор включал аппаратуру в режим записи, гидрографы в это время начинали запись трека и глубин моря. После того, как профиль был полностью отработан (электроразведочная коса вышла за границу площади), запись останавливалась и производился заход на следующий профиль. Во время захода на последующие профили коса не поднималась из воды. Циркуляция совершалась по большому радиусу (не менее 1 км).

Подбор параметров зондирования осуществлялся в ходе опытных работ по профилям 1 и 2. Были выбраны геометрические размеры используемой установки и рабочий диапазон токов в генераторной линии для решения поставленных геокриологических задач. Например, для выполнения работ на Приямальском шельфе Карского моря использовалась генераторная линия длиной 120 м и приемные линии длиной 150 м. Расстояние между центрами генераторной и приемной линий составляли 250 м и 500 м.

В результате опытных работ было установлено, что такие геометрические размеры установки позволяют получать данные о геоэлектрическом строении разреза до времен порядка 450–500 мс, что позволяет получить геоэлектрический разрез до глубин 500 и более метров. Длина записи при работе методом ЗСБ составляла от 4000 мс до 8000 мс. Рабочий ток в генераторной линии составлял 260 А.

Питание коммутатора тока «ТЕЛЛИС-3-Э» осуществлялось дизельными генераторами мощностью 100–200 кВт, которые были установлены на палубе используемых судов или от батареи аккумуляторов при работе в зимний период. Подключение коммутатора тока осуществлялось через понижающий трансформатор, что обеспечивало рабочее напряжение на клеммах питания коммутатора и в то же время предохраняло систему от нежелательных «скачков» напряжения в питающей сети.

Методика работ методом ЧЗ заключается в установке на поверхности среды излучающей и принимающей антенны, синхронизации приемника и

измерителя ЧЗ и последовательной работы обеих на частотах 1024 кГц – 1 кГц. На акватории выполнялись ЧЗ при буксировке приемной и излучающей антенн маломерными судами. Примеры работ методом ЧЗ в транзитной зоне суша–шельф Карского моря приведен на рисунке 4.11 Б, В.

В период 2012 г. измерительные работы методом ЗСБ с помощью аппаратного комплекса «ТЕЛСС-3-Э» были выполнены с борта судна «Виктор Буйницкий» на акватории морей Лаптевых, Карского, Печорского (рис. 2.24);



Рис. 2.24. Работы методом ЗСБ на шельфе моря Лаптевых, НИС «Виктор Буйницкий», 2012 г.

с борта ледокола «Оден» в период 2014 г. на акватории Чукотского моря (рис. 2.25); на акватории Карского моря в 2012 г. (рис. 2.26–2.28), на акватории Карского и Печорского морей с борта судна «Маршал Василевский» в 2015 г. и с борта судна «Аквамарин» в 2017 г. Работы методом ЧЗ выполнялись на акватории

Карского моря (рис. 2.27–2.28) в транзитной зоне суша-шельф Байдарацкой губы(2006–2009 гг.), залива Шарапов Шар (2010 г.), на акватории Чукотского моря в транзитной зоне суша шельф Чаунской губы (2015 г.).



Рис. 2.25. Работы методом ЗСБ на шельфе Чукотского моря, Ледокол «Оден», 2014 г.



Рис. 2.26. Работы методом ЗСБ в заливе Шарапов Шар Карское море, 2012г.



Рис. 2.27. Работы методом ЧЗ в заливе Шарапов Шар Карское море, 2010 г.



Рис. 2.28. Работы методом ЧЗ на льду Байдарацкой губы Карское море, 2007г.

С помощью аппаратного комплекса «ТЕЛСС-3-Э» работы методом ЗСБ выполнялись также и в зимний период на шельфе Карского моря в 2012 г. и на шельфе моря Лаптевых в 2017 г. (рис. 2.29 – 2.31).



Рис. 2.29 Перемещение аппаратного комплекса «ТЕЛСС-3-Э» в зимних условиях на шельфе моря Лаптевых.

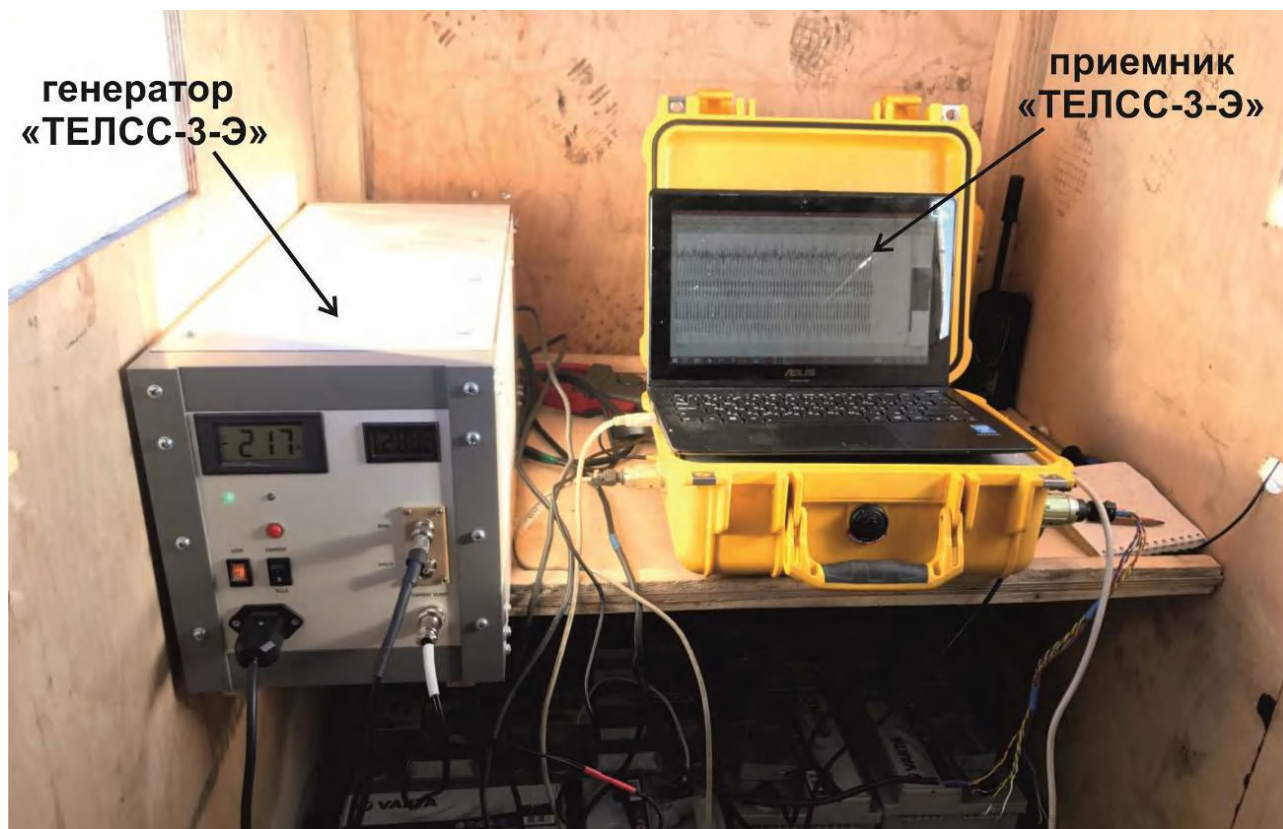


Рис. 2.30 Подключение генераторной и измерительной части аппаратного комплекса «ТЕЛСС-3-Э» к источнику тока.

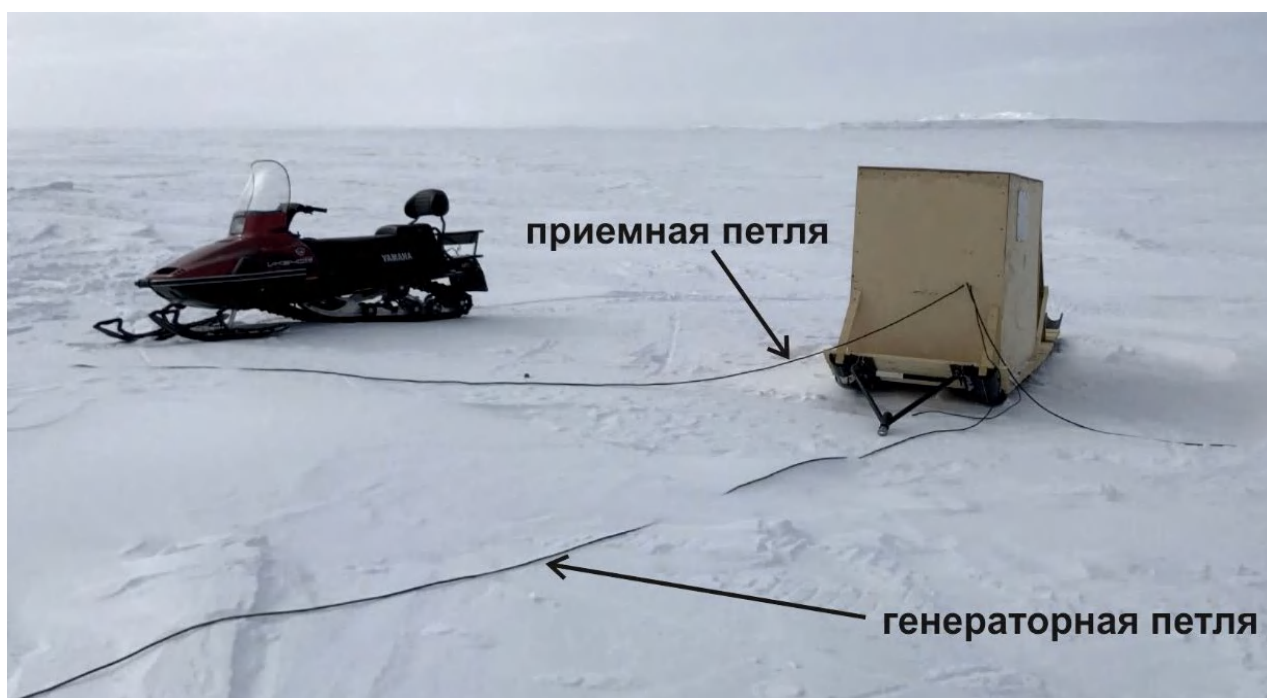


Рис. 2.31 Работы методом ЗСБ на шельфе моря Лаптевых с припайного льда, размер петли 500x500 м, Хатангский залив.

Обработка полученных полевых данных выполнялась в программе «Проба» (ABMN) и заключается в пересчете измеренных потенциалов на приемных линиях в кривые ЗСБ, т.е. кривые кажущегося сопротивления. Обработка выполнялась по следующему графу:

- Преобразование кривой по каждому профилю в логарифмический формат. Вертикальная шкала – ЭДС (мВ), горизонтальная – время (мс).

- Расчет средней величины напряжения на приемных электродах (естественное поле + поляризация на электродах) за последние 2 секунды записи.

Полезный сигнал составляет от $\frac{1}{4}$ до $\frac{2}{3}$ от времени прохождения тока, поэтому на временах более 1 секунды после выключения тока наблюдается естественное поле + поляризация на электродах.

- Приравнивание к нулю средней величины напряжения за последние 2 секунды.

- Нахождение времени выключения тока на профиле.

- «Вырезание» части кривой с момента включения до момента выключения тока на профиле.

- Смещение шкалы времен так, чтобы запись начиналась на времени 1 мс.

- Получение кривой спада электромагнитного поля.

Для изучения разреза на глубину 250 м достаточно иметь кривую спада электромагнитного поля до времен 150–200 мс.

Обрезание кривой до времени появления шума – некоторого повышения ЭДС, что не связано с процессами становления поля и не может быть использовано в рамках метода ЗСБ (рис. 2.32). Необходимо отметить, что в настоящий момент активно разрабатываются алгоритмы для увеличения соотношения сигнал/шум, например, использование шумоподобных сигналов при возбуждении поля (Гончаров и др., 2022).

- Нормализация шкалы времен (чтобы точки кривой не сгущались из-за того, что построения кривых ЗСБ производятся в логарифмическом масштабе).
- Полученная кривая спада электромагнитного поля пересчитывается в кривую ЗСБ, зависимость удельного электрического сопротивления от времени (рис. 2.33).

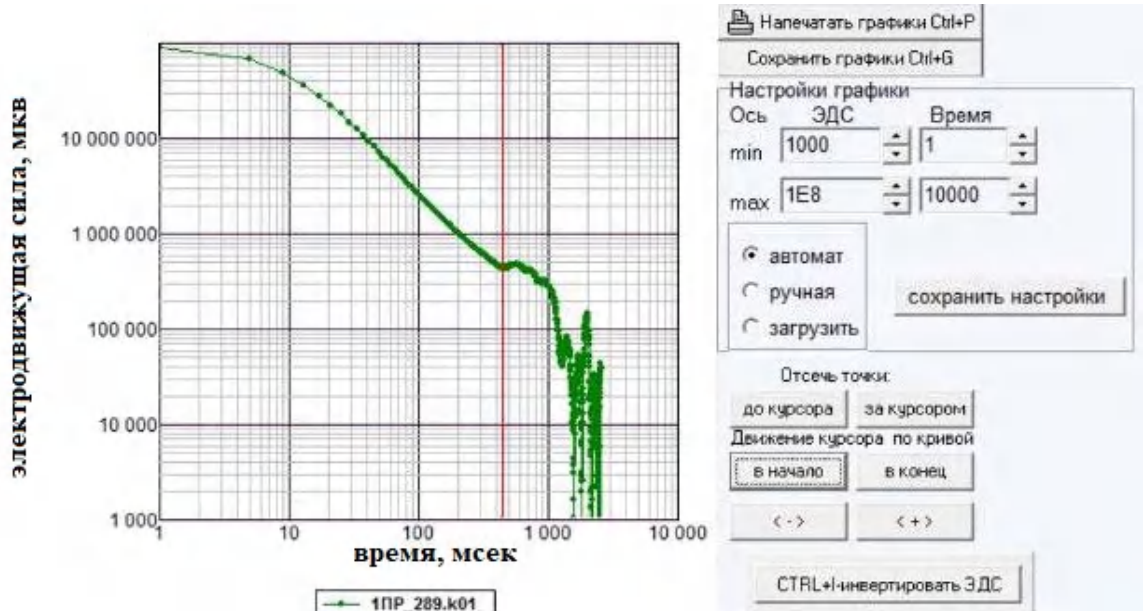


Рис. 2.32. Обрезание кривой до времени появления шума (≈ 450 мс).

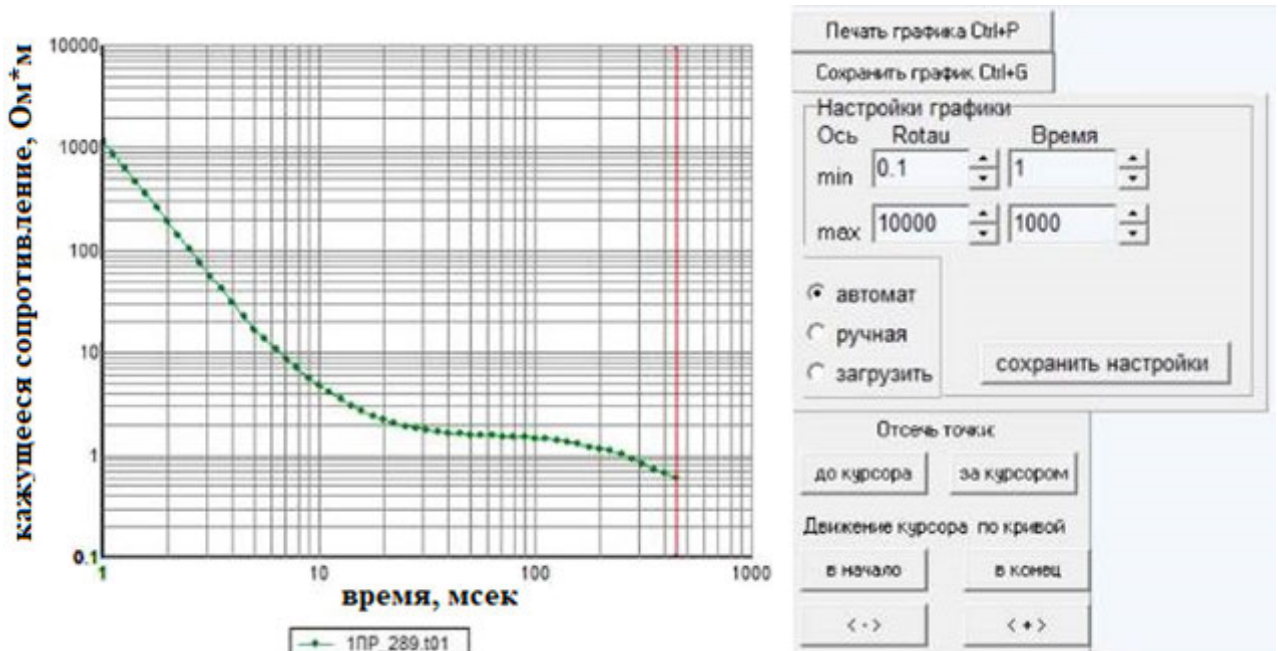


Рис. 2.33. Кривая спада электромагнитного поля пересчитана в кривую ЗСБ.

Далее выполняется решение неединственной и неустойчивой обратной задачи в методе ЗСБ – инверсия кривых кажущегося сопротивления в геоэлектрическую модель путем математического моделирования кривых кажущегося сопротивления от геоэлектрического разреза. Есть два принципиально разных подхода к решению обратной задачи в электроразведке. Первый подход заключается в автоматической инверсии данных и решение обратной задачи в классе «тонкослоистых» моделей. Второй подход заключается в решении обратной задачи с минимальным числом слоев, задаваемых заранее из априорных данных. Решение задачи в классе «толстослоистых» моделей.

Рассмотрим один из примеров выполнения ЗСБ на детальном участке приамальского шельфа. Отличительной особенностью данных работ была необходимость получения данных о кровле ММП до начала выполнения буровых работ. Стандартная интерпретация данных ЗСБ и ЧЗ заключается в автоматической 1D инверсии кривых кажущегося сопротивления и построение геоэлектрических разрезов и моделей УЭС (рис. 2.34).

Отличие применяющейся автором методики интерпретации данных геофизики заключается в использовании стартовых геоэлектрических моделей, построенным по данным лабораторных испытаниях грунтов на опорных участках (близких по свойствам к рядовому участку работ). Такой подход к решению неустойчивой обратной задачи геофизики позволил получить устойчивое решение применительно к опорным участкам арктического шельфа (Основы..., 2020). На рисунке 2.35 приведены результаты автоматической инверсии одних и тех же первичных данных ЗСБ на шельфе, при использовании различных подходов к инверсии данных. Рассматриваются геоэлектрические модели, полученные для случая тонкослоистых моделей 2.35 (a, b, c) и для случая толстослоистых моделей (рис.2.35 d).

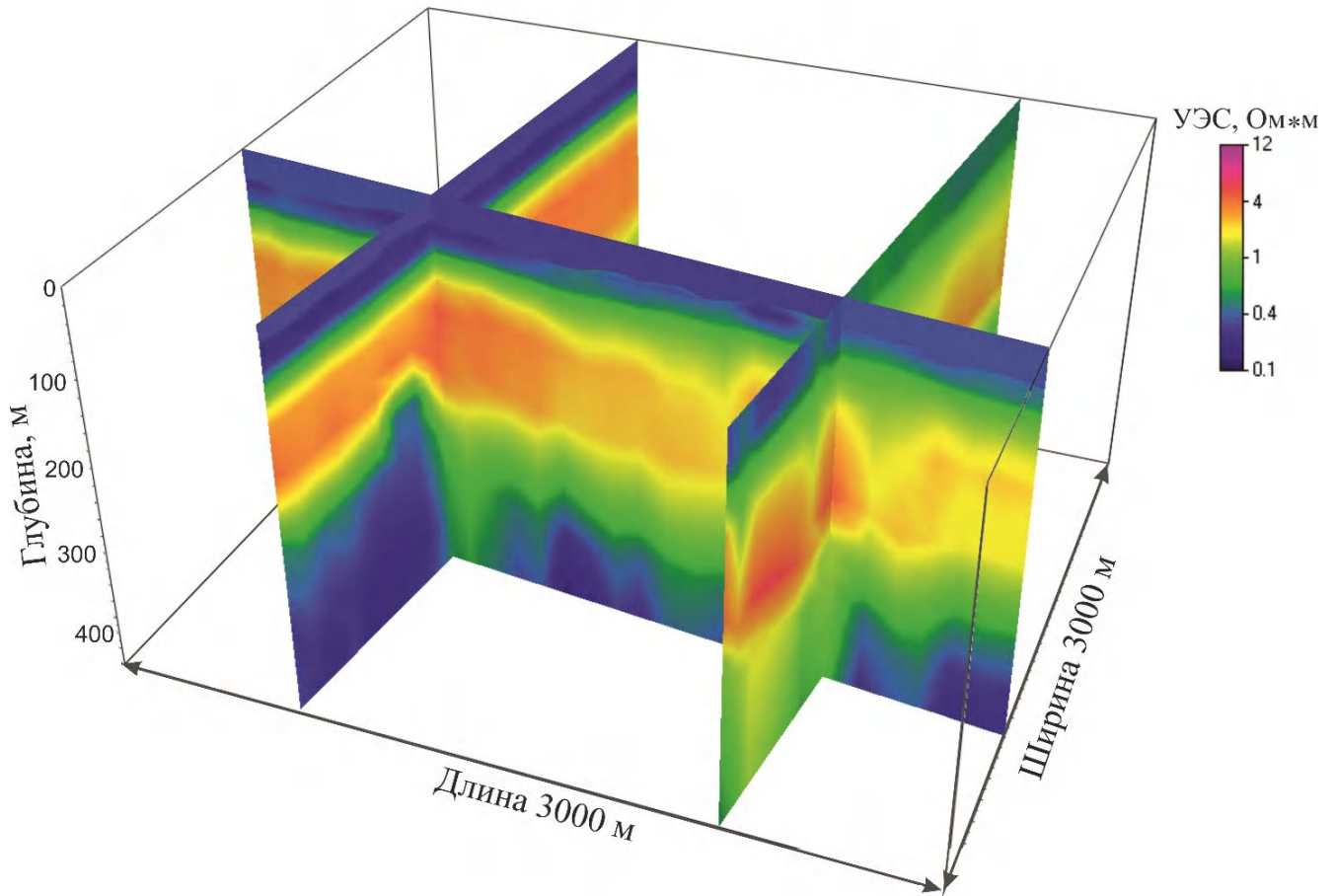


Рис. 2.34. 3D сглаженная геоэлектрическая модель, отражающая кровлю, подошву и неоднородное строение ММП на приямальском шельфе. Программное обеспечение ZondTem1D А.Е. Каминского.

На рисунке 2.35 (а, б, в) выполнена различная геокриологическая интерпретация одной и той же геоэлектрической модели. ММП задавались по изоомам: 2,5 Ом·м для варианта а, 5 Ом·м для варианта в, 10 Ом·м для варианта с. Очевидно, что для одной и той же геоэлектрической модели получены различные глубины для кровли, подошвы и мощности ММП, ее сплошности и распространения. Этот пример свидетельствует о том, что выполнить геофизические исследования недостаточно для оценки глубин залегания кровли, подошвы ММП и ее распространения. В случае использования «тонкослоистых» моделей возникает большая неопределенность с выбором границ распространения ММП. В случае использования «толстослоистых» моделей подобных неопределенностей не возникает. Четырехслойная модель описывает

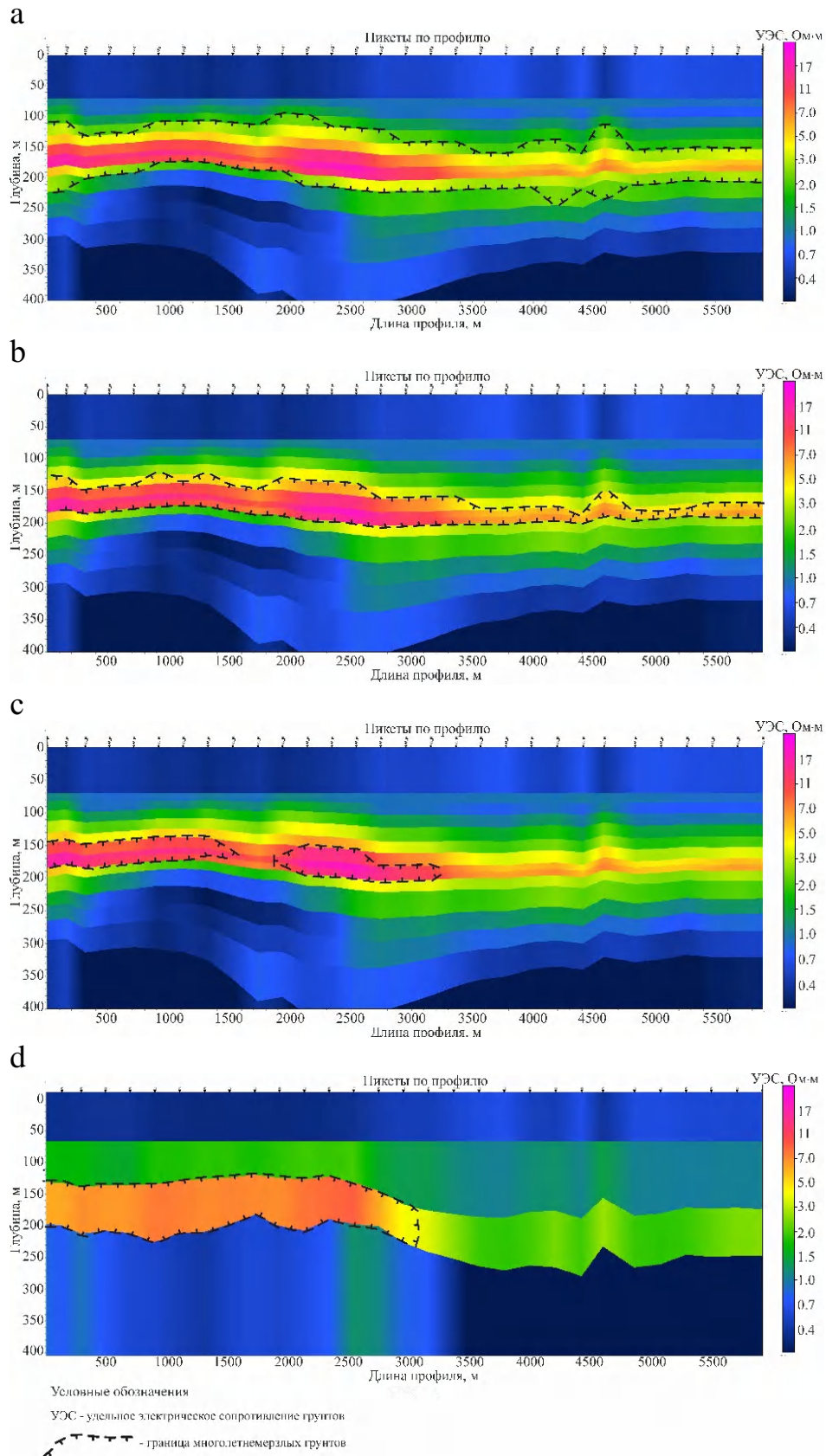


Рис. 2.35. Модели кровли и подошвы ММП для различных УЭС ММП: а – 2,5 Ом·м, б – 5 Ом·м, с – 10 Ом·м. d – результаты автоматической инверсии в случае «толстослойной» модели.

подавляющее большинство региональных геокриологических задач для арктического шельфа В такой модели первый геоэлектрический слой является слоем воды, второй представлен охлажденными осадками, третий слой в геоэлектрической модели связан с ММП на шельфе и подстилает модель слой талых осадочных пород (рис. 2.35 d).

Такой подход к интерпретации геофизических данных, задание известных по каким-либо данным стартовых моделей и их инверсия (интерпретация в режиме проверки гипотез), был апробирован автором в кандидатской диссертации (Кошурников, 2001).

Интерпретация данных ЗСБ, ЧЗ заключалась в 1D инверсии кривых кажущегося сопротивления в геоэлектрические разрезы с помощью математического моделирования данных ЗСБ в классе «толстослоистых» моделей по программе «Faraday», разработанной по техническому заданию автора. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения приведено в приложении 3. Для интерпретации создается геоэлектрическая модель по известным литологическим данным (рис. 2.36). Подбор геоэлектрической модели производится путем многократного решения прямой задачи геофизики при изменении параметров разреза (мощность и удельное электрическое сопротивление слоев) до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное соответствие модельной кривой и кривой, полученной при полевых работах, причем в подбираемой модели мощность и удельное электрическое сопротивление первого от поверхности слоя задавались с учетом полученных данных о глубине моря и проводимости морской воды.

Одномерные геоэлектрические модели позволяют получить распределение удельного электрического сопротивления пород по глубине. На рисунке 2.36 приведен пример математического моделирования геоэлектрического разреза для участка приямальского шельфа. В результате подбора модели в разрезе были выделены 4 слоя: слой воды мощностью 44 м и с УЭС 0,26 Ом·м; слой охлажденных пород мощностью 28 м с УЭС 0,76 Ом·м; слой

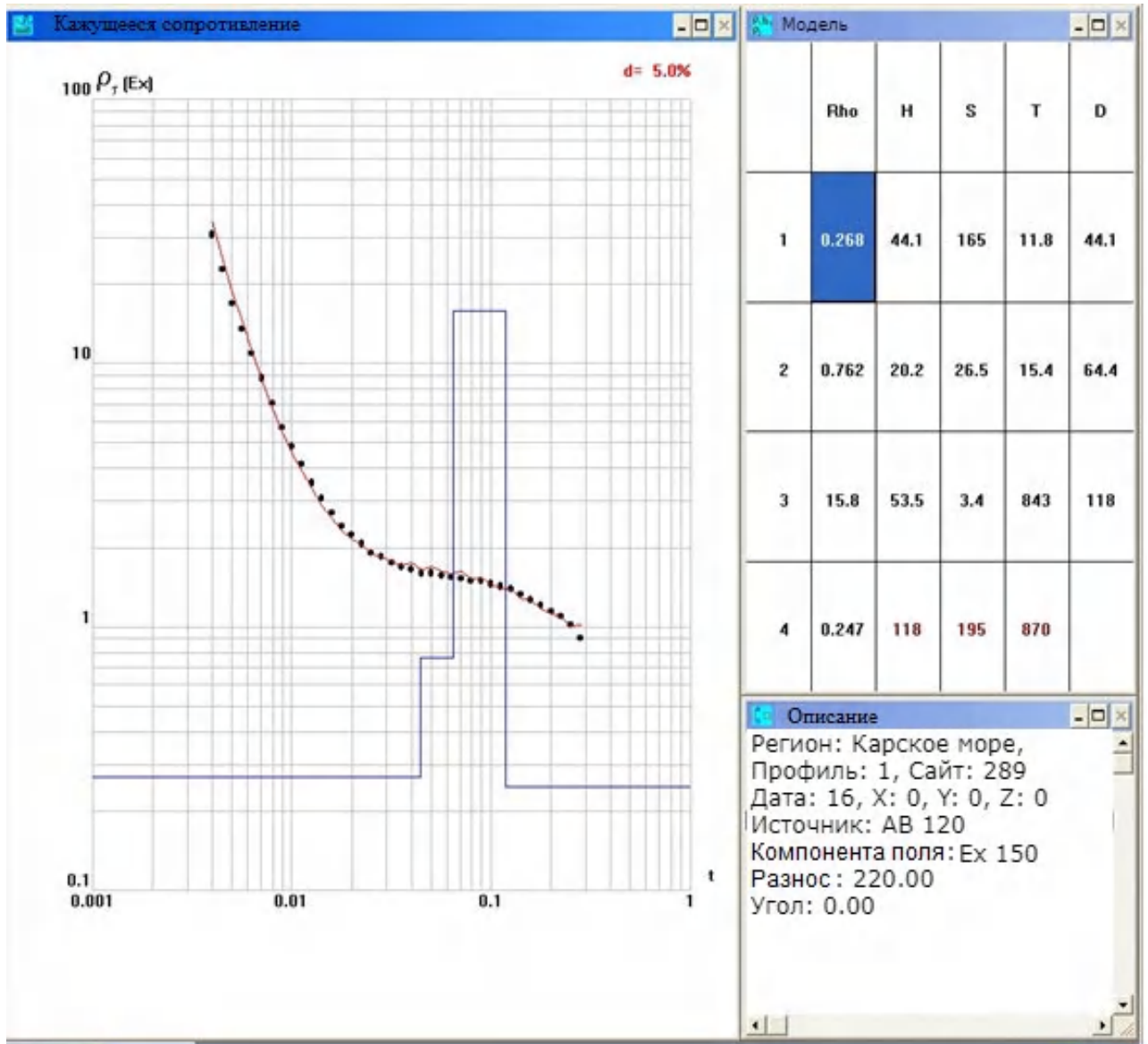


Рис. 2.36. Пример подбора геоэлектрической модели в программе «Faraday». Пряймальский шельф.

предположительно мерзлых пород мощностью 52 м с УЭС 16 Ом·м и слой немерзлых пород (талых или охлажденных) обладающих УЭС 0,25 Ом·м. Полученные одномерные геоэлектрические модели по профилю объединяются в геоэлектрические разрезы, получаемые вдоль галса судна.

Автор выполнил интерпретацию данных на разработанном программном обеспечении в классе «толстослоистых» моделей на следующих объектах арктического шельфа:

1. Детальные геофизические исследования методом ЧЗ на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.);
2. Детальные геофизические исследования методом ЧЗ в районе залива Шарапов Шар на шельфе Карского моря (2010 г.);
3. Детальные работы методом ЗСБ в заливе губы Буор-Хая, в прол. Дмитрия Лаптева, северном полигоне на шельфе моря Лаптевых (2012 г.);
4. Региональные работы методом ЗСБ по геотравесу о. Колгуев – порт Тикси на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых морей (2012-2020 г.);
5. Детальные работы методом ЗСБ в каньоне Геральда на шельфе Чукотского моря (2014 г.);
6. Детальные геофизические исследования методом ЧЗ в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015 г.);
7. Региональные работы методом ЗСБ по геотраверсу о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.);
8. Детальные работы методом ЗСБ на приямальском шельфе в районе о. Белый на шельфе Карского моря (2015г., 2017г., 2020г.);
9. Региональные работы методом ЗСБ по геотраверсу о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.);
10. Региональные работы методом ЗСБ по геотраверсу о. Белый – Карские Ворота на шельфе Карского моря (2017-2020 гг.);
11. Детальные работы методом ЗСБ в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых (2017 г.).

2.6. Методы сейсморазведки и сейсмоакустики

В Главе 1 было отмечено, что методы сейсмоакустики традиционно применяются для исследования шельфа. Действительно, эти геофизические технологии гораздо информативнее, чем электроразведка для литологического

расчленения пород обнаружения и локализации в пространстве зон скоплений газов на шельфе. Поэтому, если ставить задачу не только определения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород, а обнаружения зон скоплений газа на шельфе, литологического расчленения разреза, исследования газогидратов, то комплекс в комплекс геофизических методов (электроразведка и термометрия) необходимо добавить сейсмоакустику и сейсморазведку.

На примере приамальского шельфа в 2019-2020 гг. автор выполнил опытные работы по одновременной работе с судна технологией ЗСБ и технологией сейсмоакустики. Практическая значимость этих опытных работ заключается в экономии судового времени. Рассмотрим фундаментальные основы сейсморазведки и технологию сейсмоакустики, успешно реализованную при опытных работах, несмотря на ступенчатое во времени возбуждение ЭМ поля в непосредственной близости от сейсмоакустической установки.

Изучение с помощью сейсморазведки земной коры возможно в той степени, в какой слагающие ее горные породы различаются своими упругими свойствами. Анализ и интерпретация наблюдаемых волновых полей исходят из существования более или менее устойчивых закономерностей распределения сейсмических свойств горных пород в зависимости от их состава, условий образования и залегания, изменений в ходе геологических процессов. На основе такой информации делается выбор подходящих сейсмических методов при решении конкретных геологических задач и рассматриваются методические вопросы оптимизации условий возбуждения и приема упругих колебаний. (Боганик, Гурвич, 2006).

Основы теории сейсморазведки

Горные породы являются сложными многокомпонентными и многофазными образованиями с разнообразной внутренней структурой и такими свойствами как слоистость, пористость, трещиноватость и др. Реальные породы весьма далеки от тех идеальных моделей сплошных упругих сред, на которых

построена классическая теория распространения сейсмических волн. Тем не менее основные выводы этой теории неплохо согласуются с волновыми полями, которые наблюдают в большинстве консолидированных пород – изверженных, метаморфических, осадочных.

Причина заключается в том, что размеры элементов внутренней неоднородности горных пород очень малы по сравнению с длинами волн, используемых в сейсморазведке. Такие неоднородности проявляются лишь в интегральном виде, определяя осредненные, *эффективные свойства* реальных сред. Для сейсморазведки важнейшим свойством горных пород является скорость распространения в них упругих волн продольного и поперечного типа.

Волновое уравнение

Для однородной и изотропной среды с абсолютно упругими свойствами перемещение упругих (сейсмических) колебаний подчиняется уравнению Ламэ:

$$\frac{\lambda+2\mu}{\rho} \text{grad div } \bar{u} + \frac{\mu}{\rho} \text{rot rot } \bar{u} = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2}, \quad (2.47)$$

где $\bar{u} = \bar{u}(x, y, z, t)$ – смещения элементов среды при распространении упругого колебания, где t – время, а x, y, z – координаты пространства. Коэффициенты λ и μ (постоянные Ламэ) определяются упругими свойствами среды, ρ – плотность среды (Боганик, Гурвич, 2006).

Константы λ и μ можно выразить через хорошо известные и имеющие простой физический смысл упругие параметры среды – модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона σ :

$$\lambda = E \frac{\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}, \quad \mu = E \frac{1}{2(1+\sigma)} \quad (2.48)$$

Смещения элементов среды \bar{u} при распространении упругого колебания есть сумма компонент – потенциальной \bar{u}_p и вихревой \bar{u}_s . Так как $\text{div } \bar{u}_s = \text{rot } \bar{u}_p = 0$, (2.47) распадается на два независимых волновых уравнения:

$$\Delta \bar{u}_p = \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_p}{\partial t^2}, \quad (2.49)$$

где

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

и

$$\Delta \bar{u}_s = \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_s}{\partial t^2}, \quad (2.50)$$

где

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \sigma)'}}$$

где $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ – оператор Лапласа (Боганик, Гурвич, 2006).

Таким образом, в упругом, однородном и изотропном пространстве возможно существование двух независимых колебаний как во времени, так и в пространстве – продольной волны Р и поперечной волны S.

Для изучения скоростных свойств грунтов на шельфе применяют:

- сейсморазведку высокого разрешения,
- непрерывное сейсмоакустическое профилирование.

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование выполнялось одновременно многоканальной и одноканальной системами по сети профилей или отдельным профилям 1000×1000 м.

Для приема и регистрации отраженных волн по методу одноканального НСАП используется одноканальная коса длиной 2,8 м из 8 гидрофонов типа AQ-2000, расположенных на расстоянии 40 см друг от друга и система регистрации Mini-Trace II (24 бит, динамический диапазон 112 дБ).

Для приема и регистрации отраженных волн по методу многоканального НСАП используется многоканальная коса Geo-Sense UltraHi-Res (48 каналов с шагом 3,125 м, 3 гидрофона типа AQ-2000 в группе на базе 50 см) с общей длиной

двух активных секций 150 м и система регистрации на базе двух сейсмических станций Geode (24 бит, динамический диапазон 110 дБ).



Рис. 2.37. Источник энергии Geo-Spark 7 kJ (А) и электроискровой излучатель Geo-Sparker 400 (Б).

Для возбуждения сейсмоакустического сигнала используется источник энергии Geo-Spark 7kJ и электроискровой излучатель Geo-Sparker 400 (400 электродов) (рис. 2.37).

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование выполнялось с использованием поверхностной буксировки приемоизлучающей системы, при условии оптимального согласования, когда она заглубляется на $\frac{1}{4}$ длины волны излучающего сигнала.

На рисунке 2.38 представлена схема расположения сейсмоакустических приемо-излучающих устройств и их буксировка (рис. 2.39).

Вывод судна на линию профиля осуществлялся за 1–1,5 км до начала проектных координат. Производился спуск сейсмоакустического оборудования за борт, стабилизация сейсмокосы по длине и глубине, настройка работы электроискрового излучателя.

Сейморазведка высокого разрешения

Сейсмические работы высокого разрешения выполняются по сети профилей или по отдельным профилям.

Работы производятся с использованием: многоканальной сейсмической косы, сейсмостанции, массива пневмоисточников модели. Основные параметры полевых наблюдений СВР представлены в таблице 2.6.

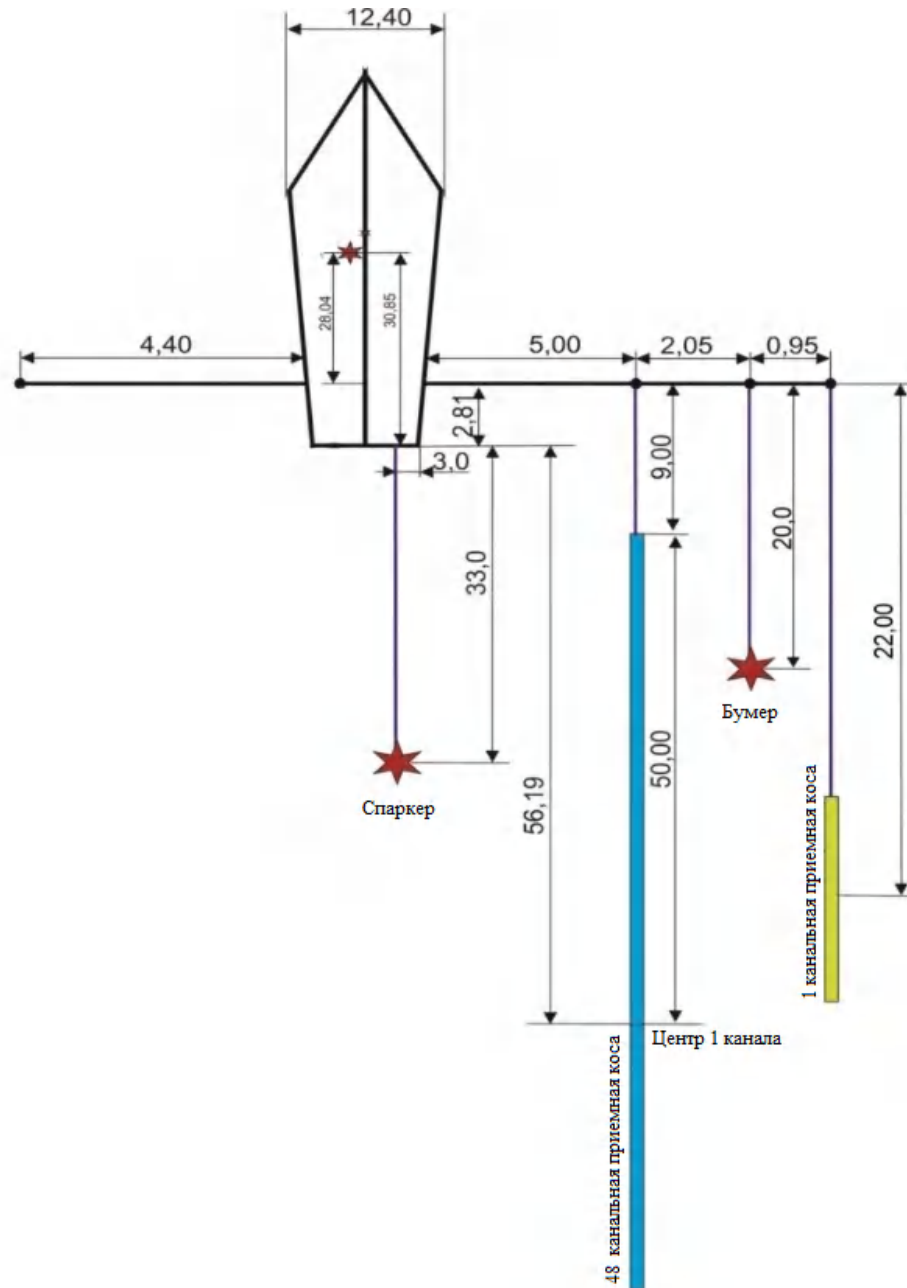


Рис. 2.38. Схема расположения и буксировки сейсмоакустических устройств.



Рис. 2.39. Буксировка сейсмоакустических устройств.

Таблица 2.6. Основные параметры полевых наблюдений СВР

№ пп	Параметр	Значение / описание
11.	Тип съемки	2Д МОГТ с буксируемой косой
22.	Количество каналов	192+6 служебных
33.	Шаг дискретизации,	0,5 мс
44.	Номинальный интервал возбуждения	12,5 м
55.	Длина активной части приемной косы	1200 м
66.	Расстояние от центра источника до центра первого канала сеймокосы	39,6 м
77.	Расстояние между центрами групп гидрофонов (каналов)	6,25 м
88.	Кратность суммирования по ОГТ	48
99.	Минимальное количество гидрофонов в группе (канале)	8

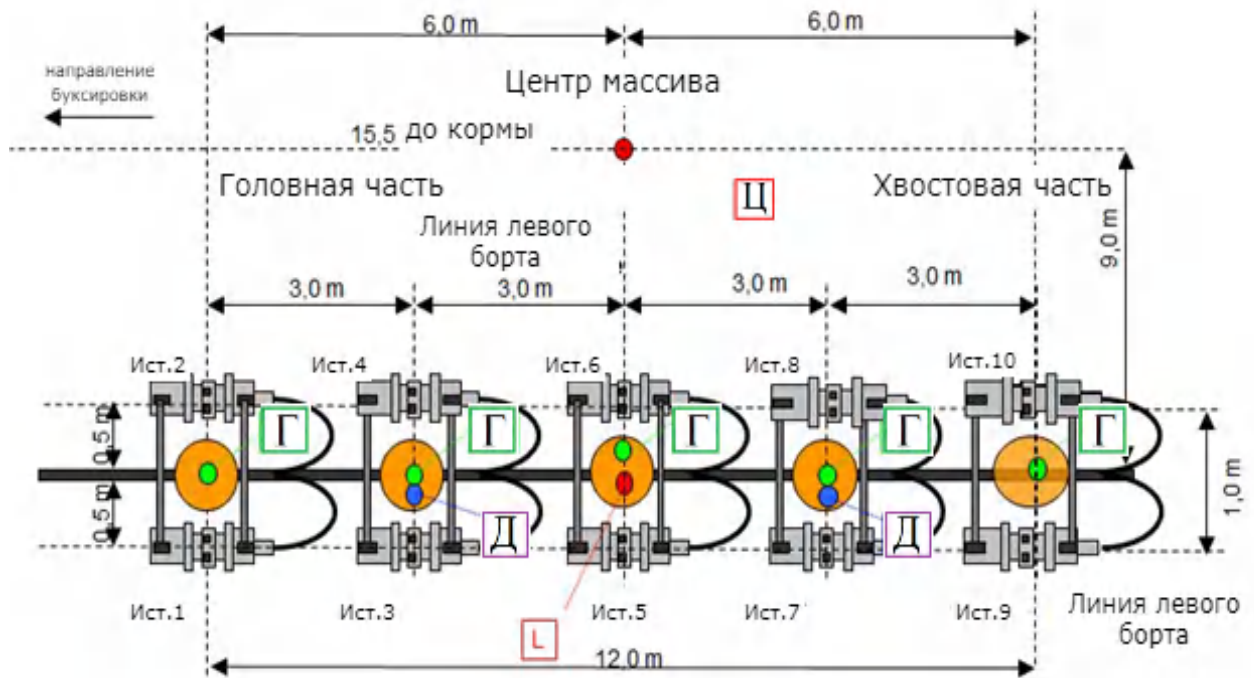
№ пп	Параметр	Значение / описание
110.	Номинальная глубина погружения приемной косы, м	3±1м (в начале съемки), 4±1м
111.	Конфигурация источника сигналов	Групповой пневмоисточник рабочим объемом 280 куб. дюйм, 10 источников Sleeve Gun
112.	Рабочее давление, допустимое отклонение	2000 PSI, поддерживалось неизменным в течении всего периода выполнения работ, отклонения не более ±10 % от номинального давления
113.	Глубина буксировки пневмоисточников, м	2±0,5 м
114.	Предел несинхронности работы отдельного пневмоисточника	Не хуже ±1 мс
115.	Формат записи	SEG D 8058 (rev 1)
116.	Фильтры записи	НЧ: 3 Hz @ 6 dB/Oct ВЧ: 375 Hz @ 6 dB/Oct
117.	Длина записи	3000 мс
118.	Задержка срабатывания ПВ	50 мс

Для возбуждения сейсмического сигнала использовался массив пневматических источников. Параметры сейсмического источника приведены в таблице 2.7. Схема расположения массива пневмоисточников представлена ниже (рис. 2.40).

Таблица 2.7. Параметры сейсмического источника

Количество источников	1
Тип	Одиночный массив
Конфигурация массива	10 активных ПИ, запасные не предусмотрены.

Тип пневмоисточника	SleeveGuns
Общий рабочий объем	280 in ³ (4 x 40 in ³ + 6 x 20 in ³)
Глубина буксировки	2 м
Длина массива	12 м
Нормальное рабочее давление	2000 psi (138 бар)
Датчики глубины	AGH 33M3 - 2 шт.
Гидрофон ближней зоны	AGS-7720С, 1 шт. на каждую группу, 5 шт. на весь массив.



На схеме используется следующая система обозначений:

- | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------------------|
| Л | Центр массива левого борта | Г | Гидрофон ближней зоны |
| Ц | Центр массива | Д | Датчик глубины |

Певмо-источники	Группа №1	Группа №2	Группа №3	Группа №4	Группа №5
	Ист.2 40дюйм ²	Ист.4 40дюйм ²	Ист.6 20дюйм ²	Ист.8 20дюйм ²	Ист.10 20 дюйм ²
	Ист.1 40дюйм ²	Ист.3 40дюйм ²	Ист.5 20дюйм ²	Ист.7 20дюйм ²	Ист.9 20 дюйм ²

Рис. 2.40. Схема массива пневмоисточников.

Для приема сейсмического сигнала использовалась многоканальная сейсмическая коса Sersel Seal. Параметры сейсмоприемной линии приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8. Параметры сейсмического источника

Количество каналов	192
Расстояние между центрами групп гидрофонов (каналов)	6,25 м
Минимальное количество гидрофонов в группе (канале)	8
Чувствительность гидрофонов	17,4 V/Bar
Длина активной части сейсмоприемной косы	1201,7 м

Для определения расстояния между центром группы пневмоисточников и центром первой приемной группы производится выстрел полным массивом ПИ. Определение минимального удаления источник-приемник проводится непосредственно по записи. Ниже (рис.2.41) показана схема с основными расстояниями до сейсмического оборудования.

Регистрация и оценка результатов производятся в соответствии с рекомендациями производителя. Обработка данных сейсмоакустического профилирования производится в программном комплексе ProMAX.

С целью подавления низкочастотного фона волнения моря на участке приямальского шельфа выполнялась полосовая фильтрация (рис. 2.42). По результатам тестирования был выбран следующий полосовой фильтр (рис. 2.43)

– Butterworth Filter 100 Гц (18 дБ/окт) – 3500 Гц (72 дБ/окт). Нижняя граничная частота фильтра тестировалась путем перебора частот от 8 до 120 Гц.

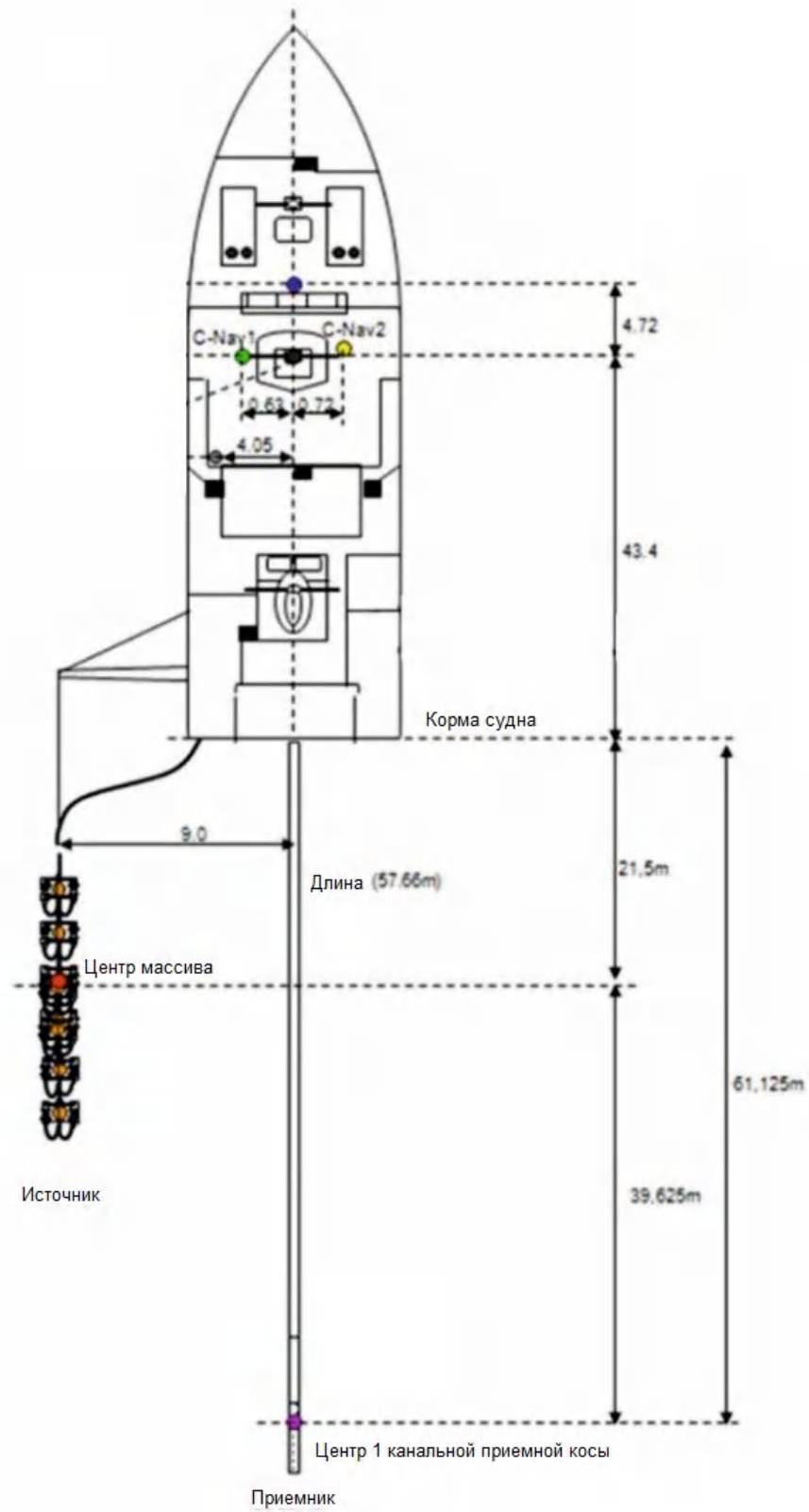


Рис.2.41. Схема выносов сейсмического оборудования.

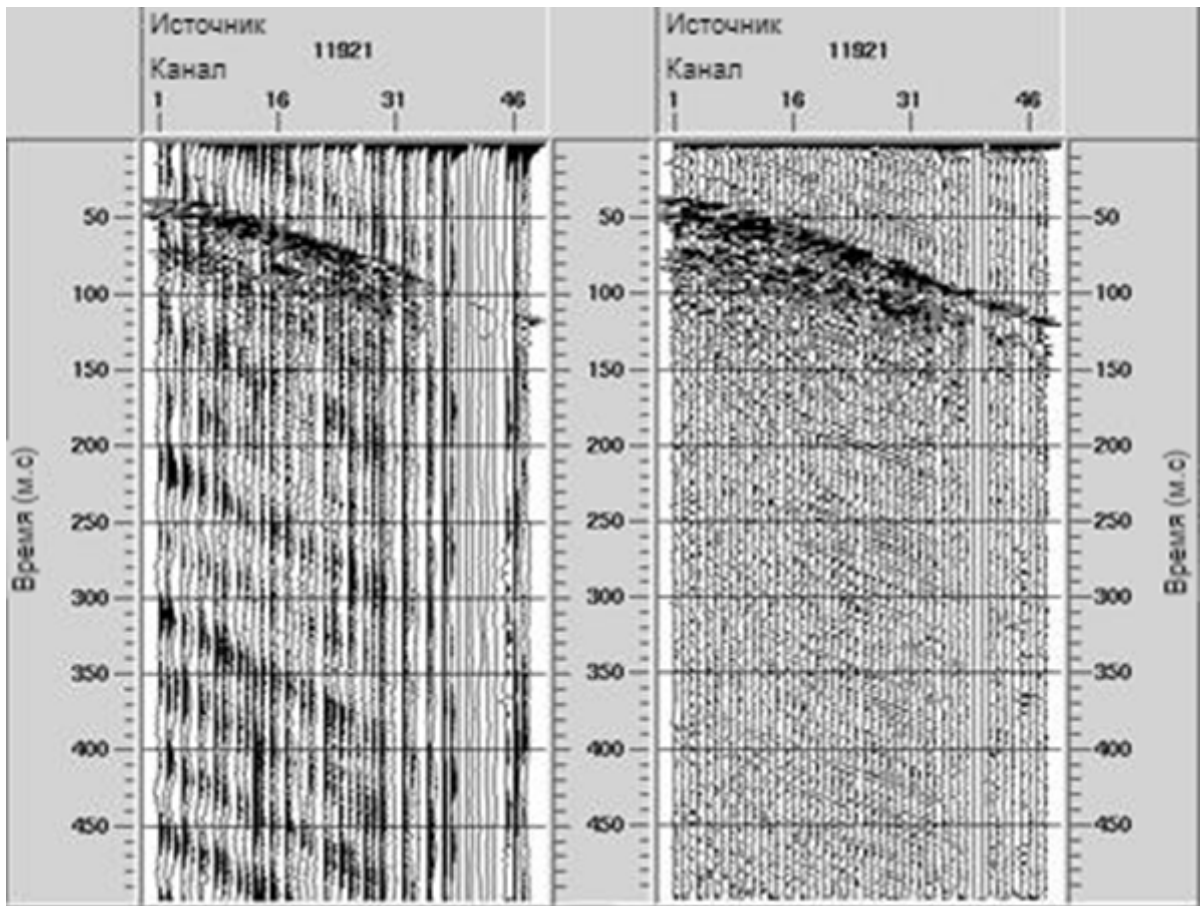


Рис. 2.42. Исходная сейсмограмма (слева), сейсмограмма после полосовой фильтрации (справа).

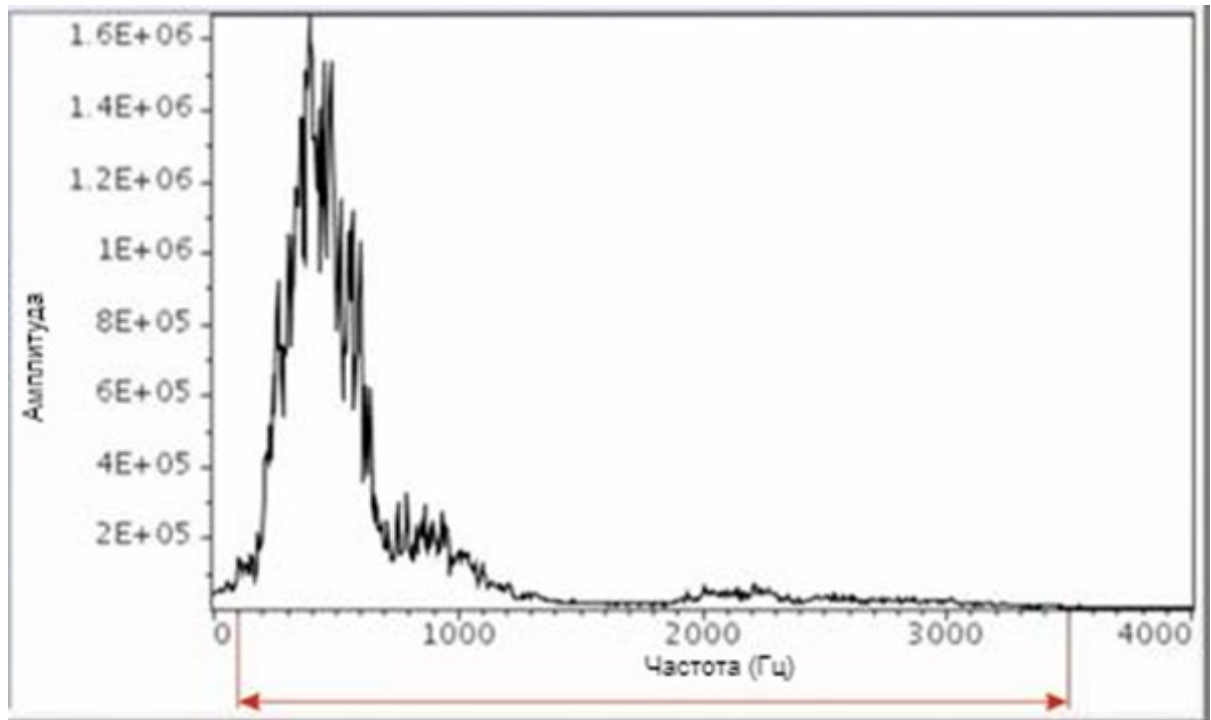


Рис. 2.43. Спектр сигнала с выбранным полосовым фильтром.

Сейсмические записи зачастую осложнены низкочастотными амплитудными всплесками (спайками) в несигнальной части данных, но их подавление необходимо для корректной работы процедуры миграции (рис. 2.44).

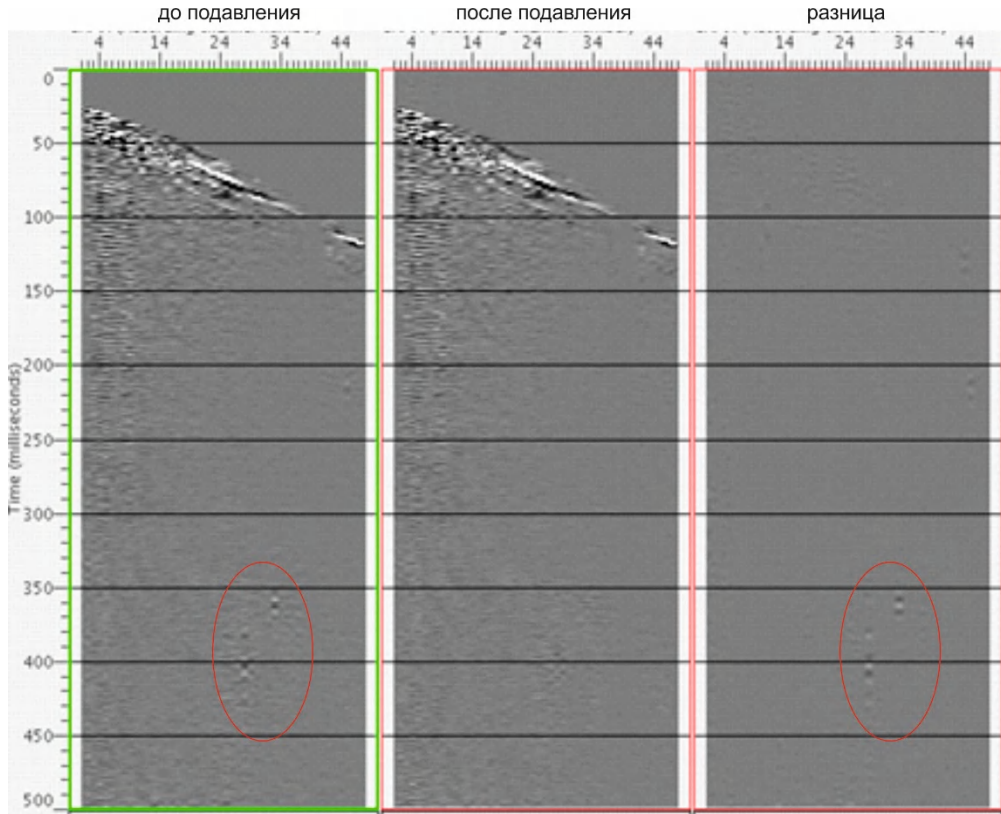


Рис. 2.44. Применение к сейсмограмме процедуры подавления случайного шума на примере приямальского шельфа Скоростной анализ (вторая итерация).

После всех описанных процедур повторялся анализ скоростей. Уточненный скоростной закон использовался для пост-стек миграции Кирхгофа.

Пост-стек миграции Кирхгофа

Миграция проводилась в диапазоне углов 0-90 градусов с апертурой в 3 км (рис. 2.45).

Обработка данных ВРС производится с использованием программного пакета Promax (V.5000.8.3.0) на базе ОС Linux (CentOS v.6.5.)

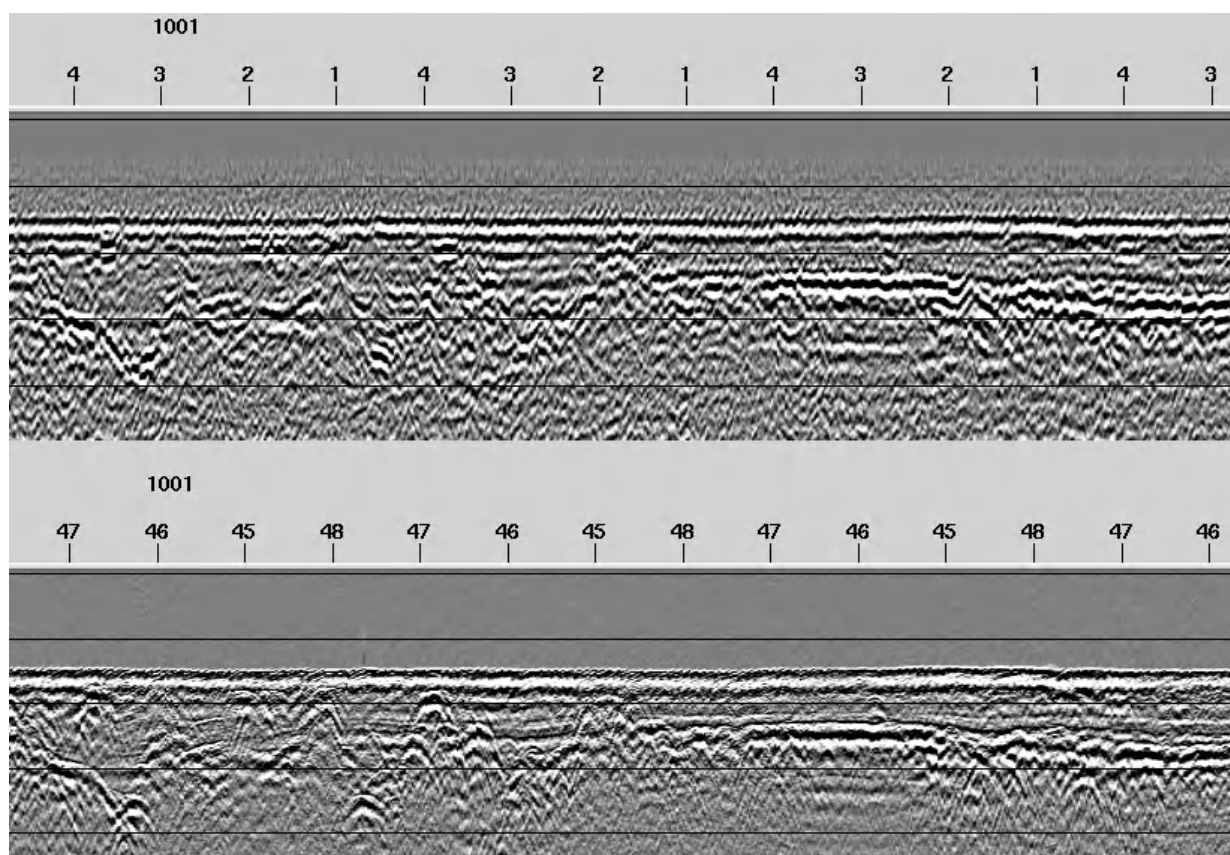


Рис. 2.45. Фрагмент разрезов. Исходный (снизу), после миграции (сверху)
Участок Прямального шельфа.

По результатам тестирования процедур обработки выбирается граф набоортной обработки:

- ✓ Ввод Seg-D файлов в систему обработки;
- ✓ Присвоение номинальной геометрии съемки в заголовки трасс;
- ✓ Ввод статической поправки за заглубливание косы и пневмоисточников;
- ✓ Низкочастотная фильтрация;
- ✓ Подавление вторичных пульсаций газового пузыря пневмоисточников;
- ✓ Приведение сигнала к нульфазовому виду;
- ✓ Ввод поправки за сферическое расхождение;
- ✓ Верхний мьютинг;
- ✓ Шумоподавление;

- ✓ Подавление линейных помех (Тау-пи мьютинг);
- ✓ Подавление поля кратных волн процедурой SRME;
- ✓ Изменение шага дискретизации;
- ✓ Скоростной анализ;
- ✓ Линейный радон; подавление остаточной линейной помехи;
- ✓ Линейный радон; подавление остаточной энергии высокочастотных дифракций;
- ✓ Предсказывающая деконволюция;
- ✓ Остаточное подавление случайного шума;
- ✓ Скоростной анализ;
- ✓ Суммирование по ОГТ;
- ✓ Временная миграция Кирхгоффа по суммированным данным;
- ✓ Присвоение реальной геометрии;
- ✓ Выписка финальных результатов в формате SEG-Y;

Результат применения процедур обработки на примере участка приямальского шельфа представлен на рисунке 2.46.

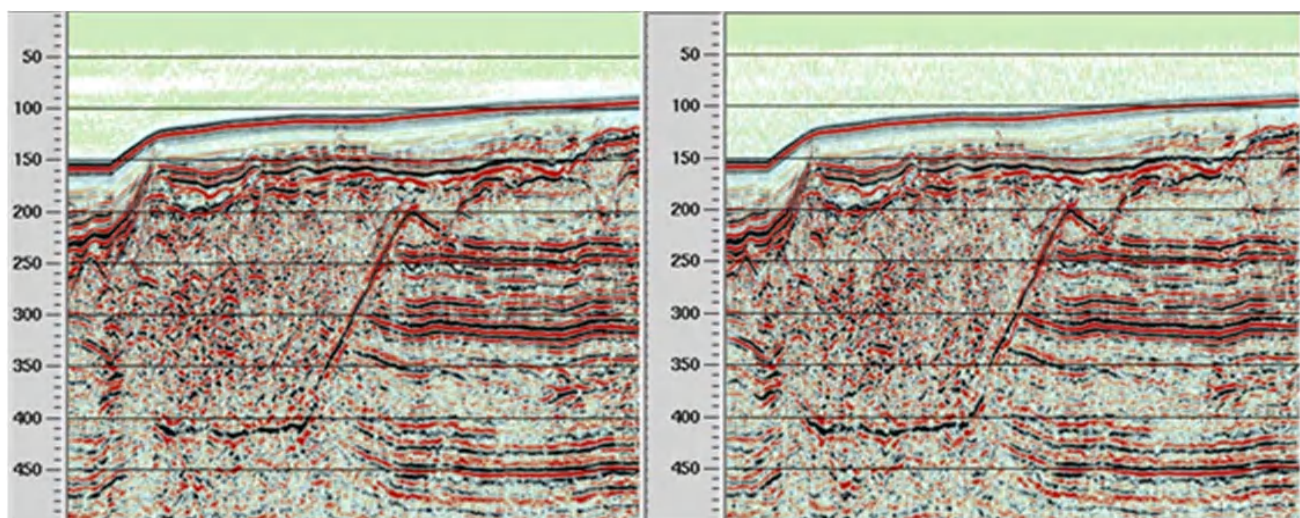


Рис. 2.46. Фрагмент исходного разреза (а), разрез после миграции (б).

Присвоение реальной геометрии

Реальная геометрия присваивалась путем зачитывания информации о координатах источника и приемников из обработанных навигационных файлов (P190). На основе данной информации рассчитывались и присваивались координаты точек ОГТ.

Выписка финальных результатов в формате SEG Y

После завершения обработки, из проекта были выписаны следующие данные: мигрированные разрезы, скорости суммирования (RMS), интервальные скорости.

Приведенный граф реализации и обработки сейсмоакустических исследований позволил получить кондиционные скоростные разрезы (рис. 2.46) и геоэлектрические модели (рис. 2.36) на участке приямальского шельфа за один проход судном.

2.7. Методы исследования теплового режима и свойств донных отложений шельфа

Третьей и четвертой составляющими комплексного анализа геолого—геофизических данных для изучения многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе является подтверждение геофизических результатов бурением и выполнение термометрии в пробуренных скважинах.

Для задания в стартовых моделях электроразведки и сейсмоакустики сопротивлений и скоростей первого слоя определялось соленость и газовый состав по глубине водного слоя. Для этого использовались специальные батометры для отбора проб воды с заданных глубин (рис. 2.47) и комплекс гидрологический ГРС-3.



Рис. 2.47. Комплекс батометров для отбора проб воды, экспедиция SWERUS-C3, 2014 г.

Определение морских течений и солености воды производится при помощи специализированной гидрологической аппаратуры, например, ГРС-3 (рис. 2.48).



Рис. 2.48. Комплекс гидрологический ГРС-3.

В морских условиях производится *инженерно-геологическое бурение с отбором проб пород*. Для изучения грунтов в придонном слое (до 5 м) используется вибрационное бурение, при этом можно использовать судно, не оснащенное специальной буровой площадкой (рис. 2.49). Буровой станок при помощи крана опускается на дно, затем вибратор задавливает буровую колонку на максимальную глубину. По окончании бурения станок поднимается на борт судна и из него извлекается буровая колонна с керном (рис. 2.50).



Рис. 2.49. Станок вибрационного бурения, рейс НИС «Виктор Буйницкий», 2012 г.



Рис. 2.50. Керн, отобранный вибростанком.

Для более глубокого бурения используются суда, оборудованные буровой платформой (рис. 2.51) и буровым станком (рис. 2.52).



Рис. 2.51. Буровая платформа на судне, экспедиция SWERUS-C3, Чукотский шельф, 2014 г.



Рис. 2.52. Буровые работы на судне «Кимберлит», Приамальский шельф, 2016 г.

В процессе бурения производится геологическое и геокриологическое описание керна (рис. 2.53 – 2.55), отбор и упаковка проб грунта, измерение плотности, влажности, температуры начала замерзания (рис. 2.56) теплопроводности на борту судна с помощью зонда KD-2PRO (рис.2.57), описанных выше в п. 2.1.



Рис. 2.53. Горизонтальные шлиры льда в керне из скважины на детальном площадке приямельского шельфа.



Рис. 2.54. Откол керна по вертикальным шлирам льда.



Рис. 2.55. Вертикальный шлир льда в керне из скважины на детальных площадках приямальского шельфа.

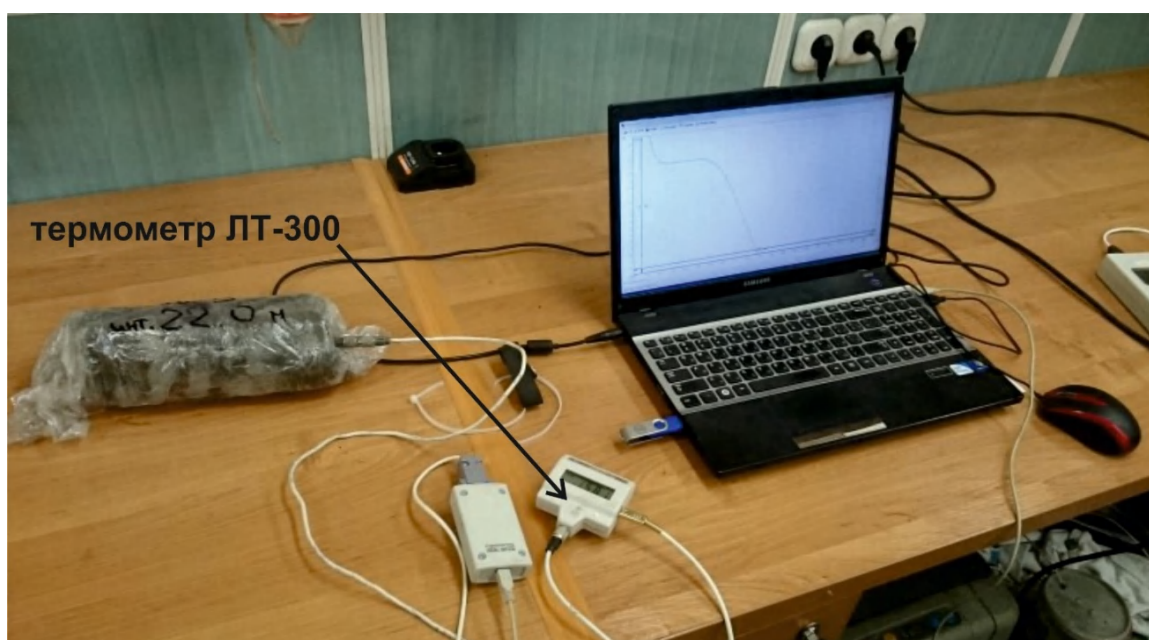


Рис. 2.56. Процедура определения температуры начала замерзания грунта (цикл оттаивания) с помощью термометра ЛТ-300. На дисплее отображена термограмма.



Рис. 2.57. Процедура определения теплопроводности грунта прибором KD2-PRO.

Для определения температуры грунтов шельфа автор использовал косы цифровые термометрические производства ООО «МГУ-геофизика» (рис. 2.58).



Рис. 2.58. Коса цифровая термометрическая с возможностью передачи данных по радиоканалу до 500 м на акватории.

Для получения достоверных данных по температуре пород шельфа автор выполнил сертификацию кос цифровых термометрических и получил свидетельство средства измерения на термометрические косы, использующиеся в исследованиях шельфа арктических морей и на суше (Фролов и др., 2022). Комплект документации по сертификации средства измерения приведен в приложении В. Автором были использованы данные кос цифровых термометрических при выполнении работ по разработанной методике на Чаунской губе, шельфе Чукотского моря (2015 г.), Приямальском шельфе район о. Белый Карского моря (2016–2017 гг.), Хатангском заливе шельф моря Лаптевых (2017 г.).

При измерении температур пород шельфа в летний период использовались косы термометрические, поплавков для логгера, ноутбук для радиосвязи с логгером (рис. 2.59).



Рис. 2.59. Комплект для термометрии на шельфе Карского моря на борту НИС «Кимберлит».

По окончании бурения в скважину опускается термокоса (рис. 2.60) и производится первый замер температуры, далее обсадная колонна собирается, термокоса остается в толще пород, и судно сходит со скважины. Термокоса оборудована специальным логгером, который может записывать и передавать информацию о температуре грунтов по радиоканалу в течении 5 лет. Логгер термокосы располагается на поверхности воды вследствие положительной плавучести (рис. 2.61). Такой подход к измерению температур пород шельфа позволяет получить достоверные данные о температуре пород, так как в процессе бурения неизбежно будет происходить растепление пород вокруг скважины, а выстойка скважины занимает от нескольких дней до нескольких недель. Работы на участках приямальского шельфа показали, что в песчаных породах выстойка пород длится до 3 недель. На рисунке 2.62 приведен пример ежесуточных замеров температур с термокосы установленной по технологии описанной выше. Полная «выстойка» скважины 1 завершилась за 7 дней.



Рис.2.60. Установка термокосы в скважину на шельфе, НИС «Кимберлит». Пряймальский шельф 2016 г.



Рис. 2.61. Радио-логгер на поверхности акватории Карского моря, 2016 г.

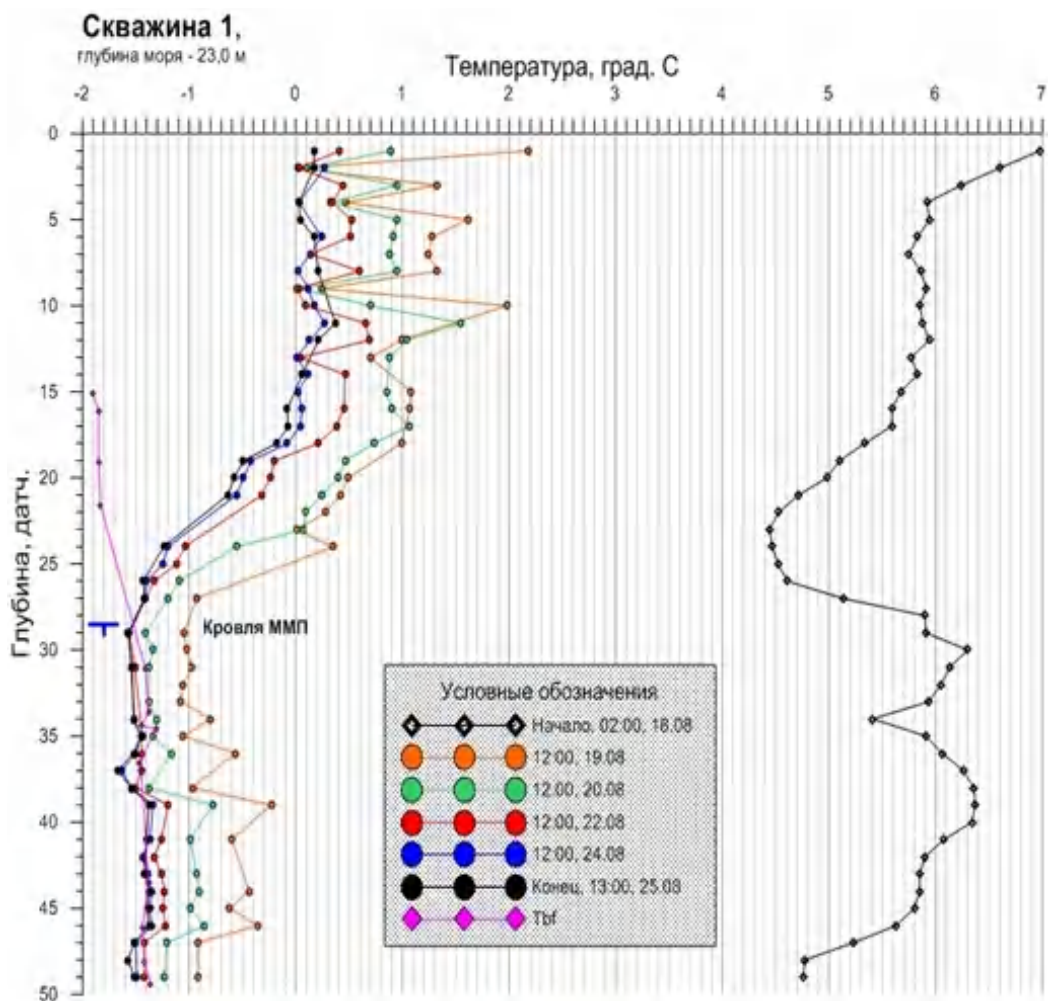


Рис. 2.62. Пример «выстойки» скважины на приамальском шельфе, 2016 г.

При измерении температур пород шельфа в зимний период все работы производятся непосредственно с припайного льда. Бурение со льда производится точно так же, как и на суше, с той лишь разницей, что обсаживать скважину необходимо всегда и процесс бурения не должен занимать долгое время из-за подвижек льда, который может защемить буровую колонну (рис. 2.63).



Рис. 2.63. Бурение со льда, шельф моря Лаптевых. Работы по гранту РФФИ.

В процессе бурения производится геологическое и геокриологическое описание керна, отбор и упаковка проб грунта. По окончании бурения в скважину опускаются термокосы (рис. 2.64) и, после «выстойки» температуры в скважине, изымаются.



Рис. 2.64. Термометрия в скважине с припайного льда Хатангского залива. Шельф моря Лаптевых, 2017 г.

Пятой составляющей комплекса геокриолого-геофизических исследований криолитозоны шельфа является математическое моделирование тепловых полей на опорных участках. При этом задаются характерные для этого участка палеосценарии, выбираются граничные условия, задается разрез и его свойства, и моделируются температурные поля с помощью разработанных на кафедре геокриологии программных средств.

Особенностью предлагаемого подхода является представительность опорных участков. Использовались 7 участков на арктическом шельфе России: на шельфе моря Лаптевых в районе залива губы Буор-Хая (опорный разрез 1, Тикси), в районе Хатангского залива (опорный разрез 2, Хатанга), в районе пролива Вилькицкого (опорный разрез 3). На шельфе Карского моря моделировалось тепловое поле в районе о-ва Диксон (опорный разрез 4), в районе о-ва Белый

(опорный разрез 5, о-в Белый), в районе залива Байдарацкой губы (опорный разрез 6, Байдарацкая губа), на шельфе Печорского моря тепловое поле моделировалось в районе от Карских ворот до о-ва Колгуев (опорный разрез 7, Печорское море). Участки были выбраны с учетом их представительности и наличия фактических материалов по буровым работам и лабораторным испытаниям пород на шельфе как полученных автором в период 2006–2018 гг., так и имеющихся в Росгеолфонде.

Выводы:

1. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наиболее информативным методом для дистанционного изучения фазового состояния пород шельфа являются измерения электрических свойств пород. УЭС пород в зависимости от литологического состава и засоления изменяются от 10^5 Ом·м до 1 Ом·м при переходе породы из мерзлого состояния в талое и наоборот.

2. Результат многолетних работ автора по исследованию основных геофизических свойств пород шельфа позволил получить новые данные о критериях выделения многолетнемерзлых пород на сейсмических и геоэлектрических разрезах. Было показано, что электрические свойства мерзлых засоленных пород при переходе в мерзлое состояние изменяются в разы (с 1 до 3–10 Ом·м), что значительно меньше, чем для незасоленных пород, где УЭС возрастает в сотни и тысячи раз. В то же время скорости прохождения упругих колебаний в засоленных породах возрастают на 5–10%, что не является ярким диагностическим признаком. Анализ кривых незамерзшей воды в области температур, близких к фазовым переходам, позволяет сделать вывод о том, что на границе талых и мерзлых пород далеко не всегда может быть получено яркое отражение, так как на границе «талое-мерзлое» происходит плавное изменение льдистости. Тем не менее следует отметить, что в случае наличия в разрезе незасоленных мерзлых пород или пород с низкой засоленностью, методы

сейсморазведки вполне могут решить задачу картирования мерзлых пород, так как при таком разрезе ожидается увеличение скоростей распространения продольных волн практически в 2 раза, что не может не отразиться на сейсмическом разрезе.

3. Изучение теплофизических свойств пород арктического шельфа, позволило объяснить причины изменения геофизических свойств пород шельфа и сформулировать критерии выделения мерзлых пород на геоэлектрических и сейсмических разрезах.

4. Разработана методика и программно-технические средства для комплексных геокриолого-геофизических исследований при изучении субмаринных многолетнемерзлых и гидратных толщ на траверсах и полигонах шельфа Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского морей. Предложена новая структура комплексного геокриолого-геофизического анализа, включающего электроразведку методом зондирования становлением поля для изучения многолетнемерзлых пород на шельфе, электроразведку методом частотных зондирований для изучения многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суша-шельф, инверсию геофизических данных в режиме фиксированных модельных УЭС по лабораторным испытаниям грунтов, буровые работы, моделирование тепловых полей, лабораторные испытания грунтов и термометрия в выстоявшихся скважинах.

5. Для осуществления работ по разработанной методике под руководством автора созданы: новый аппаратный комплекс частотных зондирований «HF-EM» для изучения переходных зон суша–шельф по запатентованной технологии работ; новый аппаратный телеметрический комплекс «ТЕЛСС-3-Э» для изучения методом становления поля шельфа арктических морей по запатентованной технологии работ, новый измеритель «APL-02» для выполнения лабораторных электрометрических испытаний грунтов; новый аппаратно-методический комплекс КЦТ для установки термокосы с судна,

автономной работы термокосы на акватории шельфа без помощи судна, дистанционной передачи термометрических данных на судно.

6. Необходимым условием для выполнения инверсии геофизических данных, проведения тепловых расчетов, оценки фазового состояния пород шельфа являются лабораторные испытания грунтов. Испытания необходимо выполнять в полевых и лабораторных условиях, определять физические, водно-физические и теплофизические свойства, электрические, акустические свойства талых и мерзлых пород шельфа. На основании полевых и лабораторных исследований многолетнемерзлых пород шельфа морей Российской Арктики создана база данных физических свойств пород арктического шельфа.

Глава 3. Моделирование теплового режима и определение распространения мерзлых пород на шельфе

3.1. История геологического развития шельфа: трансгрессии и регрессии моря

Для задания палеосценариев на шельфе рассматриваются современные представления о трансгрессиях и регрессиях Арктического океана (Geibert et al., 2021, Miller et al., 2010; Lambeck et al., 2002; Brigman-Grette et al., 2004; Schmidt et al., 2007; Павлидис, 1998; Селиванов 1996). Наибольшее влияние на положение кровли и подошвы современной шельфовой криолитозоны оказали последний максимум регрессии Арктического океана на рубеже 20–15 тыс. лет назад и последняя трансгрессия Арктического океана в период 15–13 тыс. лет назад – современность. При составлении палеосценария автор считает низменным рельеф шельфа в прошлом. Для палеореконструкций в период 400 тыс. лет назад – современность автор использовал палеотемпературы по данным (Васильчук, 1992; Miller et al., 2010), а также собственные геофизические данные, полученные в период экспедиции SWERUS-C3 (Jakobsson et al., 2016; Gemery et al., 2017). В эпоху регрессий арктического бассейна усиливалась суровость климата с понижением среднезимних температур до $-24\dots-34^{\circ}\text{C}$ (Шполянская 2015; Стрелецкая, 2015) и происходило промерзание оголившегося шельфа, образование отложений ледового комплекса с широким развитием полигонально-жильных льдов. В периоды локальных потеплений климата и трансгрессий арктического бассейна происходила деградация мерзлых толщ на арктическом шельфе и протаивание отложений ледового комплекса. Длительность термохронов и интервалов трансгрессий в последние 400 тыс. лет (МИС-11с; МИС-9е; МИС-7с; МИС-5е; МИС-1) была не более 10–15 тыс. лет. При переходе мерзлых толщ из субаэрального в субмаринное состояние (при трансгрессии арктического бассейна) температура мерзлой толщи повышалась, по-видимому, от $-20\dots-25^{\circ}\text{C}$ до $-1\dots-1,8^{\circ}\text{C}$ (Жигарев, 1997). При отрицательных температурах арктического бассейна протаивание сверху замедлялось. Деградация мерзлой толщи арктического шельфа происходила как снизу в

соответствии с величиной теплового потока из недр, так и, по-видимому, сверху в результате проникновения в мерзлые толщи морских солей (химическая, или концентрационная, деградация).

Присутствие ледового комплекса на низменностях Восточной Сибири, на Чукотке, севере Якутии, Таймыре, Гыдане, Ямале указывает на отсутствие покровных ледников в период плейстоценовых похолоданий (Васильчук, 1992). Это позволяет использовать гляциоэвстатические кривые уровня Мирового океана для оценки уровня восточной части арктического бассейна (Geibert et al., 2021, Miller et al., 2010) и палеотемпературные данные на поверхности в позднем плейстоцене-голоцене (Васильчук, 1991, 1992, 2006).

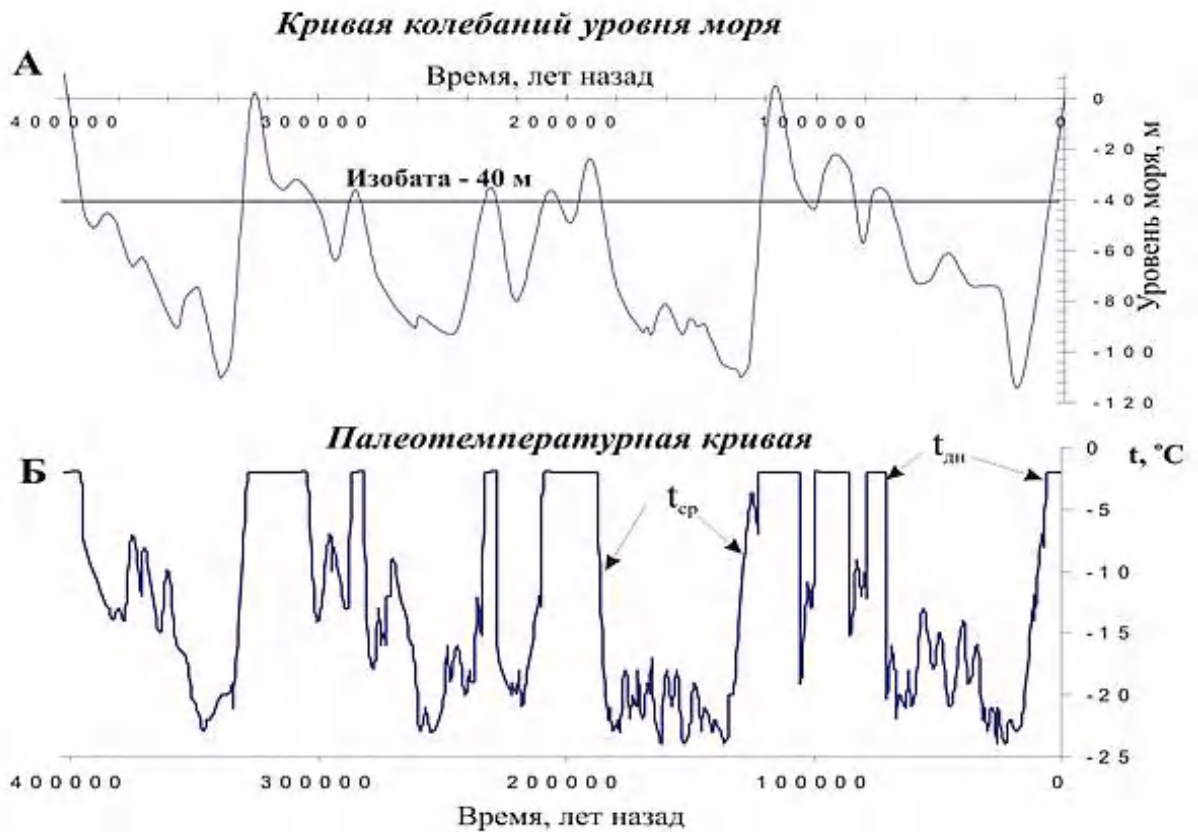


Рис. 3.1. Кривая колебаний уровня моря (А) и палеотемпературная кривая (Б) для Восточно-Сибирского шельфа (W. Geibert et al., 2021, Ю.К.Васильчук, 1991, 1992, 2006).

Н.Н.Романовским и А.А.Елисеевой были построены палеотемпературные кривые для Восточно-Сибирского шельфа для 75° северной широты (рис. 3.1) по

данным. В периоды осушения шельфа среднегодовые температуры понижались от -20 до -23°C .

Особенностью ЛК Западного Таймыра, в отличие от ЛК Восточно-Сибирского региона, является его поздний возраст и небольшие мощности. Изотопный анализ подземных льдов показал, что циркуляция в атмосфере Российского арктического сектора была неизменной в период 50 тыс. лет назад – современность. Существование ледникового щита на шельфах Баренцева и Карского морей в течении последнего похолодания (МИС-2) не повлияло на циркуляцию воздушных масс. При небольших размерах ледникового щита по латтерали и высоте препятствия для переноса воздушных масс не возникало. Вместе с тем существование ледникового щита в западном и частично в восточном секторе Российской Арктики подтверждается исследованиями автора в период экспедиции SWERUS-C3 (Jakobsson, et al., 2016).

Ю.К.Васильчук (Васильчук, 1991) и И.Д. Стрелецкая (2015) использовали изотопный состав ПЖЛ для идентификации их возраста, реконструкции геологической истории и палеоклимата побережья Карского моря в позднем плейстоцене-голоцене, выполнили оценку зимних и летних среднегодовых температур воздуха побережья и шельфа Карского моря, составили схемы природной обстановки и распределение климатических характеристик в пространстве для МИС 3, МИС 2, МИС 1 (таблица 3.1).

Отметим, что помимо регрессий и трансгрессий на арктическом шельфе и, следовательно, охлаждением поверхности шельфа в период осушения, температура на поверхности в этот период менялась в связи с широтной и меридиональной зональностью, понижаясь на $-1,5^{\circ}\text{C}$ на 1° широты (Геокриология СССР, 1989), а также повышаясь до $+1,0^{\circ}\text{C}$ за счет влияния фронта положительных температур моря на глубинах 2–10 м в период трансгрессии. (Жигарев, 1997).

Таблица 3.1. Фрагмент оценочной палеогеографической таблицы реконструкции этапов и условий эволюции криолитозоны побережья и шельфа Карского моря (по Ю.К.Васильчуку, 1991)

ОБЩАЯ				МИС	ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ					Биоклиматические зоны (для субквальных условий ландшафты ближайших субаральных территорий)
НАДРАЗДЕЛ	РАЗДЕЛ	ЭВНО	СТУПЕНЬ	СТАДИЯ / ВОЗРАСТНЫЕ ГРАНИЦЫ	Тср.январь, °С	Тср.зим, °С	Тср.хол, °С	Тлетн. период, °С	Тср.год, °С	
СОПОЧНАЯ КАРГА										
ГОЛОЦЕНОВЫЙ			1	Современ. состоян. (за последние 30 лет)	-29... -27	-28... -26	-21... -19	6...8	-11,7	Типичная тундра
				Моложе 11,7 тыс. лет	-30... -28 (около 3-4 т.л.н.)	-29... -27 (около 3-4 т.л.н.)	-22... -19 (около 3-4 т.л.н.)	1...3 (около 3-4 т.л.н.)	-14...-12 (около 3-4 т.л.н.), предпол. -8... -5 в период оптимума около 4-6 т.л.н.	Арктическая, типичная тундра около 3-4 т.л.н., лесотундра в период оптимума около 4-6 т.л.н.
ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ	ВЕРХНЕЕ	Ш ₄	2	24-11 т.л.н.	-34... -32	-34... -31	-24... -21	0...2	-16...-13	Тундростепи, арктические тундры
		Ш ₃	3	57-24 т.л.н.	-	-	-	-	-	Типичная тундра
		Ш ₂	4	71-57 т.л.н.	ОТЛОЖЕНИЯ НЕ УСТАНОВЛЕННЫ					

3.2. Геотермический поток на арктическом шельфе и низменностях

Основной тектонической особенностью арктического шельфа является рифтовая система моря Лаптевых (рис. 3.2). Как было показано в Главе 1, суммарная мощность осадочной толщи составляет 10–13 км в районе Усть-Ленского рифта и не менее 1–2 км на своде Восточно-Лаптевского поднятия (Drachev et al., 2003). Этот вывод принципиально важен для моделирования теплового поля и истолкования результатов геофизических исследований на шельфе морей Российской Арктики.

Тепловой поток на территории Арктики не постоянен. Для моделирования теплового режима на опорных участках автором был использован каталог теплового потока Арктики (Pollack et al., 1991), Национальный атлас Арктики (Роскартография, 2017) и результаты собственных исследований по проекту SWERUS-C3 (O'Regan et al., 2016).

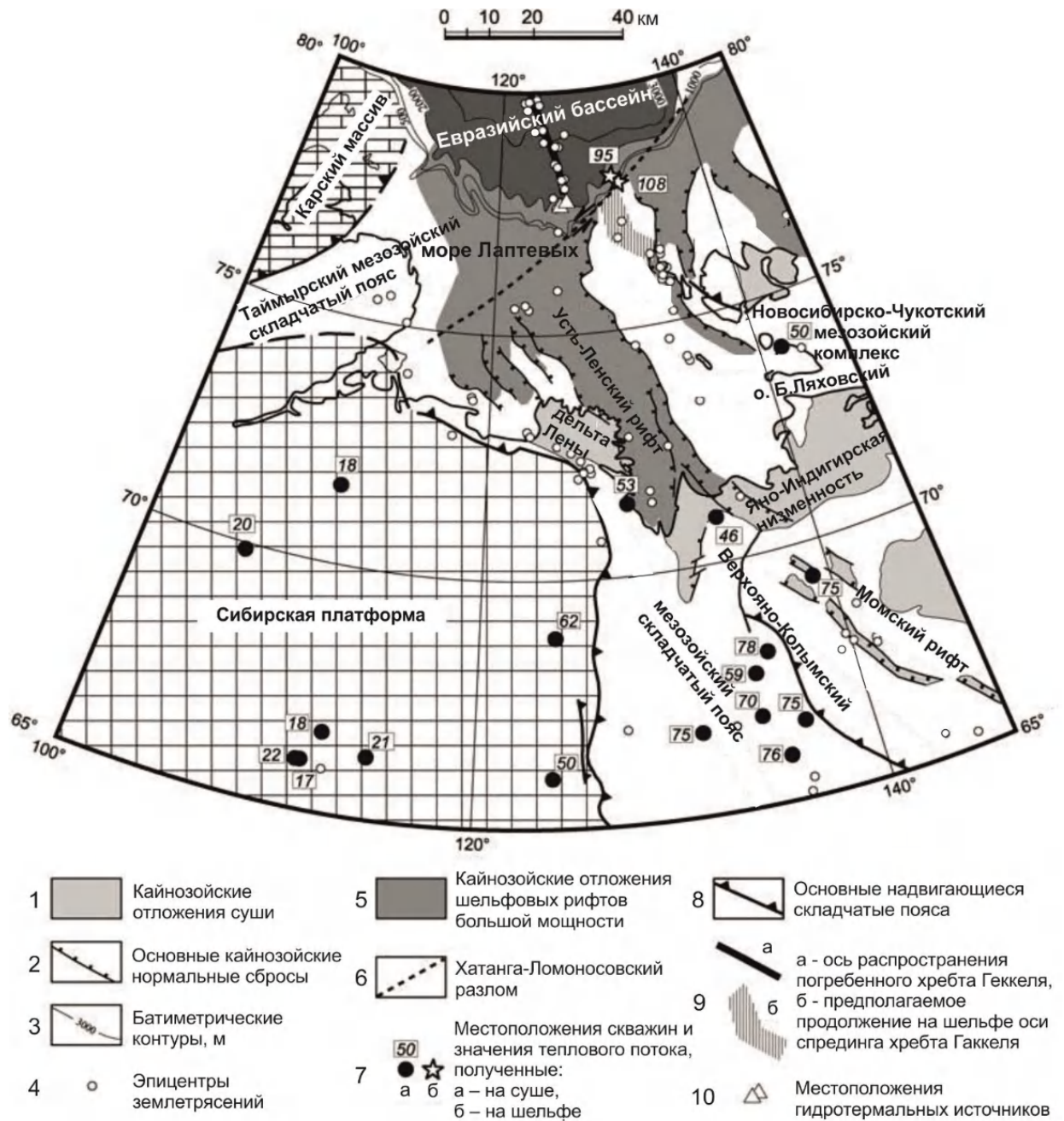


Рис. 3.2. Главные структурные элементы района исследований (S.S.Drachev et al., 2003).

1 – кайнозойские отложения суши, 2 – основные кайнозойские нормальные сбросы, 3 – батиметрические контуры, м, 4 – эпицентры землетрясений, 5 – кайнозойские отложения шельфовых рифтов большой мощности, 6 – Хатанга-Ломоносовский разлом, 7 – местоположения скважин и значения теплового потока, полученные: а – на суше, б – на шельфе, 8 – основные надвигающиеся складчатые пояса, 9: а – ось распространения погребенного хребта Гаккеля, б – предполагаемое продолжение на шельфе оси спрединга хребта Гаккеля, 10 – местоположения гидротермальных источников

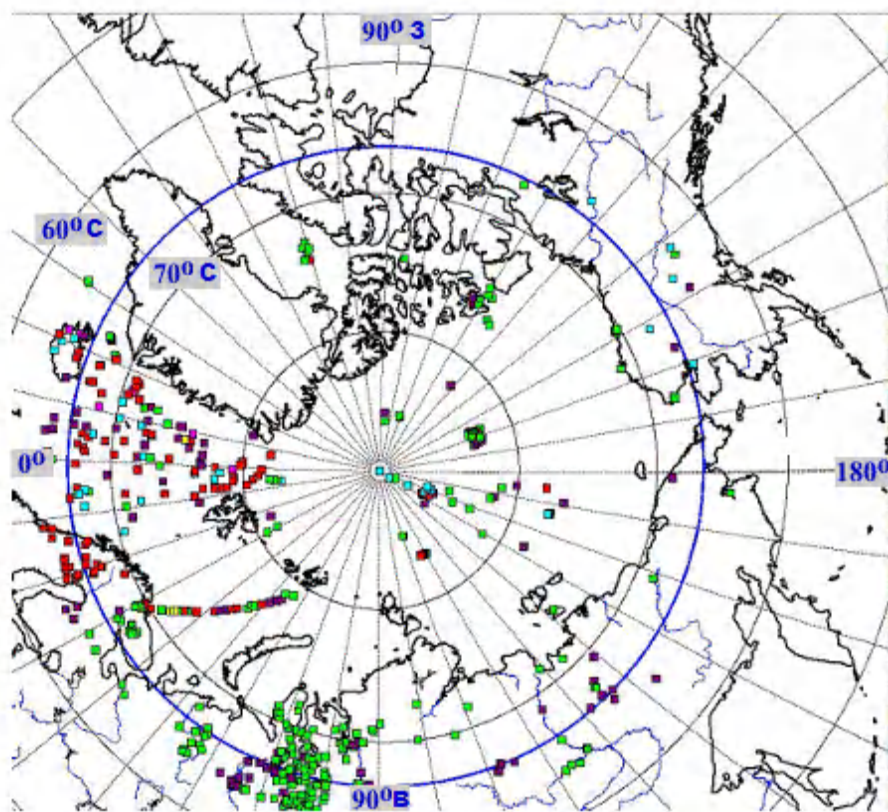


Рис. 3.3. Каталог измерений теплового потока Арктики (H.N.Pollack et al., 1991).

3.3. Физические свойства пород арктического шельфа

Для моделирования теплового поля на арктическом шельфе было выбрано 7 опорных участков:

1. Залив губы Буор-Хая – Тикси (шельф моря Лаптевых, береговая часть);
2. Хатангский халив (шельф моря Лаптевых);
3. Пролив Вилькицкого (граница шельфов морей Лептева и Карского);
4. Диксон (Восточная часть шельфа Карского моря);
5. О. Белый (Западная часть шельфа моря Лаптевых);
6. Байдарацкая губа (Западная часть шельфа моря Лаптевых, береговая часть);
7. Печорское море.

Опорные участки были выбраны с учетом их представительности и наличием фактического материала по буровым работам и лабораторным испытаниям пород на шельфе как полученного автором в период 2006–2018 гг., так и имеющихся в Росгеолфонде. На каждом участке были проанализированы имеющиеся данные и построены типичные для данного участка геологические колонки и сопоставлены лабораторные данные по плотности, влажности, льдистости, температуре начала замерзания, удельных электрических сопротивлениях (Приложение А). Пример наиболее типичных результатов анализа имеющихся данных приведен для зоны 2 (Хатангский залив) по анализу данных на скважинах БН13-17 (рис. 3.4), БН 1-17 (рис. 3.5) БН2-17 (рис. 3.6), где были вскрыты многолетнемерзлые породы и по скважине БН8-17 (рис. 3.7), где мерзлые породы не были вскрыты до глубин 50 м. были заданы физические свойства пород для моделирования теплового поля на шельфе.

Обобщение всех имеющихся у автора данных из производственных и научных отчетов приведенных на стр. 291–297 в списке литературы позволило выделить 7 опорных участков. Карта опорных участков приведена на рисунке 3.8.

Скважина БН-13-17

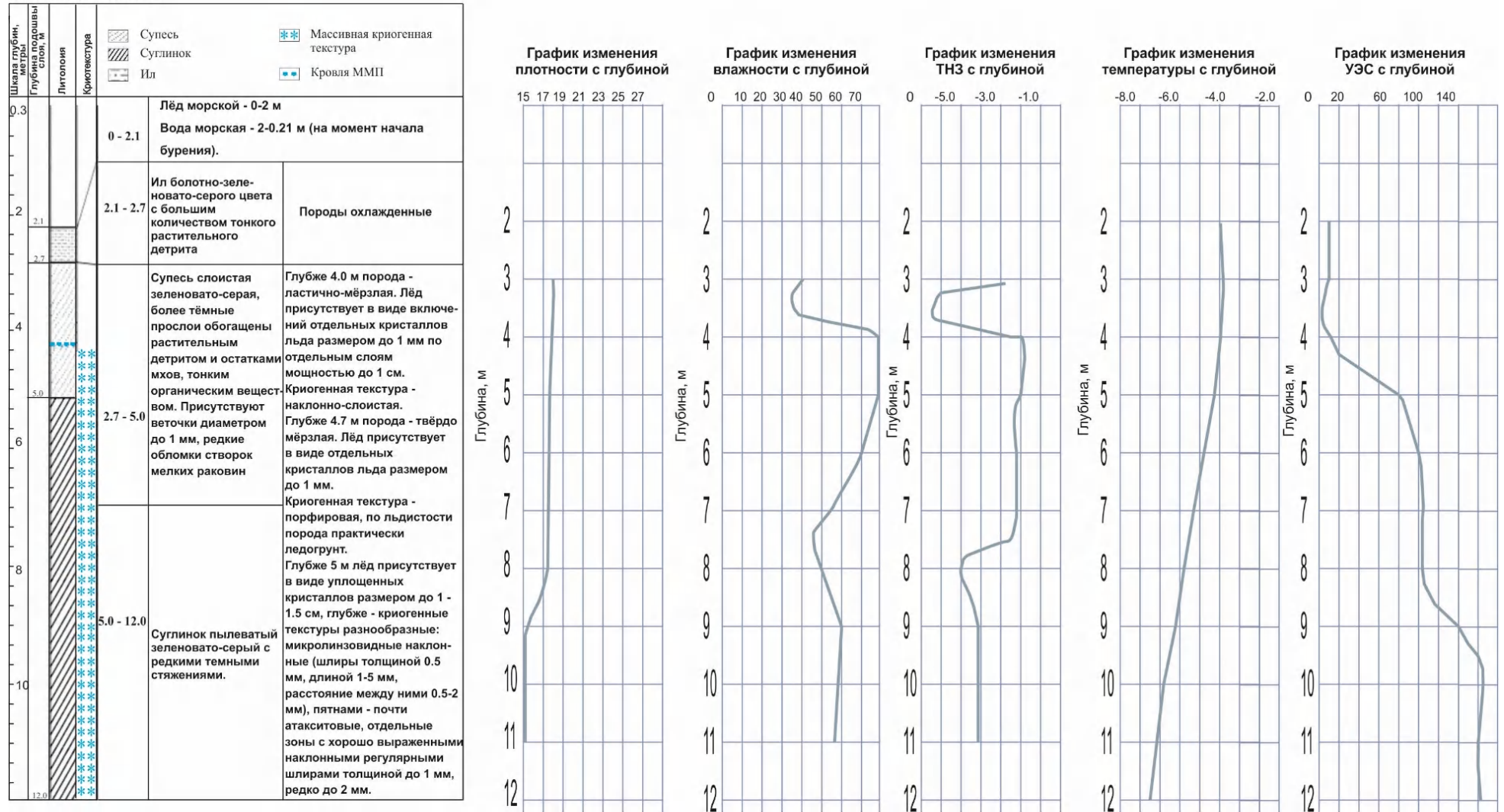


Рис. 3.4. Геологическая колонка и результаты лабораторных испытаний пород по скв. БН13-17.

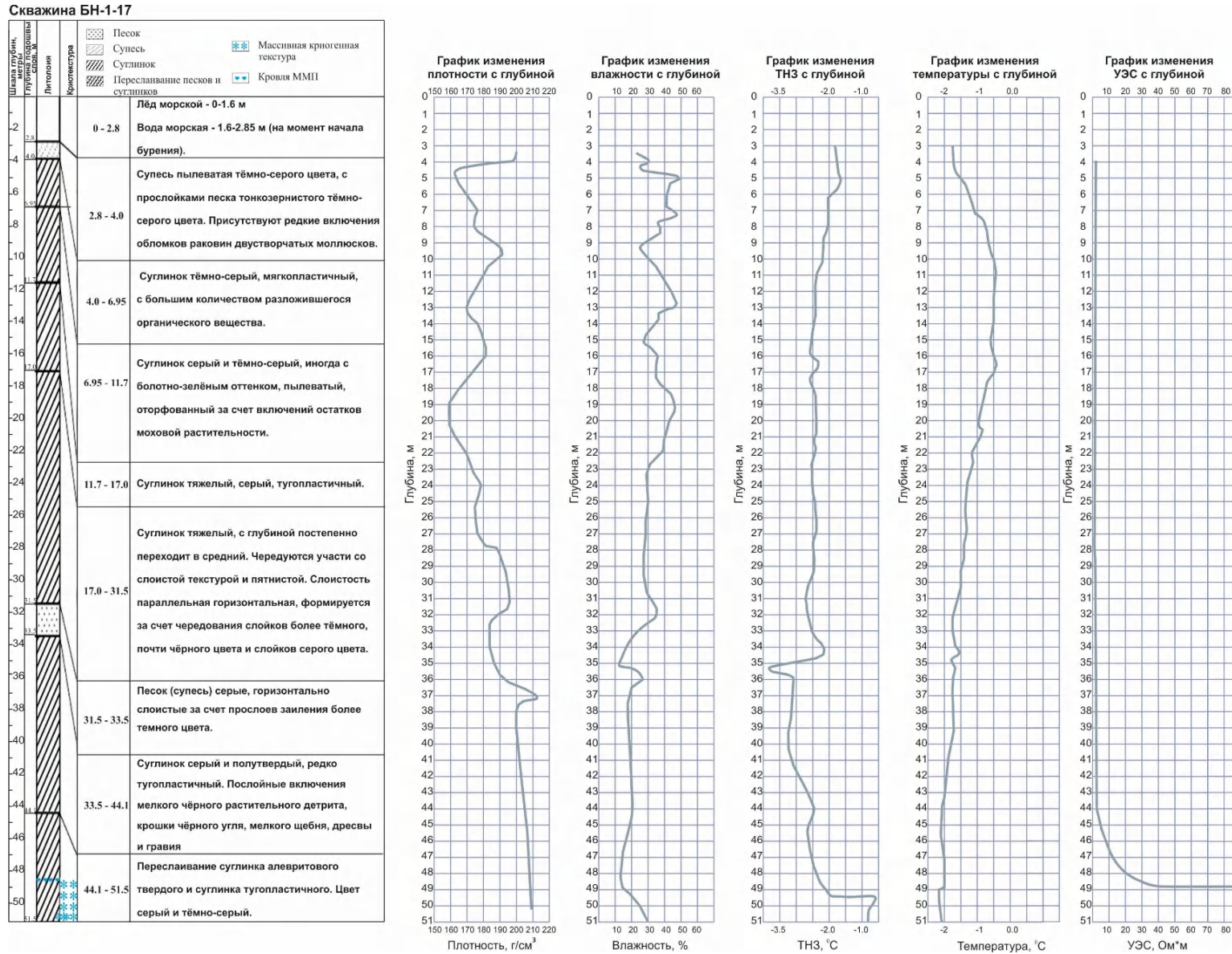


Рис. 3.5. Геологическая колонка и результаты лабораторных испытаний пород по скв. БН1-17.

Скважина БН-2-17

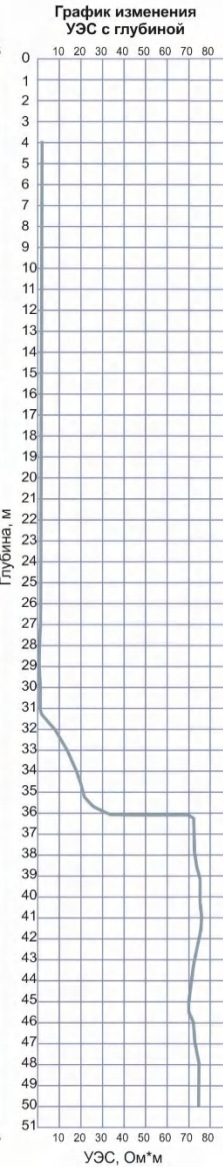
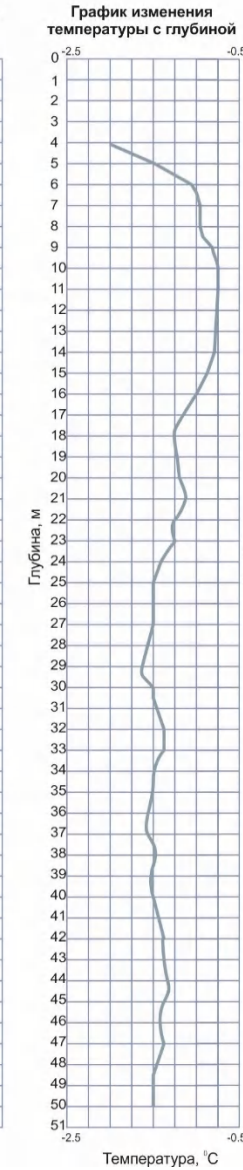
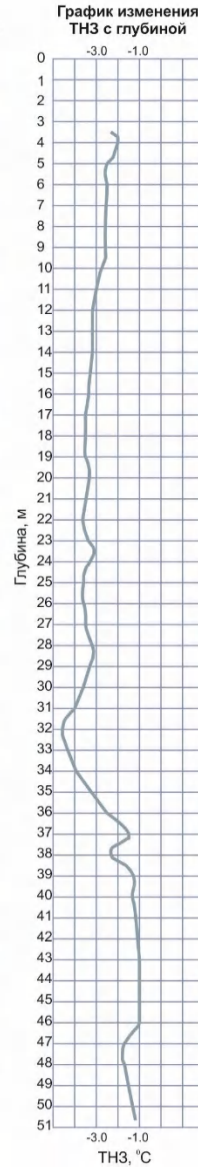
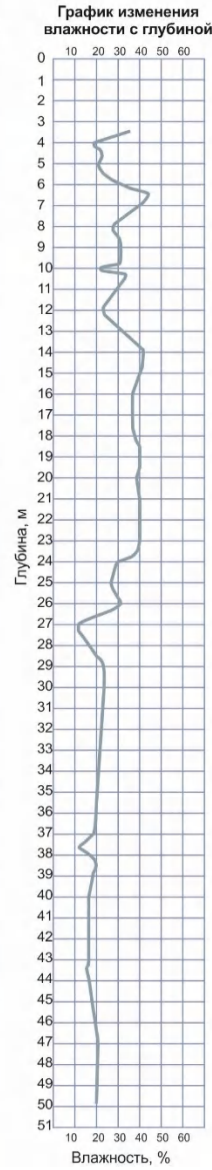
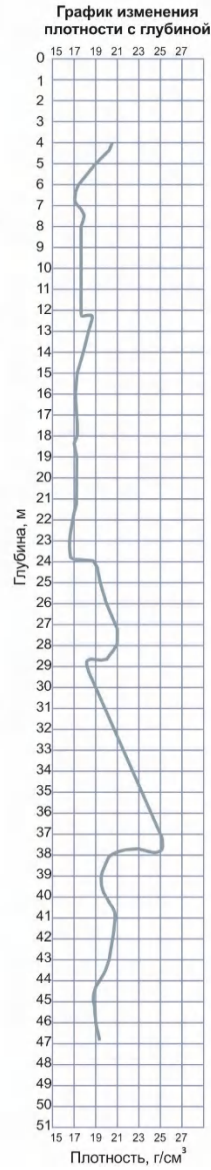
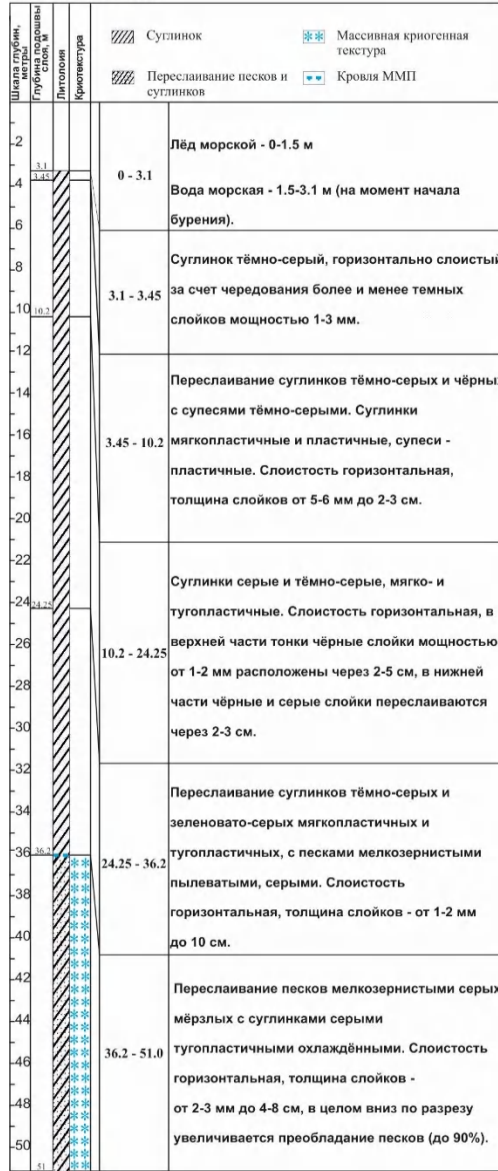


Рис. 3.6. Геологическая колонка и результаты лабораторных испытаний пород по скв. БН2-17.

Скважина БН-8-17

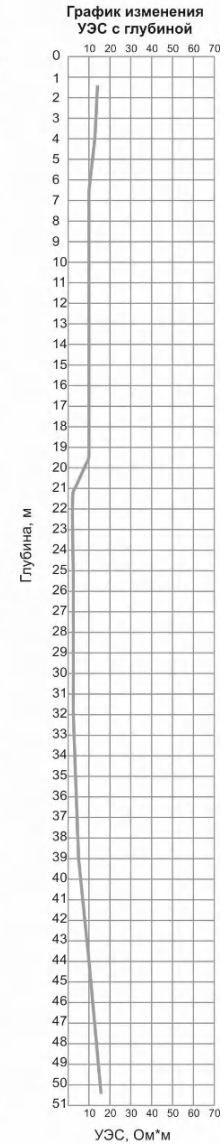
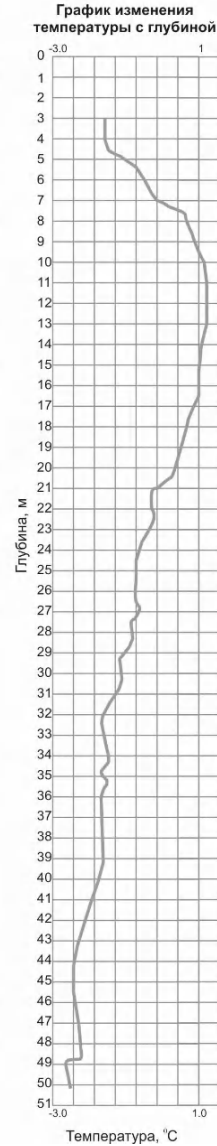
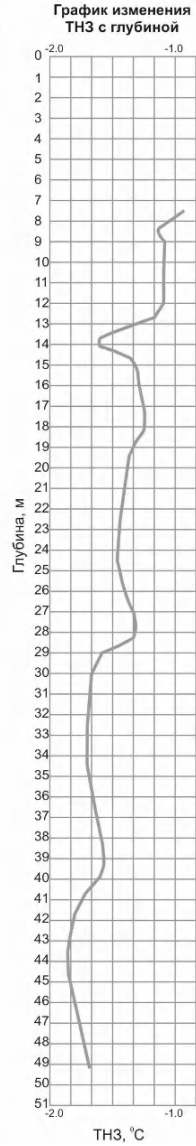
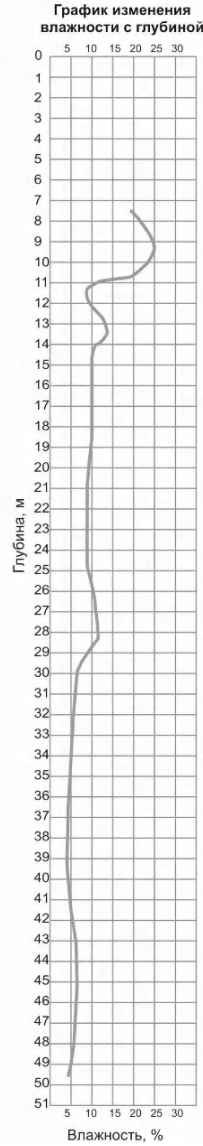
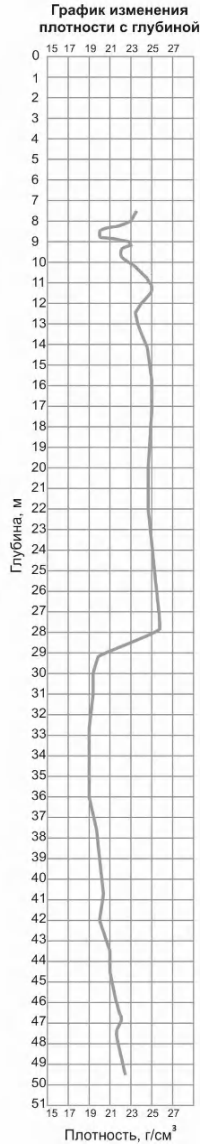
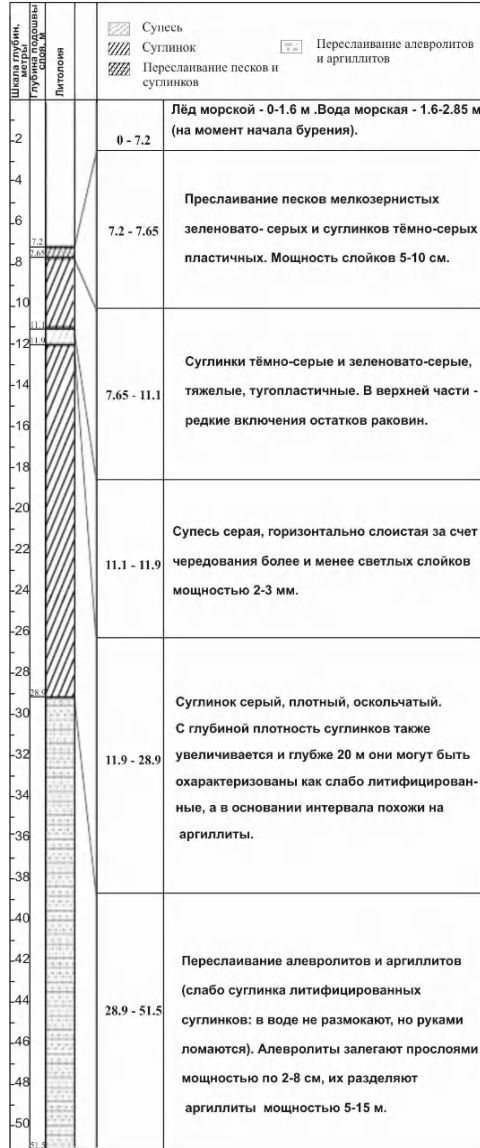
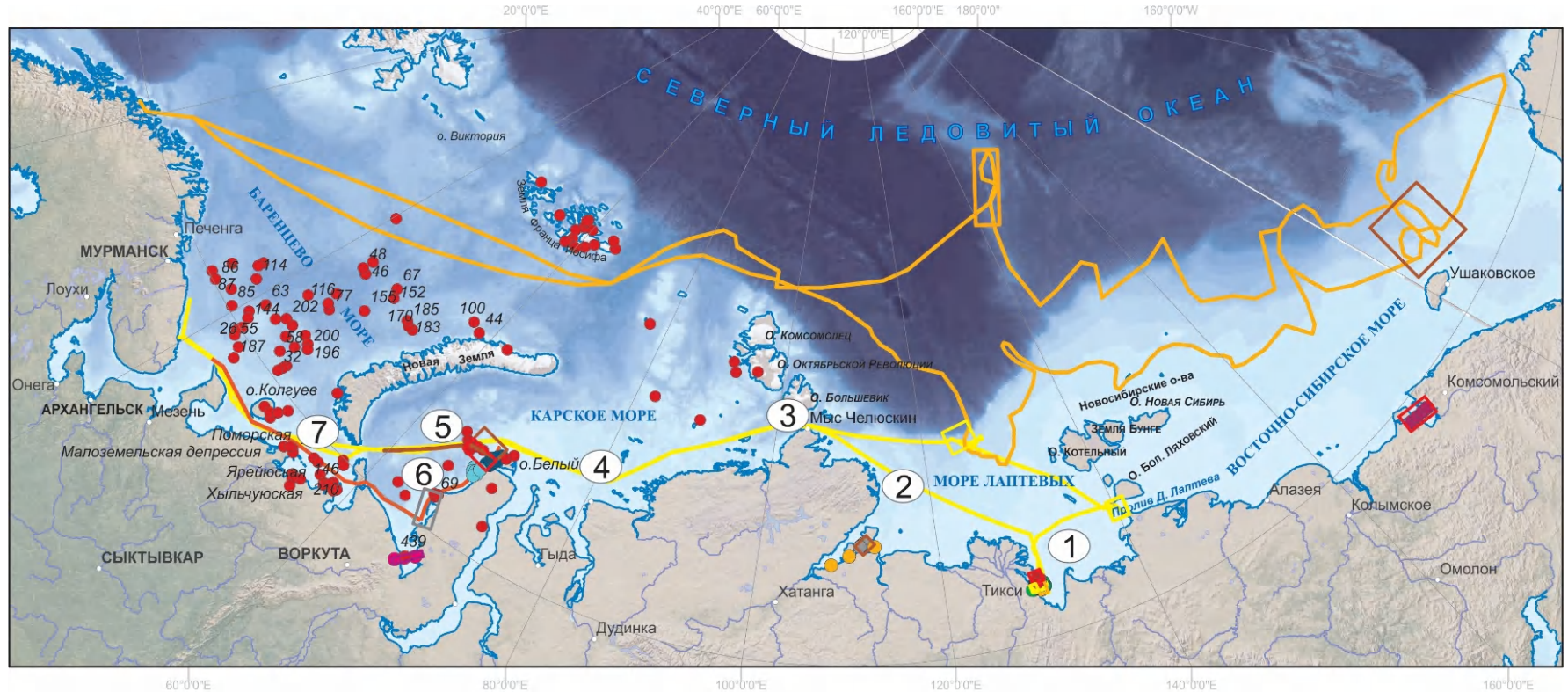


Рис. 3.7. Геологическая колонка и результаты лабораторных испытаний пород по скв. БН8-17.



У С Л О В Н Ы Е О Б О З Н А Ч Е Н И Я



Рис. 3.8. Расположение опорных участков для моделирования теплового состояния пород шельфа.

Для моделирования положения подошвы ММП на шельфе Печорского, Карского и Лаптевых морей была построена одномерная модель. В качестве верхних граничных условий приняты палеогеографические сценарии, приведенные в параграфе 3.1. В палеогеографических сценариях для теплового моделирования температуры на поверхности зависят от четырех факторов: зависимости от глубины арктического бассейна, широтной зональности, меридиональной зональности, влияния фронта положительных температур моря на глубинах 2–10 м в период трансгрессии. Геолого-тектонические данные представлены в виде геологической модели. Это адаптированные для моделирования данные о составе, свойствах пород и плотности теплового потока для ключевых участков шельфа (рис. 3.4 – 3.6). Они составлены на основе результатов исследований, приведенных в главах 1, 2, 3, обобщены и систематизированы в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Геологическая, палеогеографическая модель и физические свойства пород для участков 1–7

ИЗОБАТА 50М

участок 1		участок 2		участок 3		участок 4		участок 5		участок 6		участок 7	
время, тыс.лет	темп., градус	время тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус
ранее 190	-1,8	ранее 190	-1,8	ранее 190	-1,8	190	-1,8	90	-1,8	190	-1,8	190	-1,8
190-120	-17,5	190-120	-22	190-120	-26,5	120	-22	120	-17,5	120	-14,5	120	-14,5
120-95	-1,8	120-95	-1,8	120-95	-1,8	95	-1,8	95	-1,8	95	-1,8	95	-1,8
95-85	-7,5	95-85	-12	95-85	-16,5	85	-12	85	-7,5	85	-4,5	85	-4,5
85-75	-1,8	85-75	-1,8	85-75	-1,8	75	-1,8	75	-1,8	75	-1,8	75	-1,8
75-65	-15,5	75-65	-20	75-65	-24,5	65	-20	65	-15,5	65	-12,5	65	-12,5
65-35	-13,5	65-35	-18	65-35	-22,5	35	-18	35	-13,5	35	-10,5	35	-10,5
35-10	-18,5	35-10	-23	35-10	-27,5	10	-23	10	-18,5	10	-15,5	10	-15,5
10-9	1	10-9	1	10-9	1	9	1	9	1	9	1	9	1
9-0	-1,8	9-0	-1,8	9-0	-1,8	0	-1,8	0	-1,8	0	-1,8	0	-1,8
Тикси тепловой поток 53 мВт/м ²		Хатанга тепловой поток 42 мВт/м ²		Пролив Вилькицкого тепловой поток 50 мВт/м ²		Диксон тепловой поток 48 мВт/м ²		о. Белый тепловой поток 53 мВт/м ²		Байдарацкая губа тепловой поток 58 мВт/м ²		Печорское море тепловой поток 54 мВт/м ²	
Н=0-1000 м пески, суглинки влажность = 18 %		Н=0-300 м суглинки теплопроводность = 1.4 Вт/м·К теплоемкость= 1420 Дж/кг·К		Н=0-800 м глины плотность = 1.7 г/см ³		Н=0-300 м глины, пески пылеватые влажность =32 %		Н=0-300 м глины, суглинки, супеси		Н=0-300 м глины суглинок супесь пластичная		Н=0-200 м суглинок морено- подобный плотность = 2.1 г/см ³	
				Н=800-1000м								Н=200-450м	

<p>плотность 1.7 г/см³</p> <p>теплопроводность 1.7 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопроводность 3 (м)Вт/м·К</p> <p>ТНЗ= - 1 °С</p>	<p>влажность =40%</p> <p>плотность= 1,8-1,9 г/см³</p> <p>ТНЗ= - 2 °С</p>	<p>переслаивание глин, песчаников, алевролитов</p> <p>плотность = 1.8 г/см³</p>	<p>Н=300-1000 м</p> <p>переслаивание глин, алевролитов с прослоями песчаников</p> <p>плотность = 1.7 г/см³</p>	<p>влажность = 32%</p> <p>плотность = 1.8-1.9 г/см³</p> <p>теплопров.= 1.47 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров.= 2.24 (м) Вт/м·К</p> <p>теплоемк.= 1430 (т) Дж/кг·К</p> <p>теплоемк.= 1100 (м) Дж/кг·К</p> <p>ТНЗ = -1.3,-1.4 °С</p>	<p>песок пылеватый</p> <p>влажность = 27 %</p> <p>плотность = 1.9 г/см³</p> <p>теплопров.= 1.8 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров.= 2.2 (м) Вт/м·К</p> <p>теплоемк.= 1450 (т) Дж/кг·К</p> <p>теплоемк.= 1100 (м) Дж/кг·К</p> <p>ТНЗ= - 1.1 °С</p>	<p>песок св-серый кварцевый</p> <p>плотность = 2.0 г/см³</p> <p>Н=450=800м</p> <p>плотность = 1.9 г/см³</p> <p>плотность нет данных</p> <p>Н=800-1000м</p> <p>переслаивание глин, песчаников, алевролитов</p> <p>плотность = 2.3 г/см³</p>
	<p>Н=300-1000 м</p> <p>суглинки</p> <p>теплопроводность= 1.4 Вт/м·К</p> <p>теплоемкость= 1420 Дж/кг·К</p> <p>влажность =20%</p> <p>плотность= 1,8-1,9 г/см³</p> <p>ТНЗ= - 2 °С</p>			<p>Н=300-1000 м</p> <p>глины суглинки супеси</p> <p>влажность = 20%</p> <p>плотность 1.8-1.9 г/см³</p> <p>теплопров. = 1.47 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров. = 2.24 (м) Вт/м·К</p> <p>теплоемк. = 1430 (т)Дж/кг·К</p>	<p>Н=300-1000 м</p> <p>глины суглинок супесь пластичная песок пылеватый</p> <p>влажность =20 %</p> <p>плотность = 1.9 г/см³</p> <p>теплопров. = 1.8 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров = 2.2 (м) Вт/м·К</p> <p>теплоемк. = 1450 (т)Дж/кг·К</p>	

теплоемк.=
1100 (м) Дж/кг·К
ТНЗ = -1.3,-1.4 °С

теплоемк.=
1100 (м) Дж/кг·К
ТНЗ = - 1.1 °С

ИЗОБАТА 25М

участок 1		участок 2		участок 3		участок 4		участок 5		участок 6		участок 7	
время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус
ранее 190	-1,8	ранее 190	-1,8	ранее 190	-1,8	190	-1,8	190	-1,8	190	-1,8	190	-1,8
190-120	-17,5	190-120	-22	190-120	-26,5	120	-22	120	-17,5	120	-14,5	120	-14,5
120-105	-1,8	120-105	-1,8	120-105	-1,8	105	-1,8	105	-1,8	105	-1,8	105	-1,8
105-100	-10,5	105-100	-15	105-100	-19,5	100	-15	100	-10,5	100	-7,5	100	-7,5
100-95	-1,8	100-95	-1,8	100-95	-1,8	95	-1,8	95	-1,8	95	-1,8	95	-1,8
95-75	-7,5	95-75	-12	95-75	-16,5	75	-12	75	-7,5	75	-4,5	75	-4,5
75-65	-15,5	75-65	-20	75-65	-24,5	65	-20	65	-15,5	65	-12,5	65	-12,5
65-35	-13,5	65-35	-18	65-35	-22,5	35	-18	35	-13,5	35	-10,5	35	-10,5
35-7	-18,5	35-7	-23	35-7	-27,5	7	-23	7	-18,5	7	-15,5	7	-15,5
7-6	1	7-6	1	7-6	1	6	1	6	1	6	1	6	1
6-0	-1,8	6-0	-1,8	6-0	-1,8	0	-1,8	0	-1,8	0	-1,8	0	-1,8
Тикси тепловой поток 53 мВт/м ²	Хатанга , тепловой поток 42 мВт/м ²		Пролив Вилькицкого тепловой поток 50 мВт/м ²		Диксон тепловой поток 48 мВт/м ²		о. Белый тепловой поток 53 мВт/м ²		Байдарацкая губа тепловой поток 58 мВт/м ²		Печорское море тепловой поток 54 мВт/м ²		
Н=0-1000 м	Н=0-300 м		Н=0-800 м		Н=0-300 м		Н=0-300 м		Н=0-300 м		Н=0-200 м		

<p>пески, суглинки</p> <p>влажность = 18 %</p> <p>плотность 1.7 г/см³</p> <p>теплопров. = 1.7 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров. = 3 (м)Вт/м·К</p> <p>ТНЗ = - 1 °С</p>	<p>суглинки</p> <p>теплопров. = 1.4 Вт/м·К</p> <p>теплоемкость = 1420 Дж/кг·К</p> <p>влажность = 40%</p> <p>плотность = 1,8-1,9 г/см³</p> <p>ТНЗ= - 2 °С</p>	<p>глины</p> <p>плотность 1.7 г/см³</p>	<p>глины</p> <p>пески пылеватые</p> <p>влажность 32 %</p>	<p>глины</p> <p>суглинки</p> <p>супеси</p>	<p>глины</p> <p>суглинки</p> <p>супесь пластичная</p> <p>песок пылеватый</p>	<p>суглинок морено- подобный</p> <p>плотность = 2.1 г/см³</p>
	<p>Н=300-1000 м</p> <p>суглинки</p> <p>теплопров. = 1.4 Вт/м·К</p> <p>теплоемкость = 1420 Дж/кг·К</p> <p>влажность = 20%</p> <p>плотность = 1,8-1,9 г/см³</p> <p>ТНЗ= - 2 °С</p>	<p>Н=800-1000 м</p> <p>переслаивание глин, песчаников, алевролитов</p> <p>плотность = 1.8 г/см³</p>	<p>Н=300-1000м</p> <p>переслаивание глин алевролитов с прослоями песчаников</p> <p>плотность 1.7 г/см³</p>	<p>Н=300-1000м</p> <p>переслаивание глин алевролитов с прослоями песчаников</p> <p>плотность 1.7 г/см³</p>	<p>влажность = 32%</p> <p>плотность = 1.8-1.9 г/см³</p> <p>теплопров. = 1.47 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров. = 2.24 (м) Вт/м·К</p> <p>теплоемк. = 1430 (т) Дж/кг·К</p> <p>теплоемк. = 1100 (м)Дж/кг·К</p> <p>ТНЗ = -1.3,-1.4 °С</p>	<p>влажность = 27 %</p> <p>плотность = 1.9 г/см³</p> <p>теплопров. = 1.8 (т) Вт/м·К</p> <p>теплопров. = 2.2 (м) Вт/м·К</p> <p>теплоемк. = 1450 (т)Дж/кг·К</p> <p>теплоемк. = 1100 (м)Дж/кг·К</p> <p>ТНЗ= - 1.1 °С</p>
				<p>Н=300-1000 м</p> <p>глины</p> <p>суглинки</p> <p>супеси</p>	<p>Н=300-1000 м</p> <p>глины</p> <p>суглинки</p> <p>супесь пластичная</p> <p>песок пылеватый</p>	<p>Н=450=800 м</p> <p>глина алевролитовая</p> <p>плотность = 1.9 г/см³</p> <p>Н=800-1000 м</p> <p>переслаивание глин, песчаников, алевролитов</p> <p>плотность = 2.3 г/см³</p>

влажность = 20%	влажность = 20 %
плотность = 1.8-1.9 г/см ³	плотность = 1.9 г/см ³
теплопров. = 1.47 (т) Вт/м·К	теплопров. = 1.8 (т) Вт/м·К
теплопров. = 2.24 (м) Вт/м·К	теплопров. = 2.2 (м) Вт/м·К
теплоемк. = 1430 (т) Дж/кг·К	теплоемк. = 1450 (т) Дж/кг·К
теплоемк. = 1100 (м) Дж/кг·К	теплоемк. = 1100 (м) Дж/кг·К
ТНЗ = -1.3,-1.4 °С	ТНЗ = - 1.1 °С

ИЗОБАТА 5М

участок 1		участок 2		участок 3		участок 4		участок 5		участок 6		участок 7	
время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус	время, тыс.лет	темп., градус
ранее 190	1	ранее 190	1	ранее 190	1	190	1	190	1	190	1	190	1
190-120	-17,5	190-120	-22	190-120	-26,5	120	-22	120	-17,5	120	-14,5	120	-14,5
120-105	1	120-105	1	120-105	1	105	1	105	1	105	1	105	1
105-95	-10,5	105-95	-15	105-95	-19,5	95	-15	95	-10,5	95	-7,5	95	-7,5
95-75	-7,5	95-75	-12	95-75	-16,5	75	-12	75	-7,5	75	-4,5	75	-4,5
75-65	-15,5	75-65	-20	75-65	-24,5	65	-20	65	-15,5	65	-12,5	65	-12,5
65-35	-13,5	65-35	-18	65-35	-22,5	35	-18	35	-13,5	35	-10,5	35	-10,5
35-4	-18,5	35-4	-23	35-4	-27,5	4	-23	4	-18,5	4	-15,5	4	-15,5
4-0	1	4-0	1	4-0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Тикси тепловой поток 53 мВт/м ²	Хатанга , тепловой поток 42 мВт/м ²	Пролив Вилькицкого тепловой поток 50 мВт/м ²	Диксон тепловой поток 48 мВт/м ²	о. Белый тепловой поток 53 Вт/м ²	Байдарацкая губа, тепловой поток 58 мВт/м ²	Печорское море тепловой поток 54 мВт/м ²	
Н=0-1000 м пески, суглинки влажность = 18 % плотность = 1.7 г/см ³ теплопров. = 1.7 (т) Вт/м·К теплопров. = 3 (м) Вт/м·К ТНЗ = - 1 °С	Н=0-300 м суглинки теплопров. = 1.4 Вт/м·К теплоемкость = 1420 Дж/кг·К влажность = 40% плотность = 1,8-1,9 г/см ³ ТНЗ = - 2 °С	Н=0-800 м глины плотность 1.7 г/см ³	Н=0-300 м глины пески пылеватые влажность 32 %	Н=0-300 м глины суглинки супеси влажность = 32% плотность = 1.8-1.9 г/см ³ теплопров. = 1.47 (т) Вт/м·К теплопров. = 2.24 (м) Вт/м·К теплоемк. = 1430 (т) Дж/кг·К теплоемк. = 1100 (м) Дж/кг·К ТНЗ = -1.3,-1.4 °С	Н=0-300 м глины суглинок супесь пластичная песок пылеватый влажность = 27 % плотность = 1.9 г/см ³ теплопров. = 1.8 (т) Вт/м·К теплопров. = 2.2 (м) Вт/м·К теплоемк. = 1450 (т) Дж/кг·К теплоемк. = 1100 (м) Дж/кг·К ТНЗ = - 1.1 °С	Н=0-200 м суглинок морено- подобный плотность 2.1 г/см ³	
		Н=800-1000 м переслаивание глин, песчаников, алевролитов плотность = 1.8 г/см ³	Н=300-1000 м переслаивание глин алевролитов с прослоями песчаников плотность = 1.7 г/см ³			Н=200-450 м песок св-серый кварцевый плотность 2.0 г/см ³	
	Н=300-1000 м суглинки теплопров. = 1.4 Вт/м·К теплоемкость = 1420 Дж/кг·К влажность = 20% плотность = 1,8-1,9 г/см ³						Н=450=800 м глина алевролитовая плотность 1.9 г/см ³
							Н=800-1000 м переслаивание глин, песчаников, алевролитов плотность = 2.3 г/см ³
				Н=300-1000 м глины суглинки	Н=300-1000 м глины суглинки		

ТНЗ= - 2 °С

супеси

влажность = 20%

плотность =
1.8-1.9 г/см³

теплопров. =
1.47 (т) Вт/м·К

теплопров. =
2.24 (м) Вт/м·К

теплоемк =
1430 (т) Дж/кг·К

теплоемк.=
1100 (м) Дж/кг·К

ТНЗ = -1.3,-1.4 °С

супесь

пластичная

песок пылеватый

влажность = 20 %

плотность =
1.9 г/см³

теплопров. =
1.8 (т) Вт/м·К

теплопров. =
2.2 (м) Вт/м·К

теплоемк. =
1450 (т) Дж/кг·К

теплоемк. =
1100 (м) Дж/кг·К

ТНЗ = - 1.1 °С

3.4. Постановка задачи, входные параметры и принятые допущения

Целью математического моделирования является определение положения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород на ключевых участках. Математическое моделирование проводилось численным методом на ПК с помощью программ «TUNDRA» и «QFrost», обе программы разработаны на кафедре геокриологии МГУ им. М.В.Ломоносова.

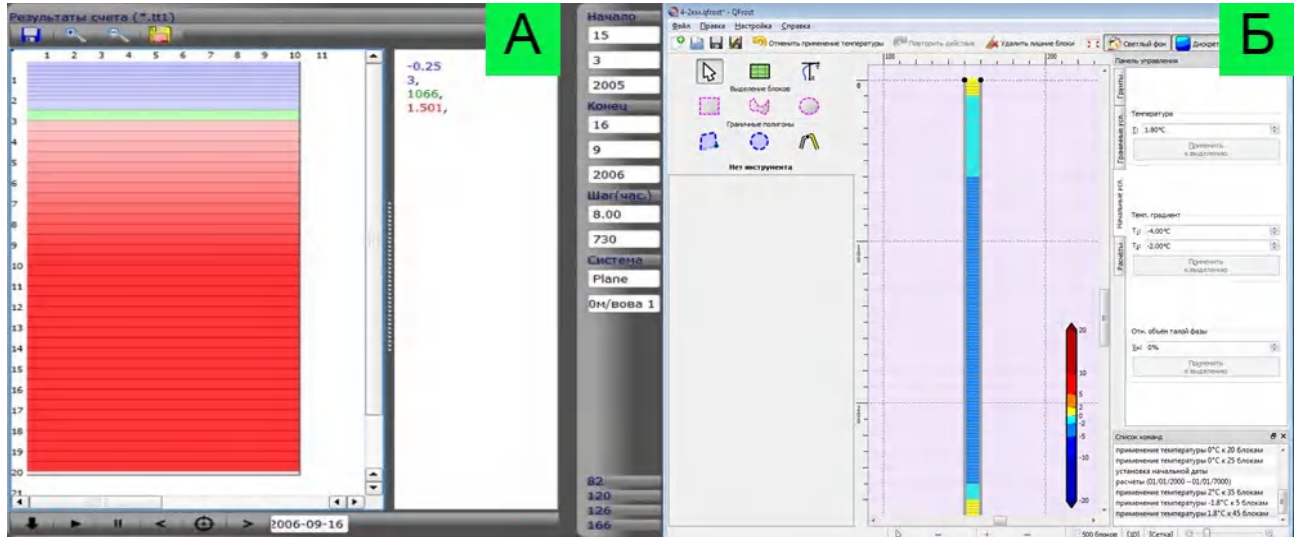


Рис. 3.9. Результаты математического моделирования. А – Моделирование теплового поля с помощью программы «Тундра»; Б – моделирование теплового поля с помощью программы «QFrost».

Программа «TUNDRA» позволяет производить моделирование (прогнозирование) изменения температуры пород и глубины промерзания-оттаивания в связи с естественными и техногенными (глобальными) изменениями климатических параметров, изменением условий теплообмена на дневной поверхности в результате освоения территории. Она основана на численном решении задачи Стефана. Метод балансов к построению конечно-разностных схем для решения этих задач применил Л.Н.Хрусталеv. Он исходил из представлений, характерных для метода гидроанalogии В.С.Луkьянова, широко применяющегося для решения задач теплопроводности, в том числе с фазовыми переходами. Программа «QFrost» разработана аспирантом кафедры геокриологии Песoцким Д.В. В этой программе также реализована двухслойная явная схема с применением метода балансов.

Тепловое моделирование толщи многолетнемерзлых пород выполнялось путем решения серии одномерных тепловых задач. На верхней границе расчетной области задавалось граничное условие первого рода (постоянная температура на поверхности), на нижней границе – граничное условие второго рода (тепловой поток из недр). Боковые граничные условия задавались как нулевой теплопоток – решалась одномерная задача, следовательно, перетоков тепла в стороны быть не может.

Минимальные размеры расчетной области были определены экспериментальным путем – для одного из рассматриваемых участков было проведено тепловое моделирование несколько раз, причем каждый последующий раз размер расчетной области увеличивался. В итоге оказалось, что при заданных теплофизических характеристиках, тепловом потоке из недр и динамике температур на верхней границе расчетной области увеличение расчетной области более 4 км не приводит к изменению результата моделирования, а модели с меньшей мощностью расчетной области дают завышенное значение мощности многолетнемерзлых пород. В результате выполненной работы в моделях задавался 5-километровый размер расчетной области.

Разбивка математической модели по глубине равномерная с высотой блока 5 метров. Использование увеличения высоты блоков с глубиной не привело к значительной экономии машинного времени, а равномерная разбивка значительно облегчает задачу снятия результатов с модели.

После создания расчетной области, в модель вводятся теплофизические характеристики – разрез, теплопроводность и теплоемкость в талом и мерзлом состояниях, температура начала замерзания и теплота фазовых переходов. При этом ввиду отсутствия подробных данных о разрезах отложений и их теплофизических свойствах (имеющиеся на сегодняшний день данные позволяют охарактеризовать разрез лишь на локальных участках и в придонном слое до глубины порядка 30-50 метров), подробно задавать геологический разрез, и его теплофизические свойства не имеет смысла, поэтому в модели закладывались

усредненные значения для верхней (дисперсной) части разреза и нижней – скальной (закрепленные теплофизические характеристики и мощности слоев разреза приведены в таблице 3.2). Исходя из тех же соображений, пришлось отказаться от использования кривых незамерзшей воды – неизвестно, как в действительности за рассматриваемый временной промежуток менялась засоленность пород, которая определяет кривую незамерзшей воды.

После того, как задана расчетная область и ее теплофизические характеристики, выполняется расчет начального распределения температурного поля. Для этого задаются верхние и нижние граничные условия (верхнее граничное условие задается из графы «до 190 тыс. лет назад» таблицы 3.2) и запускается счет. Счет останавливается после того, как в центральной части модели за значительный промежуток времени (порядка 10 тыс. лет) не происходит изменения температуры – это означает, что температурное поле в модели «выстоялось».

Далее выполняется тепловой расчет согласно палеогеографической модели, представленной в таблице 3.2. По результатам математического моделирования было определено положение кровли и подошвы многолетнемерзлых пород (рис. 3.9).

В результате моделирования с использованием ПО «Тундра» и ПО «QFrost» были получены схожие результаты.

Отличительной особенностью авторской постановки тепловой задачи на арктическом шельфе является ее решение для представительных опорных участков 1–7, где автор изучил свойства верхней части разреза и эти данные были использованы при решении тепловой задачи. Результаты расчетов положения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород для зон 1–7 приведены в приложении Б к тексту диссертации.

3.5. Результаты моделирования эволюции криолитозоны на шельфе в плейстоцене и голоцене

В результате математического моделирования глубины распространения многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря были получены следующие результаты (рис. 3.10 А). В пределах изобаты 5 м в период от 190–120 тыс. лет назад наблюдается резкое опускание подошвы многолетнемерзлых пород до 350 м за счет регрессии моря. В дальнейшем, в период от 120–100 тыс. лет назад, из-за послеледникового поднятия уровня Мирового океана, происходит поднятие подошвы и погружение кровли многолетнемерзлых пород до глубин 150–200 м и их смыкание. В период от 100 до 80 тыс. лет назад вновь начинается погружение кровли многолетнемерзлых пород до 170 м, затем в период от 100 до 75 тыс. лет назад ее поднятие до 150 м, потом в период 75–5 тыс. лет назад происходит погружение кровли многолетнемерзлых пород до глубин 300 м. В период от 5 тыс. лет назад до настоящего времени происходит поднятие подошвы многолетнемерзлых пород до 250 м, и начинается погружение кровли многолетнемерзлых пород до глубины 90 м к настоящему времени. На изобатах 25 м и 50 м наблюдается аналогичная тенденция, однако в период трансгрессии моря на рубеже 120–110 тыс. лет назад происходило, судя по результатам расчетов, поднятие подошвы многолетнемерзлых пород, погружение ее кровли, но не всегда имеет место их смыкание. В условиях повышенного теплопотока (70 мВт/м^2) наблюдается смыкание кровли и подошвы многолетнемерзлых пород.

Таким образом, на разных глубинах за счет регрессии моря в начальном этапе времени происходило резкое опускание подошвы многолетнемерзлых пород. В период от 120 тыс. лет назад до 5 тыс. лет назад были изменения положения подошвы на разных уровнях, и до настоящего времени происходит поднятие подошвы многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря до глубин 200–300 м (рис. 3.10–3.12).

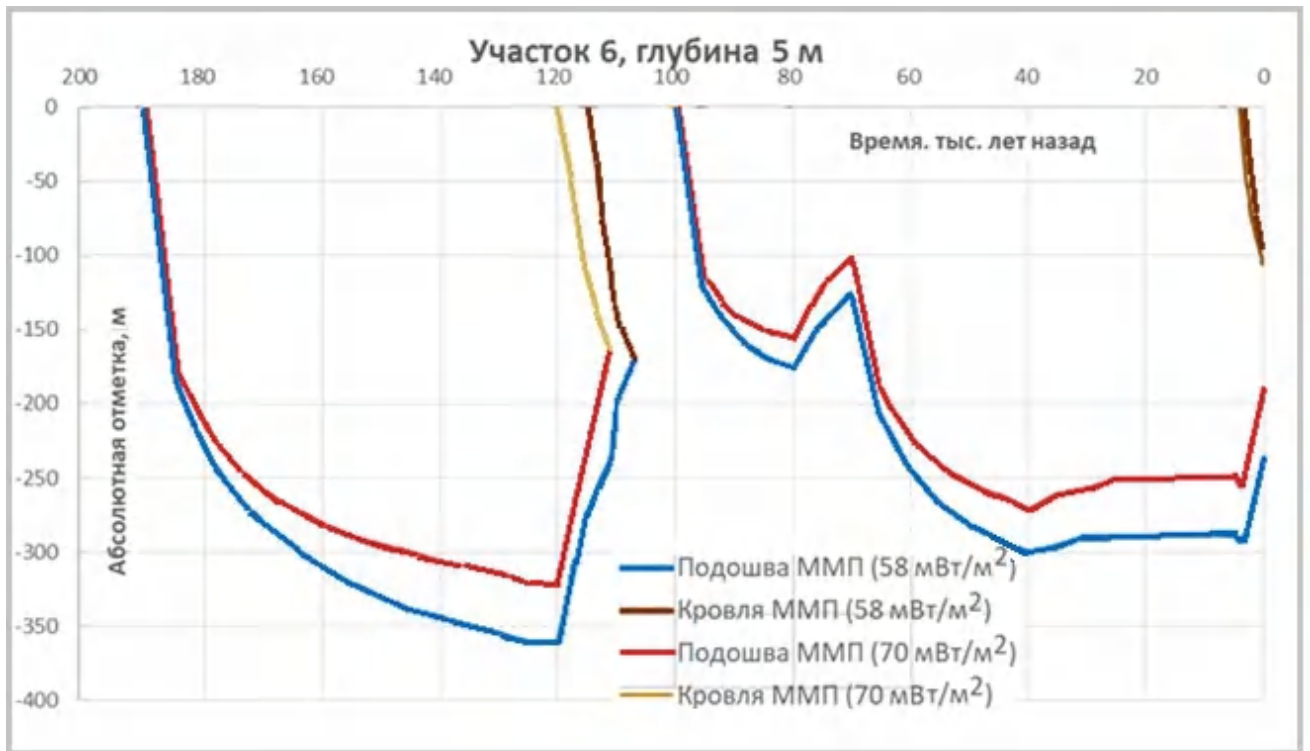


Рис. 3.10. Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Байдарацкая губа (зона б) Карское море. Изобата 5 м.

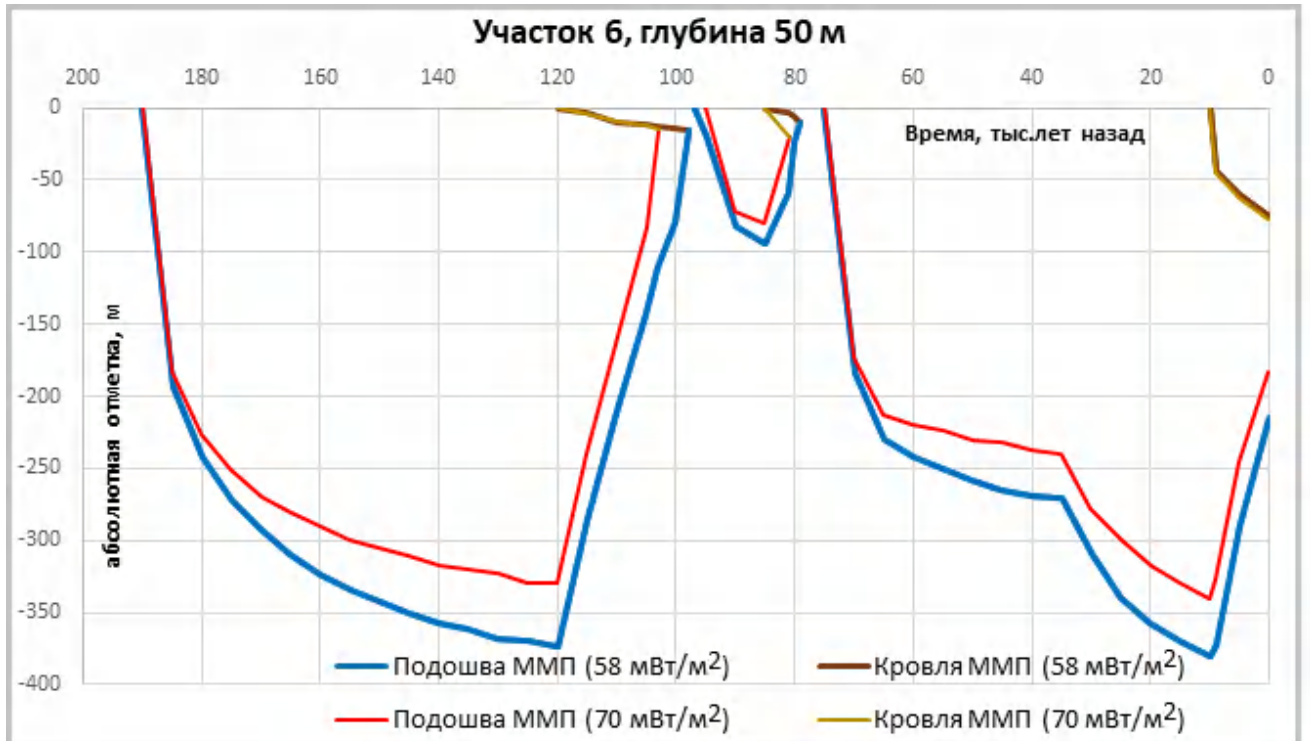


Рис. 3.12. Б Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Байдарацкая губа (зона б) Карское море. Изобата 25 м.

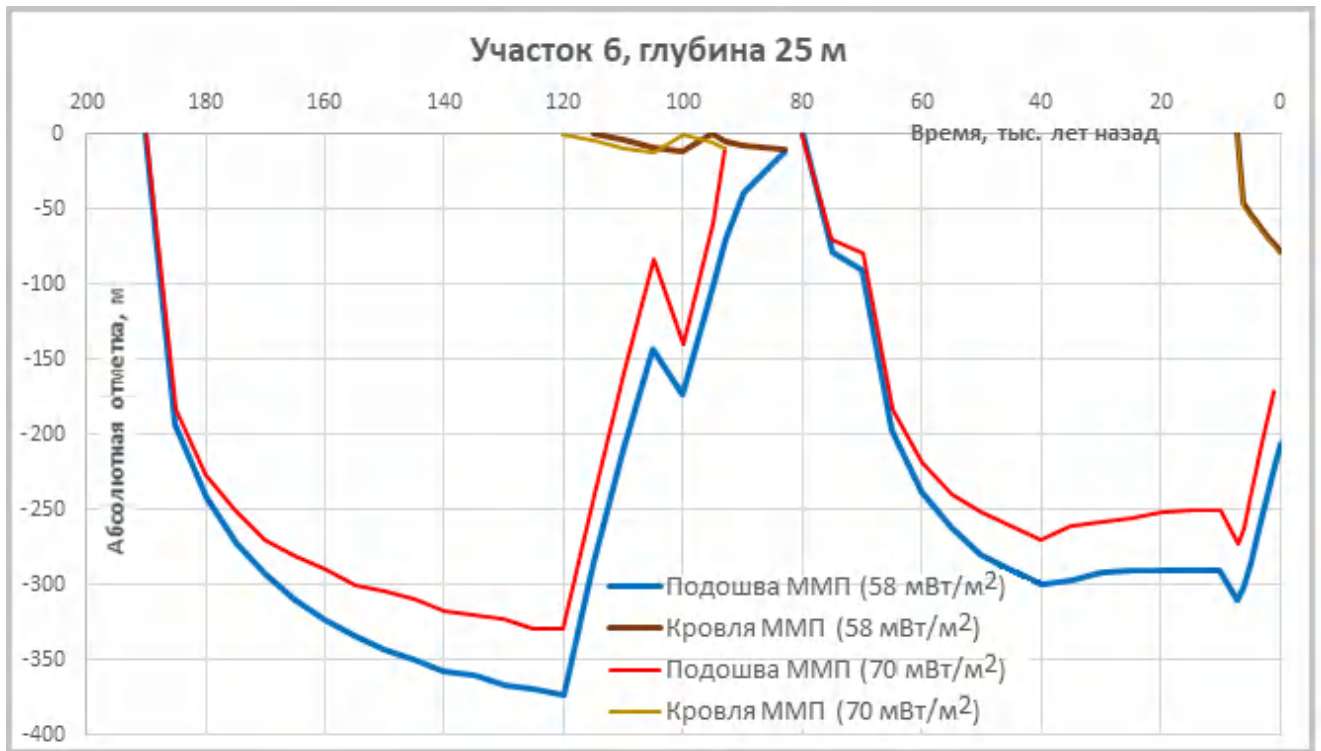


Рис. 3.11. Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Байдарацкая губа (зона б) Карское море. Изобата 50 м.

Динамика изменения глубины подошвы многолетнемерзлых пород для моря Лаптевых в целом аналогична, однако в силу более сурового климата в прошлом глубины и флуктуации подошвы многолетнемерзлых пород увеличиваются (рис. 3.13–3.15). На изобате 5 м в период от 190–120 тыс. лет назад наблюдается резкое опускание подошвы многолетнемерзлых пород до 500–600 м за счет регрессии моря. В дальнейшем, в период от 120–100 тыс. лет назад из-за послеледникового поднятия уровня Мирового океана происходит постепенное поднятие подошвы и погружение кровли многолетнемерзлых пород до глубин 220 м – для случая повышенного теплопотока (модель рифта) и до глубин 270 м – для нормального теплопотока.

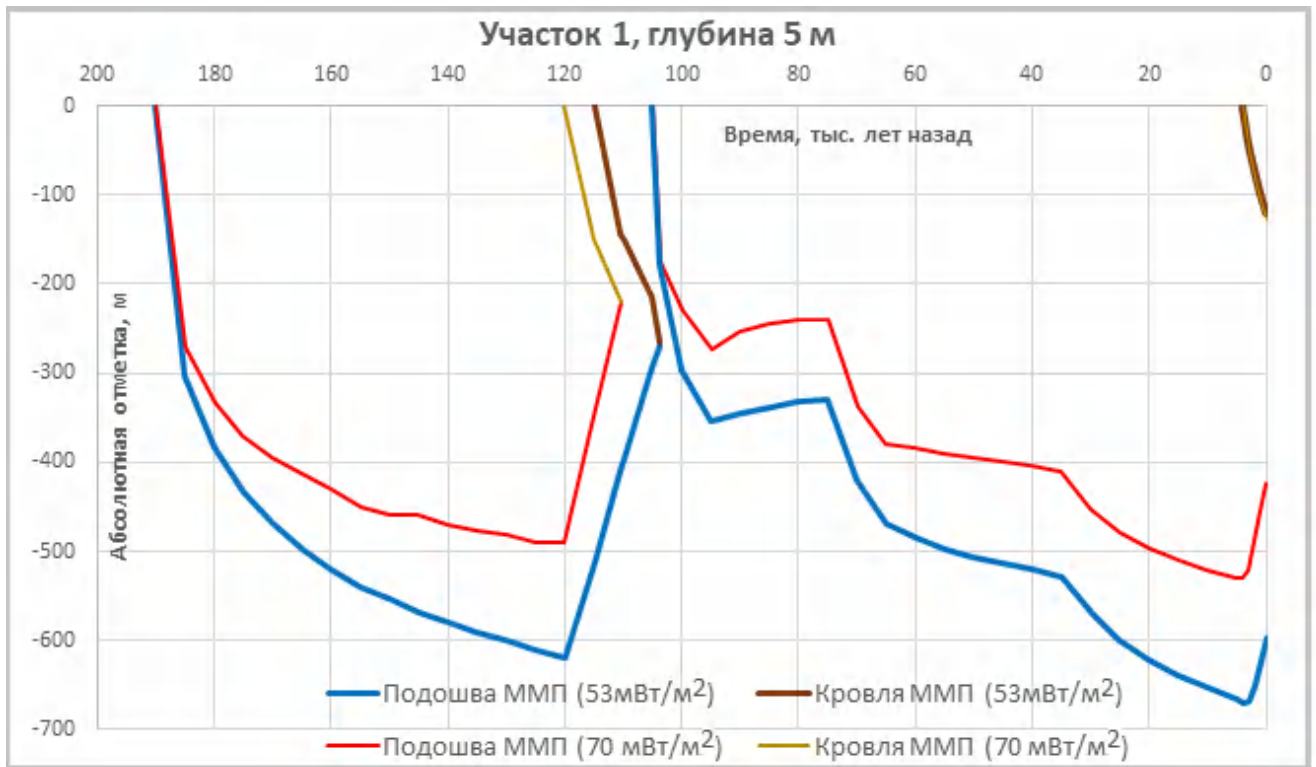


Рис. 3.13. Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Тикси (зона 1) море Лаптевых. Изобата 5 м.

В случае рифтовой модели на глубинах 220 м, а в случае нормального теплового потока на глубинах 270 м происходит смыкание кровли и подошвы многолетнемерзлых пород и полная деградация многолетнемерзлых пород. В период от 120 до 100 тыс. лет назад снова начинается погружение кровли многолетнемерзлых пород до 350 м для нормального теплопотока и 260 м – для повышенного теплопотока, затем в период от 100 до 75 тыс. лет назад ее поднятие до 320 м для нормального теплопотока и 230 м – для повышенного теплопотока, потом в период 75–5 тыс. лет назад происходит погружение кровли многолетнемерзлых пород до глубин 580 м для нормального теплопотока и 470 м – для повышенного теплопотока. В период от 5 тыс. лет назад до настоящего времени происходило поднятие подошвы до 600 м для нормального теплопотока и 420 м – для повышенного. Кровля многолетнемерзлых пород погружена до глубин 120 м к настоящему времени.

На изобатах 25 м и 50 м наблюдается аналогичная тенденция, однако в период трансгрессии моря на рубеже 120–110 тыс. лет назад по результатам моделирования происходит поднятие подошвы многолетнемерзлых пород, погружение ее кровли, но не всегда имеет место их смыкание. В условиях повышенного теплопотока (70 мВт/м^2) наблюдается смыкание кровли и подошвы многолетнемерзлых пород.

В итоге можно сказать, что на разных глубинах за счет регрессии моря в начальном этапе времени происходило резкое опускание подошвы ММП. В периоды от 120 тыс. лет назад до 5 тыс. лет назад было изменение положения подошвы на разных уровнях и до настоящего времени происходит поднятие подошвы ММП на шельфе моря Лаптевых до глубин 500–600 м (рис. 3.13–3.15).

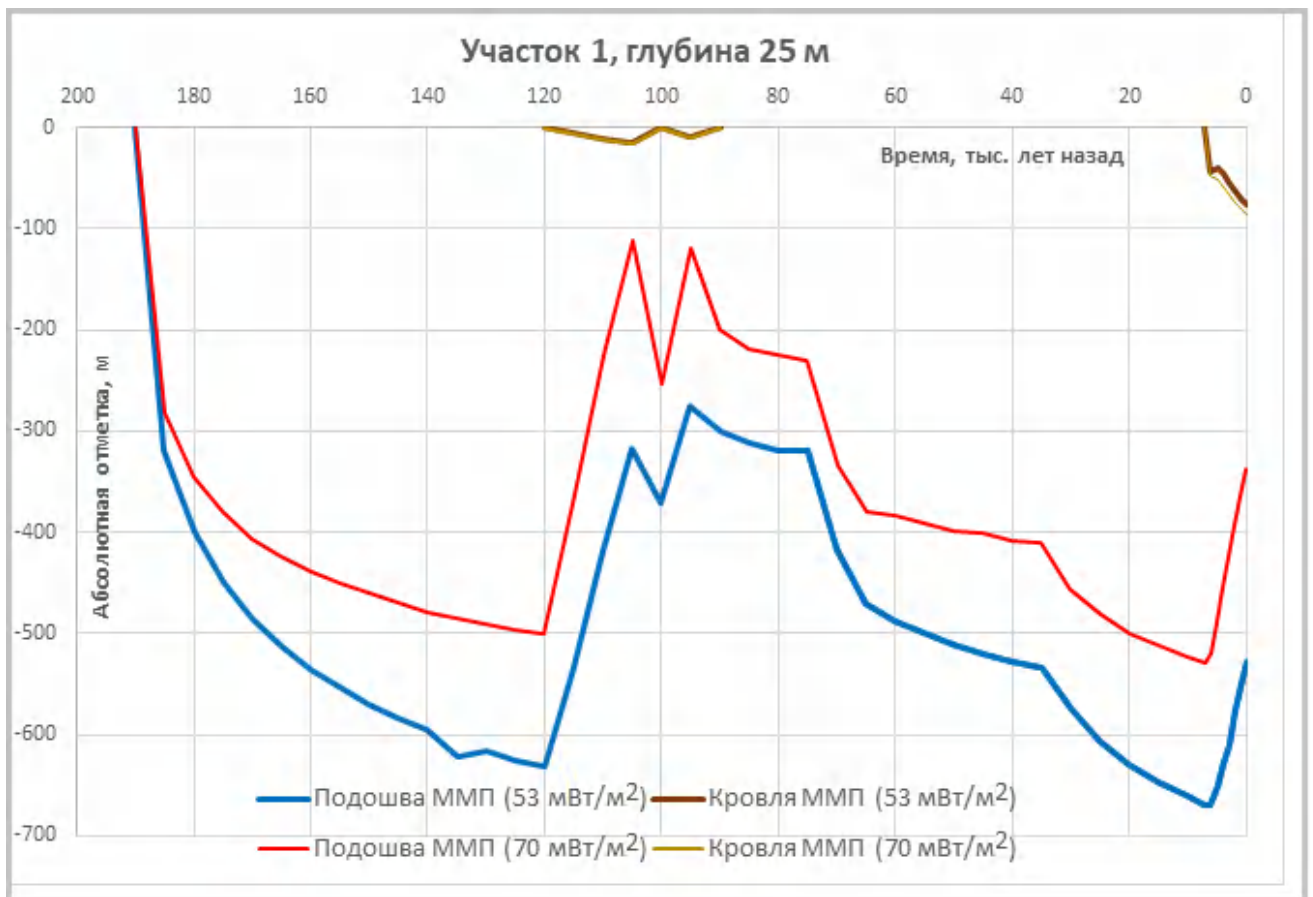


Рис. 3.14. Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Тикси (зона 1) море Лаптевых. Изобата 25 м.

Результаты тепловых расчетов свидетельствуют, что на шельфе Карского моря кровля многолетнемерзлых пород сегодня заглублена от 50 до 150 м, подошва располагается на глубинах 150–250 м в зависимости от граничных условий; на шельфе моря Лаптевых кровля многолетнемерзлых пород сегодня заглублена от 50 до 120 м, подошва располагается на глубинах 300–600 м в зависимости от граничных условий.

В настоящий момент наблюдается деградация многолетнемерзлых пород как снизу (глубина подошвы уменьшается со временем), так и сверху (глубина кровли возрастает со временем) для малых глубин акватории. Результаты расчетов положения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород для зон 1–7 приведены в приложении Б к тексту диссертации.

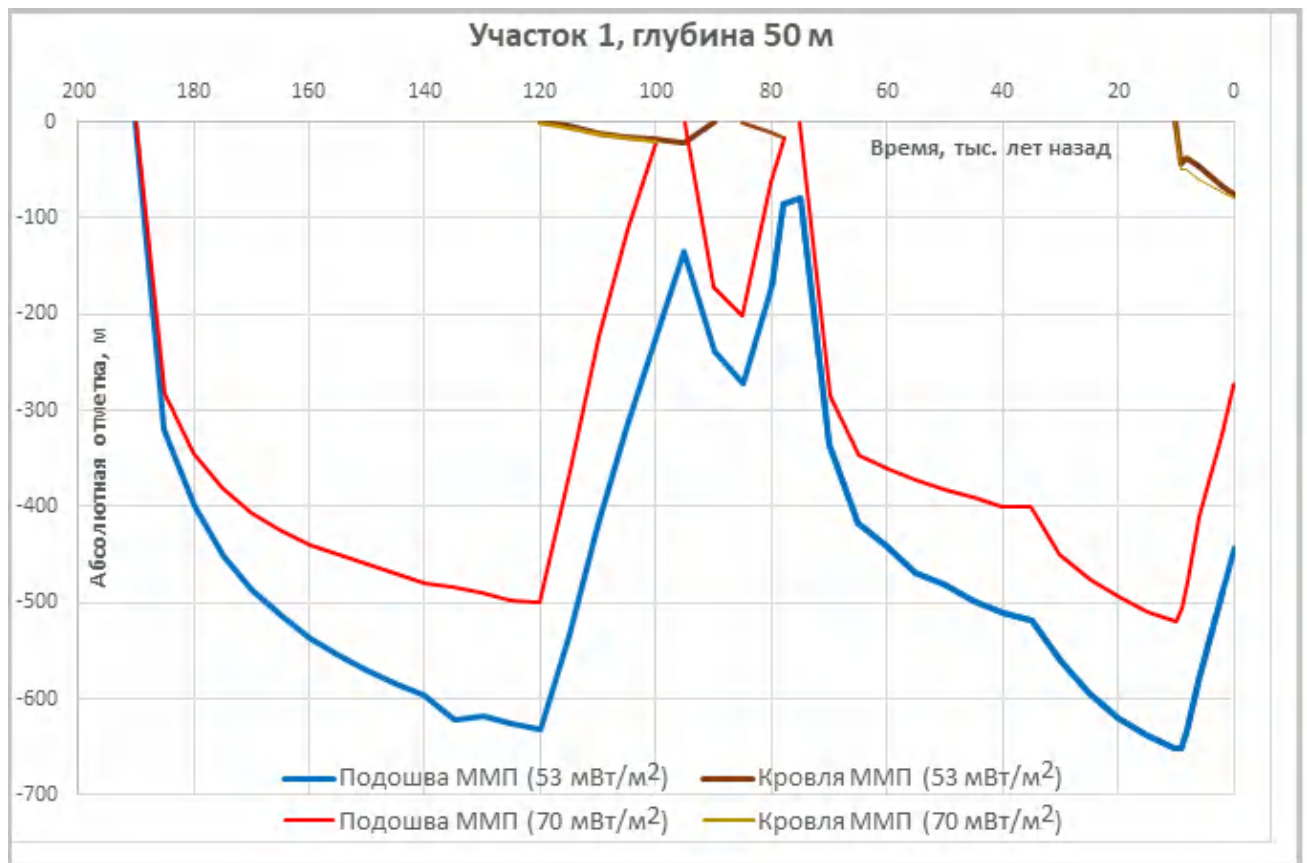


Рис. 3.15. Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Тикси (зона 1) море Лаптевых. Изобата 50 м.

Выводы:

1. Определены условия формирования многолетнемерзлых толщ и построены 42 модели теплового режима горных пород на шельфе арктических морей в зависимости от различных глубин акватории тепловых потоков для 7 опорных участков на шельфе морей Российской Арктики.
2. Результаты тепловых расчетов свидетельствуют, что на шельфе: Печорского моря подошва ММП располагается на глубинах 150–350 м, Карского моря – 250–350 м, Лаптевых – 300–660 м от кровли донных отложений в зависимости от различных граничных условий. Кровля ММП заглублена на сегодня: на шельфе Печорского моря на 100–120 м, на шельфе Карского моря на 50–150 м, на шельфе моря Лаптевых на 50–120 м от кровли донных отложений в зависимости от различных граничных условий.
3. В настоящий момент наблюдается деградация многолетнемерзлых пород как снизу (глубины до подошвы уменьшаются с течением времени), так и сверху (глубины до кровли возрастают с течением времени) для малых глубин акватории.
4. Отличительной особенностью авторской постановки тепловой задачи на арктическом шельфе является ее решение для представительных опорных участков 1–7, где автор изучил свойства верхней части разреза и эти данные были использованы при решении тепловой задачи. В среднем максимальные мощности мерзлых толщ по данным автора (250 м для западного сектора и 600 м для восточного сектора) несколько выше результатов известных ранее – 200 м для западного сектора (Portnov et al., 2014) и 540 м для восточного (Романовский и др., 2006).

Глава 4. Распространение многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе по геофизическим данным

4.1. Современное распространение и глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород

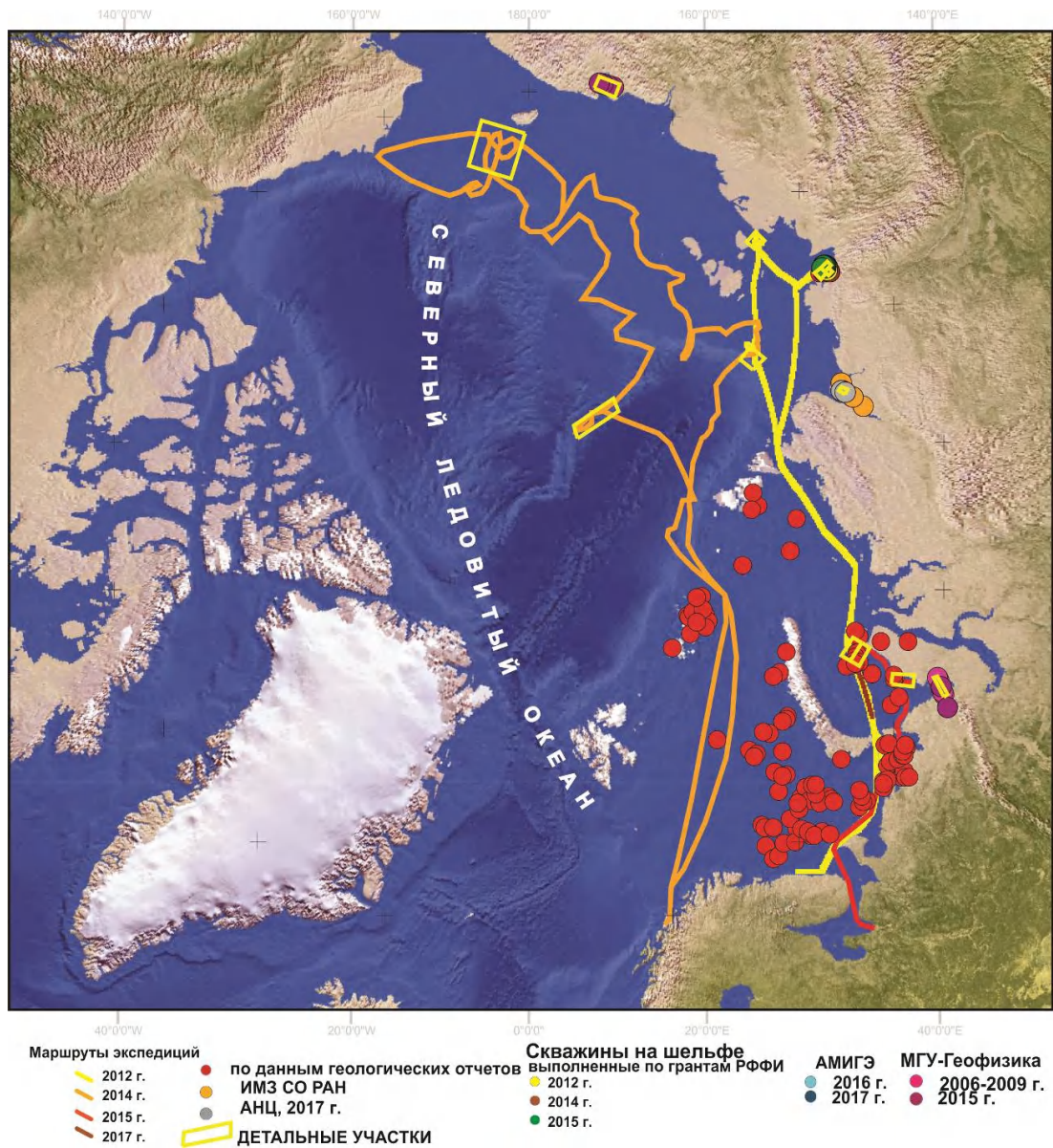


Рис. 4.1. Карта фактического материала геофизических исследований, выполненных автором в период 2006–2020 гг. в совместных экспедициях на северном полушарии.

1 – путь ледокола «Оден» 2014, 2 – путь НИС «Виктор Буйницкий» 2012, 3 – путь судна «Маршал Василевский» 2015 г.

На рисунке 4.1 приведена карта фактического материала геофизических исследований, выполненных автором в период 2006–2020 гг. в совместных

экспедициях на северном полушарии. Здесь черным цветом показан путь ледокола «Оден» в шведско-российско-американской экспедиции 2014 г., зеленым – путь НИС «Виктор Буйницкий» 2012 г., красным – путь судна «Маршал Василевский» 2015 г.

Непрерывные геофизические данные регионального масштаба были получены вдоль геотраверсов через шельфы Печорского, Карского и Лаптевых морей. На Карском и Лаптевых морях были получены детальные данные с помощью площадных 3D геофизических исследований (Применение..., 2020).

На рисунке 4.2 представлена общая карта исследований в Баренцевом и в Карском морях.

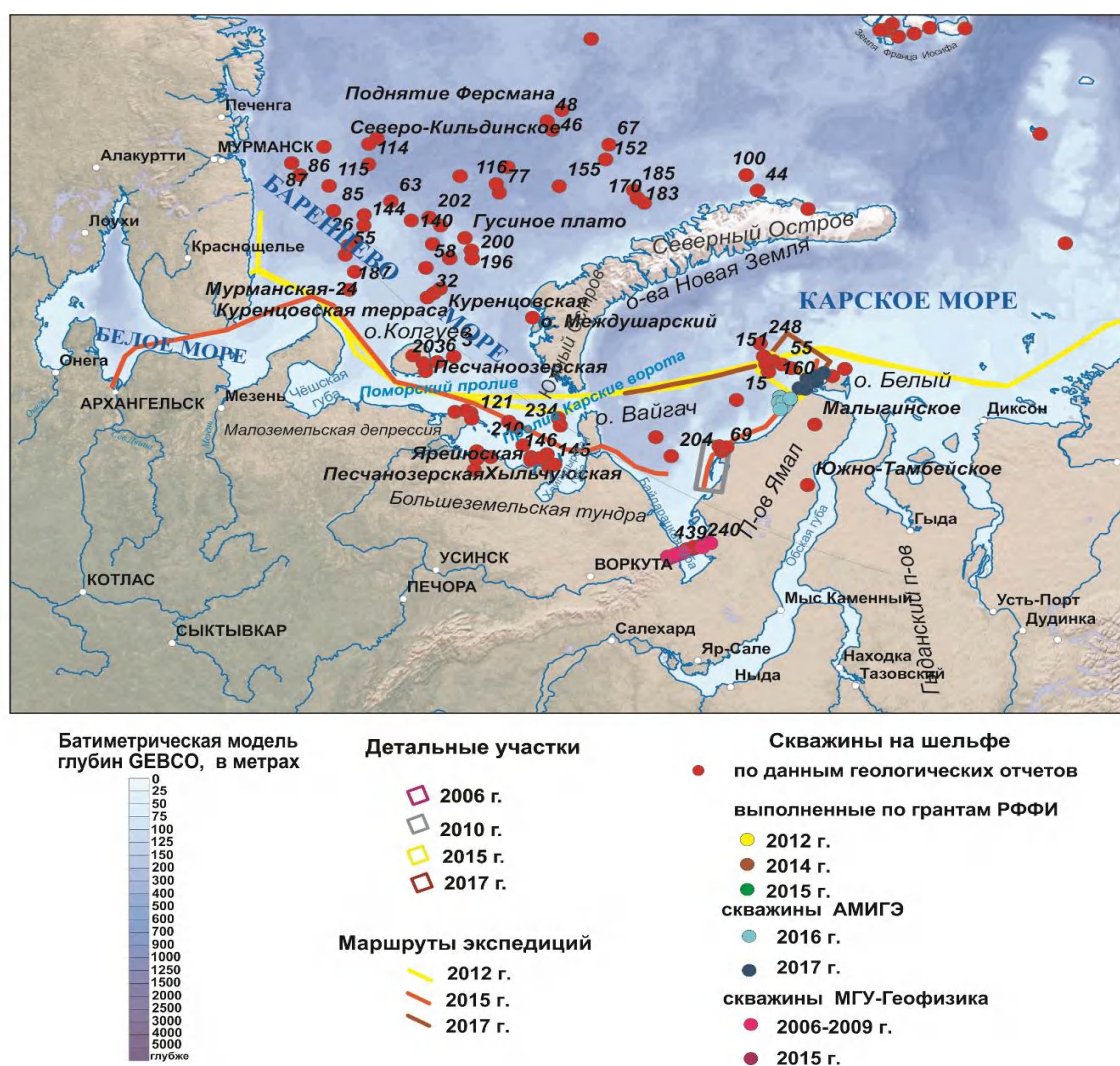


Рис. 4.2. Карта района исследований в Баренцевом и Карском морях.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены линии Карского и Печорского профилей.



Рис. 4.3. Линия Карского профиля.

Линия Карского профиля длиной 342 км тянется с севера на юг от мыса Бурунный, вдоль о-вов Шараповы Кошки и прол. Мутный Шар, затем, не доходя до мыса Белужий Нос п-ова Ямал, линия поворачивает на запад и тянется до прол. Югорский Шар.



Рис. 4.4. Линия Печорского профиля.

Линия Печорского профиля длиной 660 км тянется с востока на запад от прол. Югорский Шар к о. Долгий, затем вдоль о-вов Гуляевские Кошки, далее вдоль п-ова Русский Заворот, затем в Поморский прол. и заканчивается у северного берега п-ова Канин.

Моделирование геоэлектрических разрезов выполнено с помощью программного обеспечения «Faraday» (рис. 4.5).

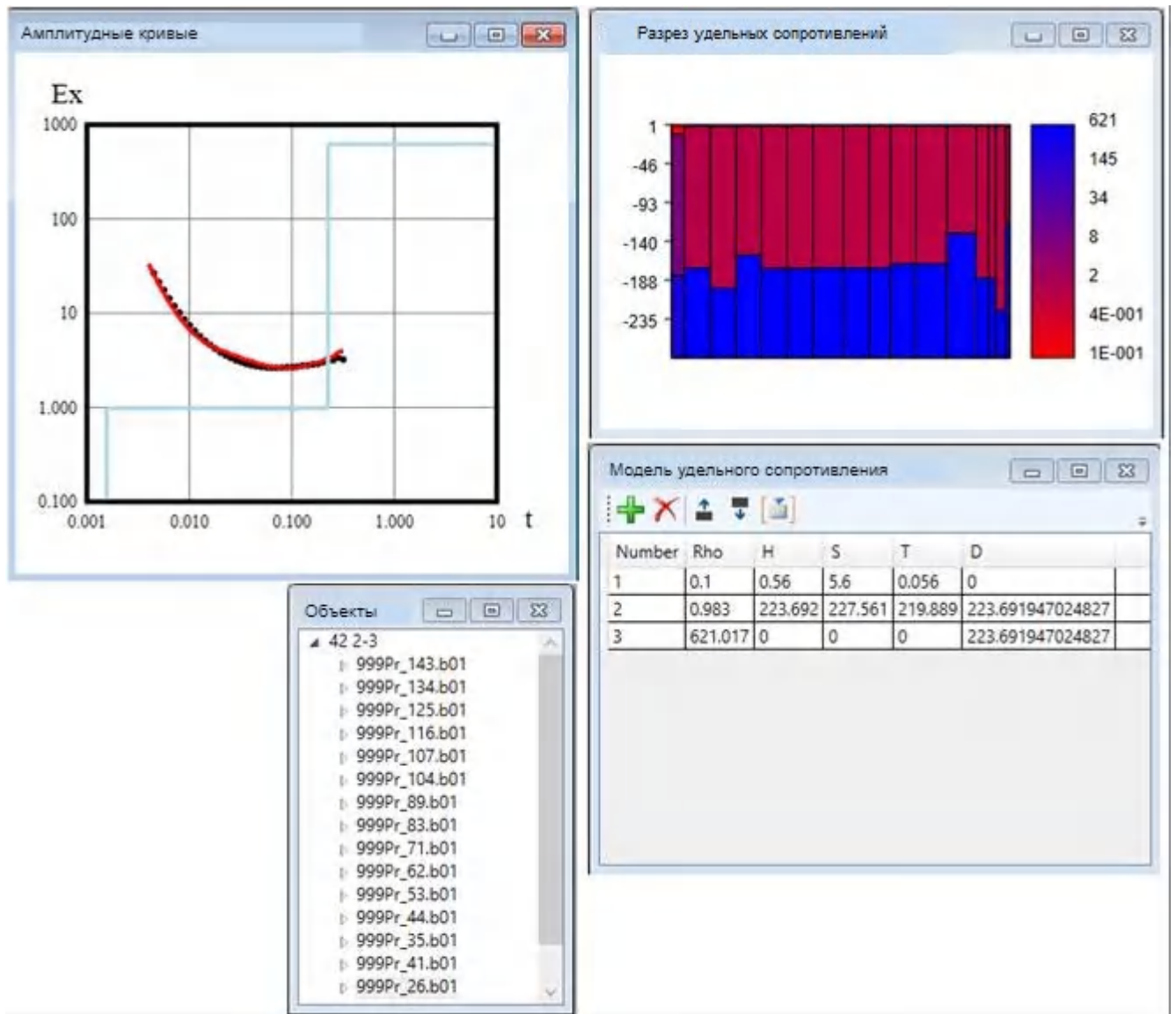


Рис. 4.5. Рабочая среда программы «Faraday». Точками отмечено измеренное поле, кривой красного цвета – поле модели.

Rho – истинное сопротивление пласта в Ом·м, H – мощность пласта м, S – проводимость пласта См/м, D – глубина залегания подошвы пласта в м

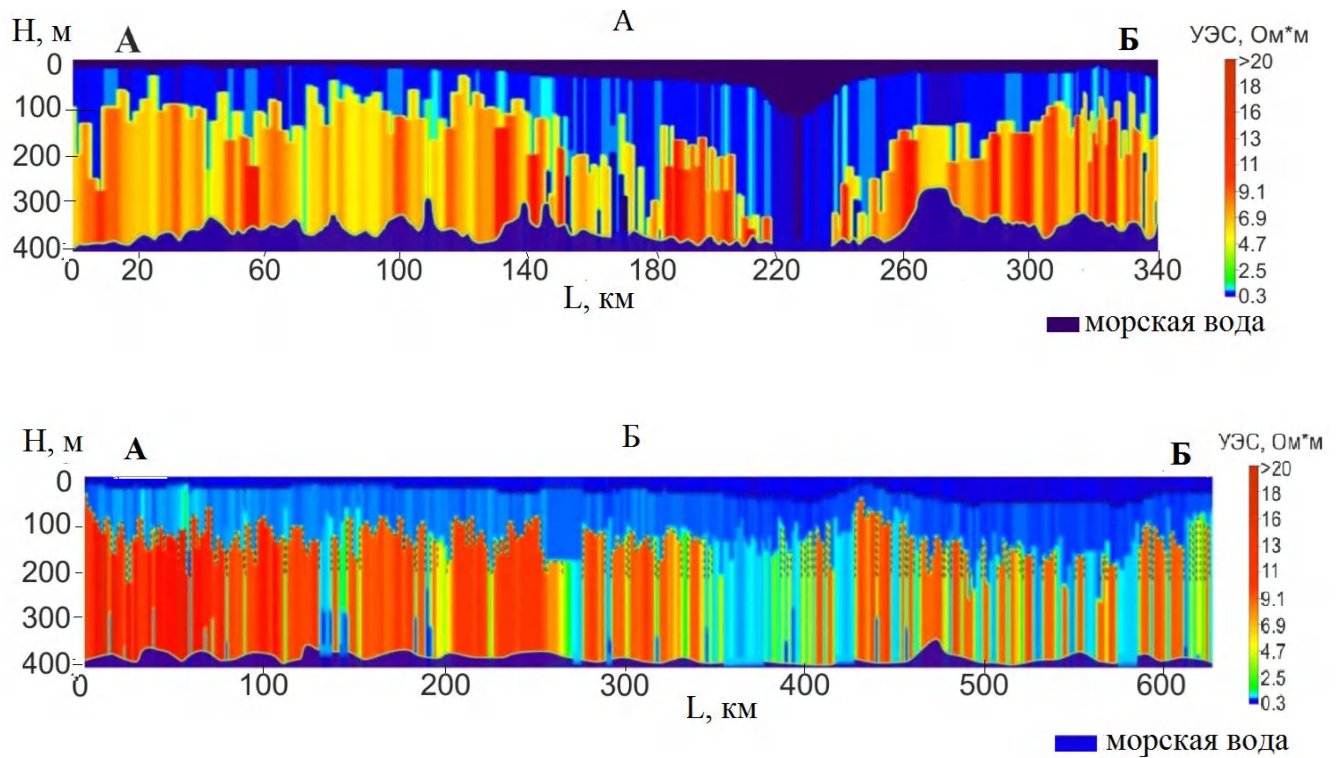


Рис. 4.6. Геоэлектрические разрезы по профилям: А – Карского моря; Б – Печорского моря. H – глубина, м; L – расстояние, км.

На разрезе, по данным геоэлектрики Карского моря можно выделить три слоя (рис. 4.6). *Первый*, обозначен *фиолетовым* цветом, соответствует кажущемуся удельному сопротивлению $0,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Он имеет мощность от 15 м до 100 м. *Второй*, обозначен *синим* цветом, соответствует сопротивлению $0,9\text{--}1,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, его мощность составляет от 10 м до более 400 м. Под ним располагается *третий* слой (*красный, желтый, зеленый* цвета) с сопротивлением от $2,5$ до $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, с мощностью более 300 м. Некоторые локальные участки имеют пониженное сопротивление, что объясняется влиянием нижележащего слоя с пониженным сопротивлением.

Второй разрез, полученный в результате обследования Печорского моря, также характеризуется наличием трех слоев с различными кажущимися удельными сопротивлениями. Первый слой имеет мощность от 10 м до 70 м с сопротивлением таким же, как и на первом разрезе. Под ним находится второй слой, имеющий мощность от 30 м до 150 м и сопротивление $0,9\text{--}1,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Третий слой находится на глубине от 80 м и имеет мощность более 400 м, его

сопротивление от 2,5 до 20 Ом·м. Второй разрез отличается наличием в третьем слое большим количеством участков с пониженным сопротивлением.

Наиболее интересной особенностью полученных разрезов является наличие высокоомного слоя от 50–100 м до 300–400 м. Характер высокоомного слоя от точки к точке меняется. Есть участки, где слой сохраняет свою сплошность, но также присутствуют протяженные зоны, где высокоомный слой исчезает. В целом можно сделать вывод, что на Карском шельфе высокоомный слой более представлен, имеет большую сплошность и в отдельных местах мощность до 300 м (рис. 4.7).

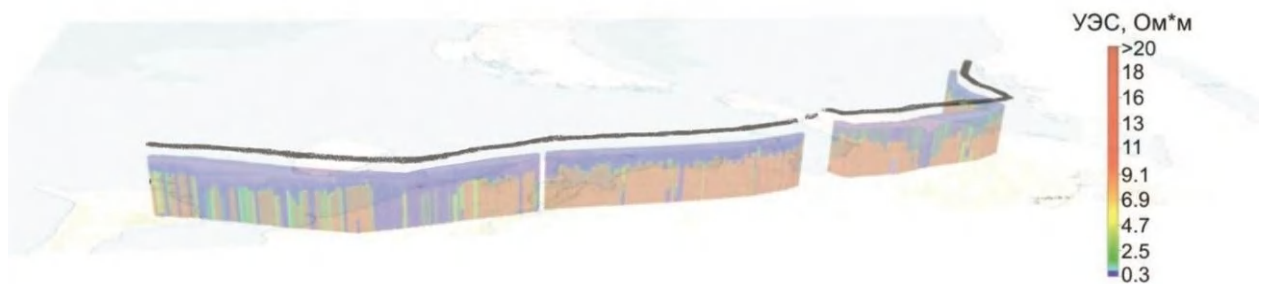


Рис. 4.7. Распространение высокоомного слоя на шельфе Печорского и Карского морей.

Результаты работ на детальных площадках шельфа Карского моря

На рисунке 4.8 представлен меридиональный разрез через шельф моря Лаптевых по данным ЗСБ. Расположение профиля показано на рисунке 4.9.

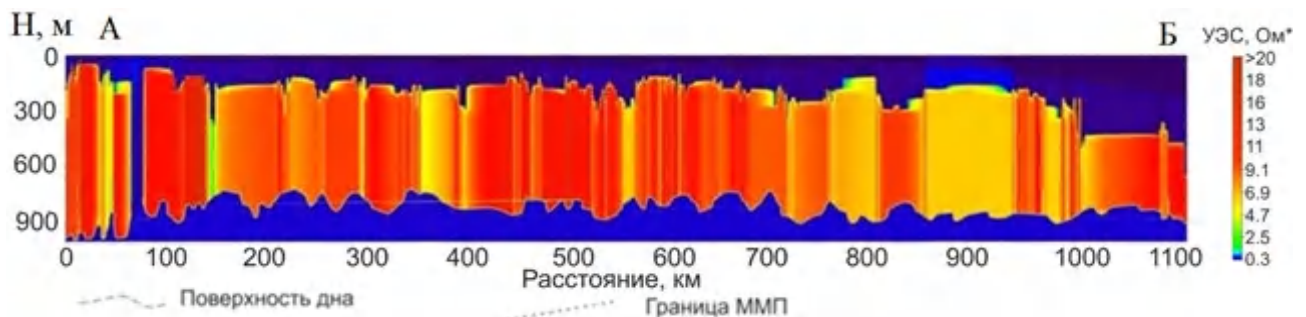


Рис. 4.8. Геоэлектрический разрез на шельфе моря Лаптевых, г.Тикси м. Вилькицкого, 2012 г.



Рис. 4.9. Линия профиля на шельфе моря Лаптевых.

Анализ геоэлектрической модели позволяет утверждать, что кровля высокоомного слоя погружается от Тикси (точка А) в сторону прол. Вилькицкого (точка В). Перед прол. Вилькицкого мощность криолитозоны сокращается до 100–200 м. Подошва высокоомного слоя в районе Тикси отмечена на глубинах 700 м, далее погружается до 1000 м и перед прол. Вилькицкого поднимается до 500–600 м.

Результаты работ автора в составе экспедиции SWERUS-C3 позволяют утверждать о существовании высокоомного слоя и на шельфе Чукотского моря в районе каньона Геральда (рис. 4.10).

Новые материалы, полученные на шельфе Восточно-Сибирского и Чукотского морей, позволяют утверждать о существовании высокоомного слоя на всем восточном секторе морей Российской Арктики.

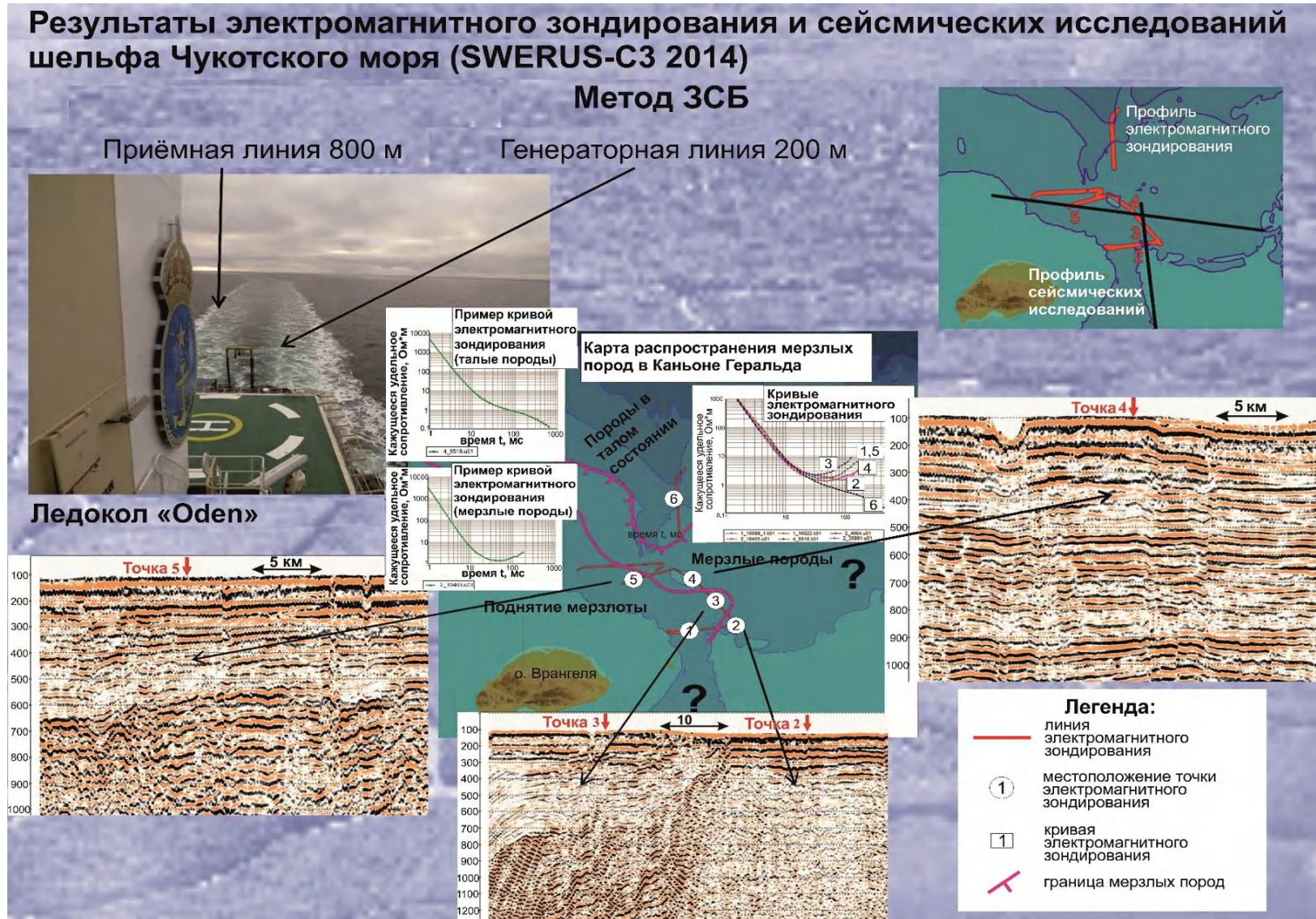


Рис. 4.10. Сопоставление данных сейсморазведки и электроразведки в Каньоне Геральда.

Детальные трехмерные исследования высокоомного слоя на шельфе Карского моря показали его еще большую изменчивость и неоднородность. К северу от Харасавэйского месторождения на приамальском шельфе был детально исследован участок шельфа размером 50×50 км при глубинах акватории 10–100 м.

Основные выводы, полученные на этом участке:

После анализа всех кривых кажущегося сопротивления были выделены наиболее типичные формы кривых кажущегося сопротивления для всей площади работ. В результате этого анализа удалось разбить все кривые кажущегося сопротивления на 4 типа.

Тип 1. Кривая кажущегося сопротивления имеет нисходящую ветвь, затем область минимума и восходящую ветвь (рис. 4.11).

Данный тип кривых наиболее характерен для всей площади работ, и особенно для ее восточной части.

Тип 2. Для кривой кажущегося сопротивления характерна нисходящая ветвь и горизонтальная асимптота кажущегося сопротивления в области низких сопротивлений $0,8\text{--}1,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. (рис. 4.12).

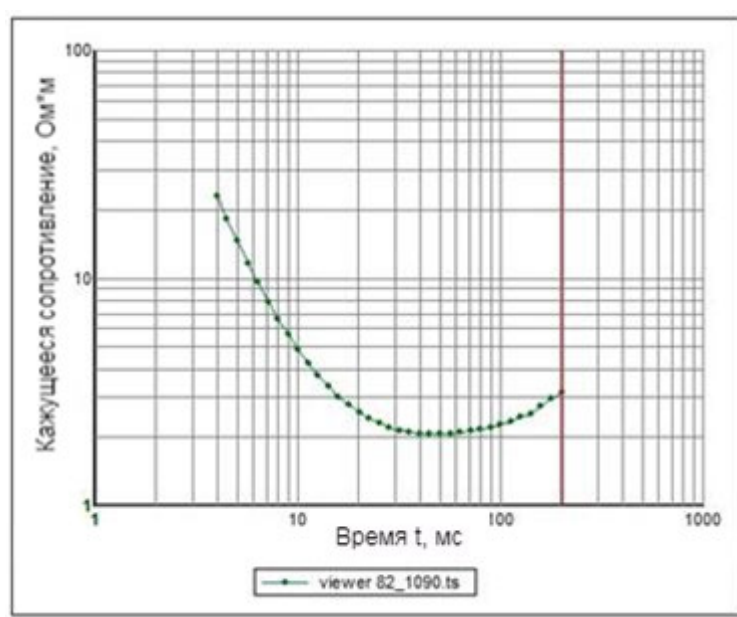


Рис.4.11. Кривая кажущегося сопротивления, характерная для типа 1.

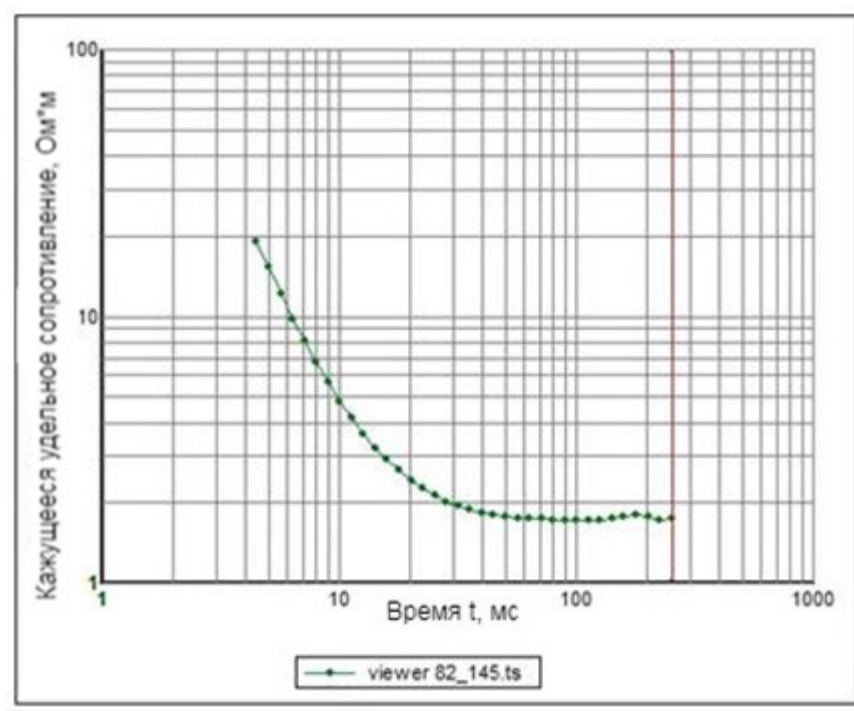


Рис. 4.12. Кривая кажущегося сопротивления, характерная для типа 2.

Наиболее часто кривые этого типа встречаются в западной части профиля.

Тип 3. Для кривой кажущегося сопротивления характерна нисходящая ветвь, область минимума и крутая восходящая ветвь (рис. 4.13).

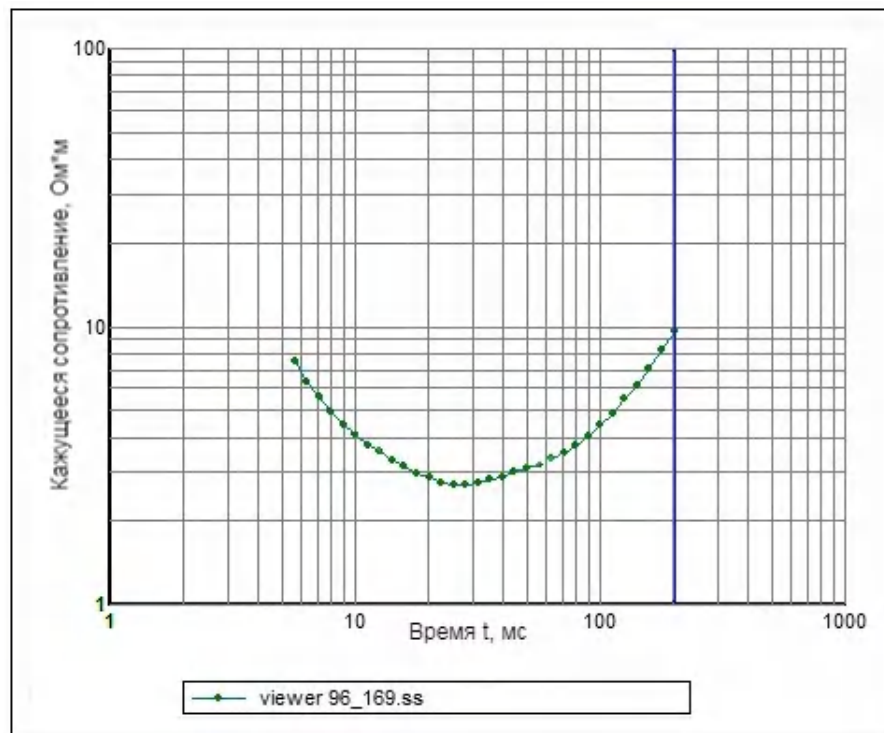


Рис. 4.13. Кривая кажущегося сопротивления, характерная для типа 3.

Тип 4. Кривая кажущегося сопротивления имеет нисходящую ветвь, область перегиба и далее опять нисходящая ветвь кривой кажущегося сопротивления (рис. 4.14).

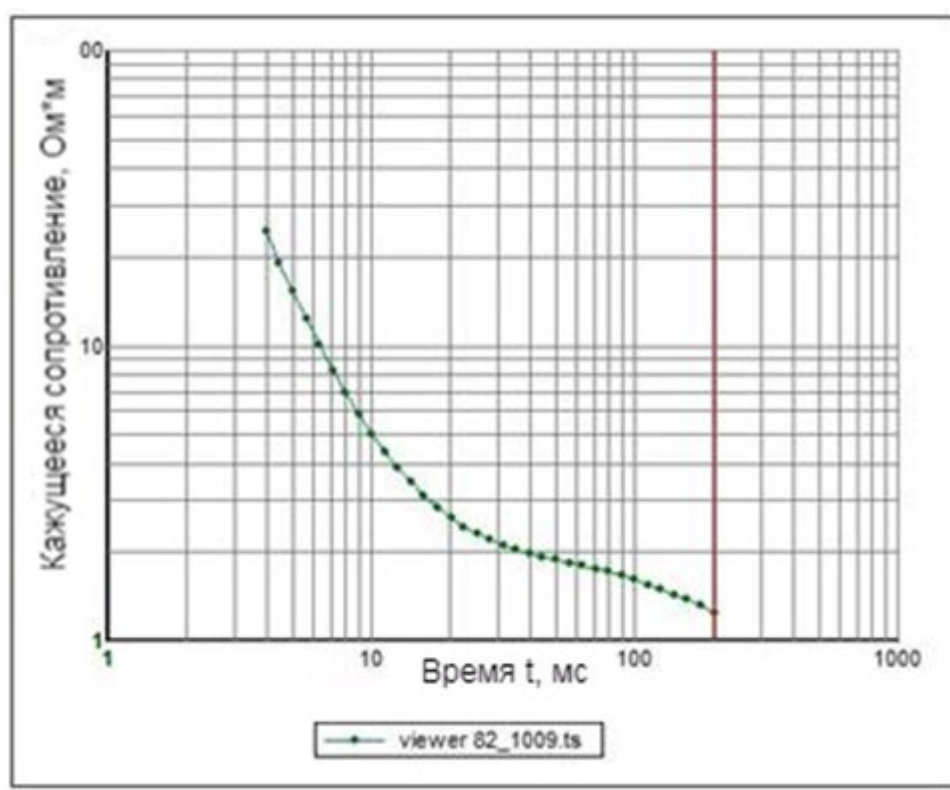


Рис. 4.14. Кривая кажущегося сопротивления, характерная для типа 4.

Наиболее часто кривые этого типа встречаются в западной части профиля.

Согласно выбранной типизации кривых кажущегося сопротивления, были выделены зоны конформности кривых зондированием становления поля (ЗС) на площади работ, т.е. зоны наиболее типичные для кривых соответствующих типов и построена карта типов кривых ЗС (рис. 4.15).

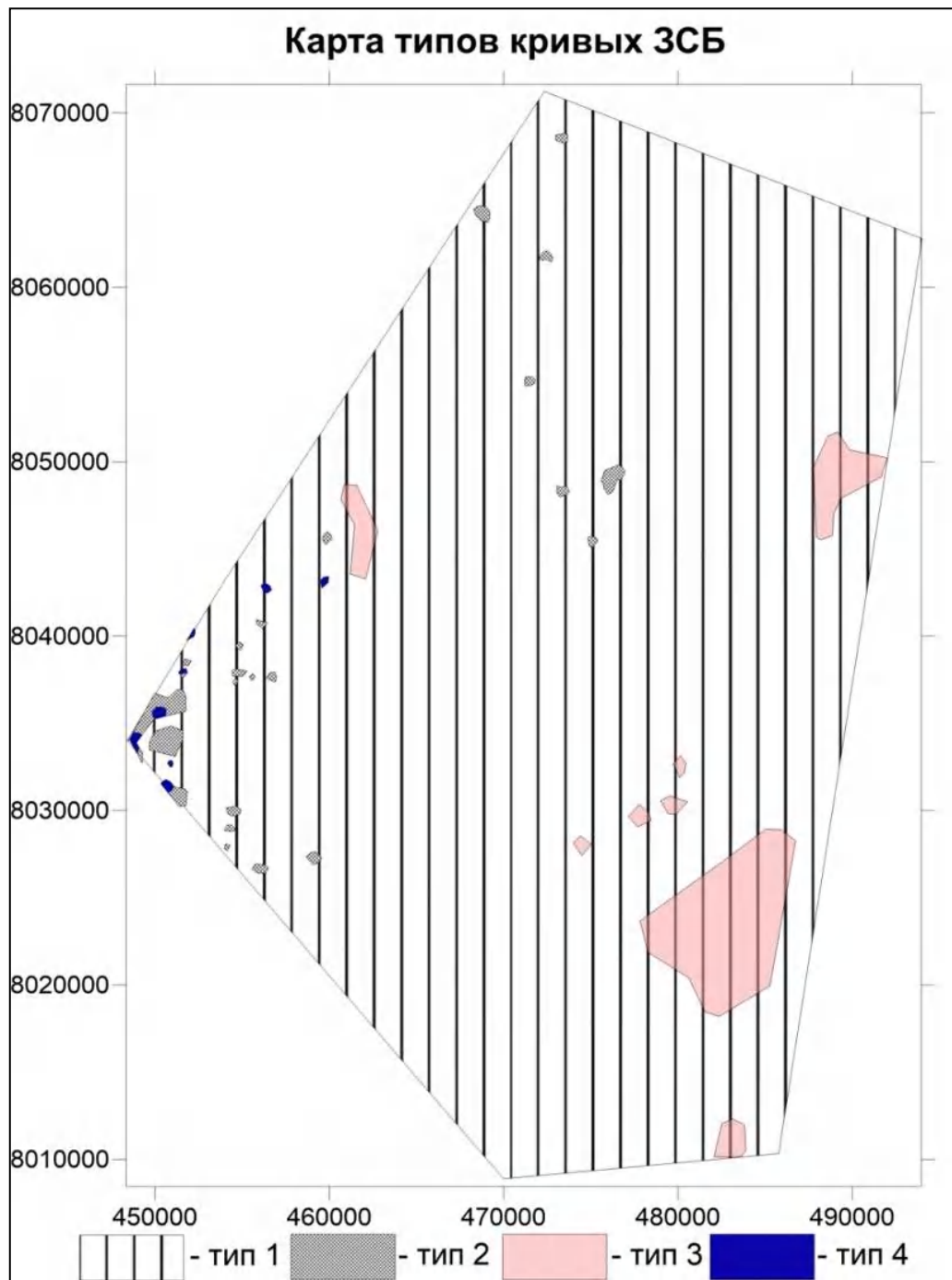


Рис. 4.15. Карта типов кривых ЗСБ.

Анализ типичных кривых ЗС позволяет сформулировать следующие закономерности геоэлектрического строения исследуемого района.

Тип 1. Для всей площади работ наиболее характерен тип 1 кривых ЗС. Характерной особенностью геоэлектрического разреза для данного типа является наличие в основании разреза высокоомного слоя.

Тип 3. Наиболее близким к типу 1 по конформности кривых является тип 3. Для этого типа характерна более крутая восходящая ветвь кривой кажущегося сопротивления на больших временах, что позволяет предполагать здесь наличие более высокоомной среды в основании разреза, чем в типе 1. Вместе с тем нужно заметить, что для типа 3 характерна резкая смена кривых кажущегося сопротивления. На расстояниях в первые километры здесь возможны как кривые ЗС с резкой восходящей ветвью, так и кривые ЗС с выположенной восходящей ветвью, что свидетельствует о возрастании проводимости в нижней части разреза (рис. 4.16).

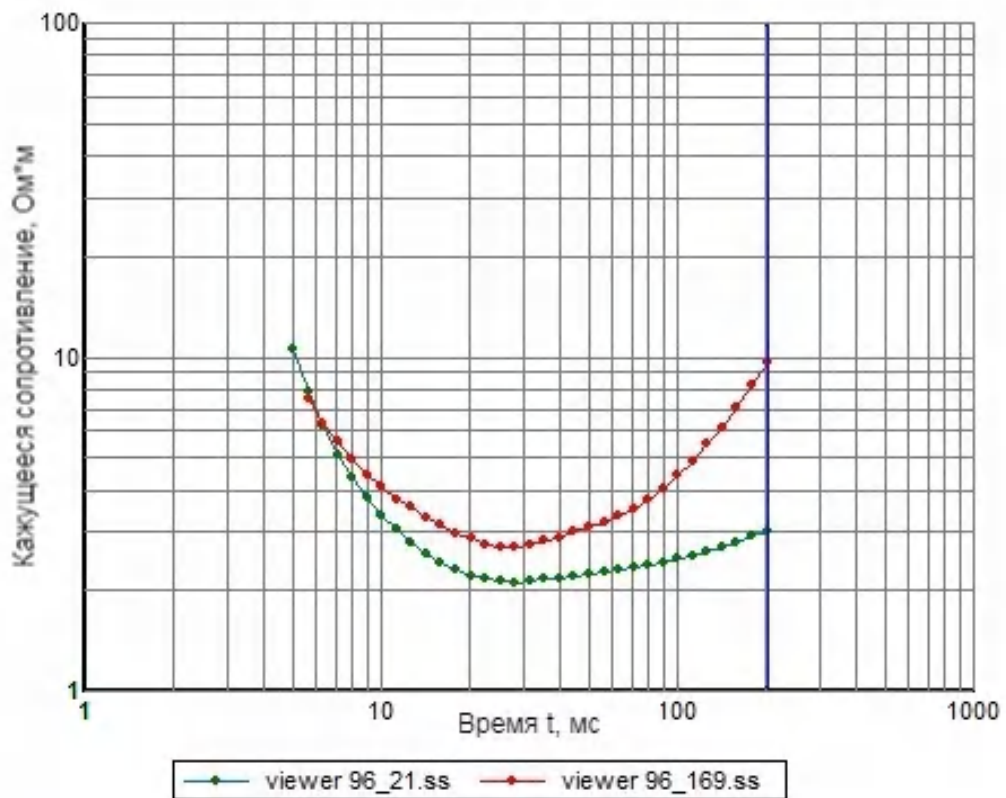


Рис. 4.16. Пример резкой смены геоэлектрического разреза для зоны конформности для типа 3.

Такое поведение кривых ЗС в этом районе можно объяснить наличием в высокоомном слое зон с аномально высокими сопротивлениями и соседствующими с ними зонами, для которых характерно резкое опускание кровли высокоомного слоя или даже отсутствие высокоомного слоя вообще.

Размеры зон, для которых характерно погружение кровли высокоомного слоя (кривая 96_21, рис 4.16), составляют сотни метров, поэтому при шаге съемки между профилями в 1 км нет оснований однозначно утверждать, что в основании разреза находится высокоомный слой. Возможно, небольшое увеличение сопротивления на кривой 96_21 связано с боковым влиянием соседнего высокоомного разреза, тогда как на точке 96_21 высокоомный слой отсутствует вообще. Для ответа на вопрос: «Существует ли в местах, аналогичных точке 96_21, полная деградация высокоомного слоя?» необходимо выполнить наблюдения с более частым шагом измерений.

Тип 2. Кривые кажущегося сопротивления для типа 2 свидетельствуют о полной деградации здесь высокоомного слоя. В основании разреза залегает проводящий слой с сопротивлением около 1 Ом·м. Этот тип наиболее распространен в западной части участка на больших глубинах акватории.

Тип 4. Для кривых кажущегося сопротивления типа 4 характерно наличие как проводящего слой отмеченного в типе 2, так и наличие под ним еще более проводящего слоя. Сопротивление проводника в основании может достигать 0,1 Ом·м. Этот тип кривых ЗС также распространен в западной части площади работ (рис. 4.13).

Для оценки глубин залегания высокоомного и проводящих слоев в геоэлектрическом разрезе была выполнена одномерная инверсия кривых кажущегося сопротивления в геоэлектрические модели с помощью программного обеспечения «Faraday», описанная в Главе 2.

При интерпретации данных ЗСБ принималась следующая геоэлектрическая модель:

– Первый от поверхности слой – морская вода сопротивлением 0,25–0,55 Ом·м. Мощность слоя принималась по данным эхолотирования.

– Второй от поверхности слой – охлажденные донные осадки сопротивлением 0,95– 1,05 Ом·м.

– Третий от поверхности слой – высокоомный слой, сопротивлением от 3 Ом·м и выше.

Для всех кривых кажущегося сопротивления была выполнена процедура инверсии с помощью программного обеспечения «Faraday» при заданных сопротивлениях модели.

Пример инверсии кривой кажущегося сопротивления для типа 1 приведен ниже (рис. 4.17).

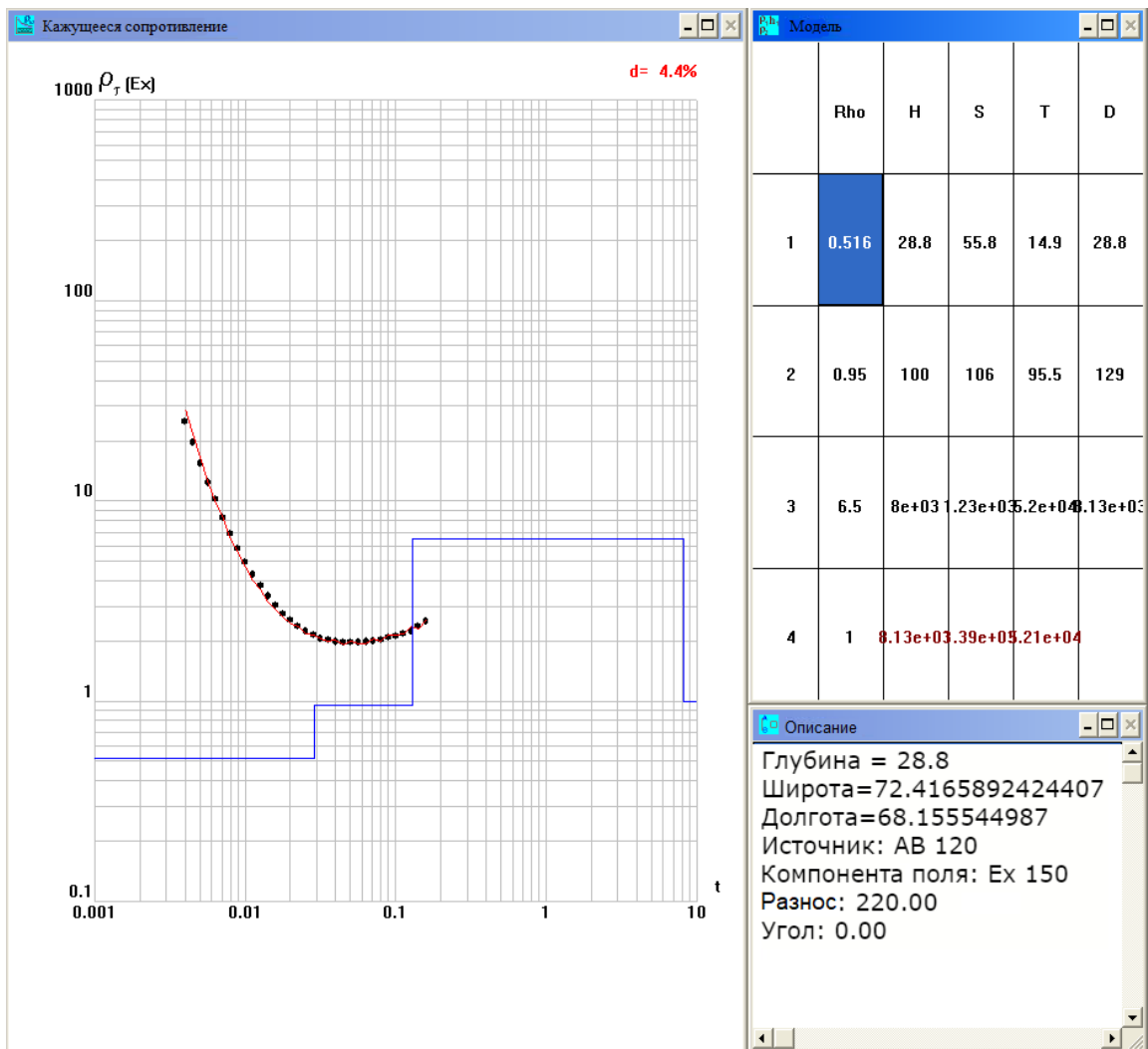


Рис. 4.17. Результат инверсии для кривой типа 1.

Глубина до кровли высокоомного слоя по результатам моделирования составила 129 м.

Пример инверсии кривой кажущегося сопротивления для типа 2 приведен ниже (рис. 4.18).

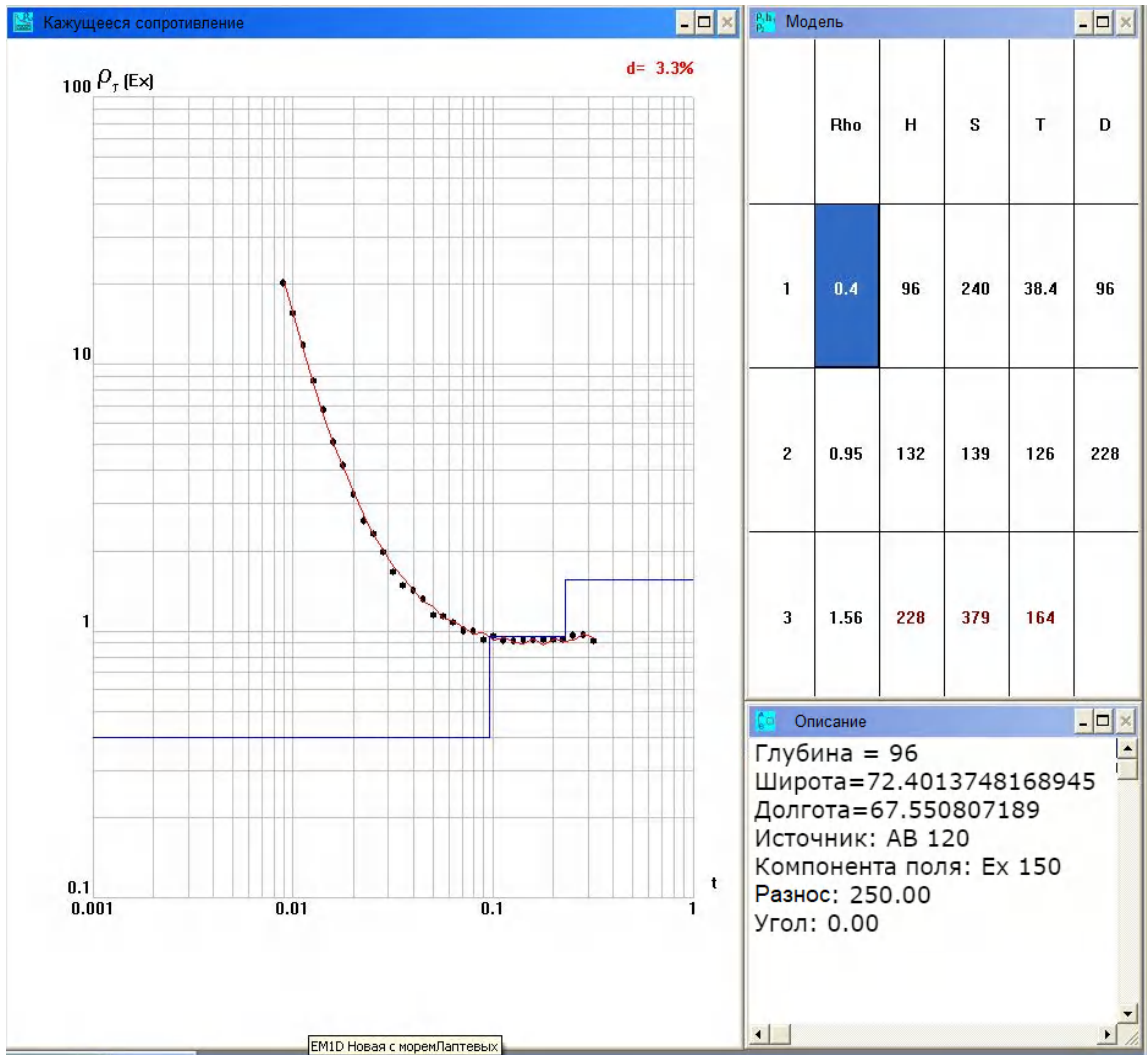


Рис. 4.18. Результат инверсии для кривой типа 2.

Глубина до проводящего слоя по результатам инверсии составила 228 м.

Пример инверсии кривой кажущегося сопротивления для типа 3 приведен ниже (Рис. 4.19).

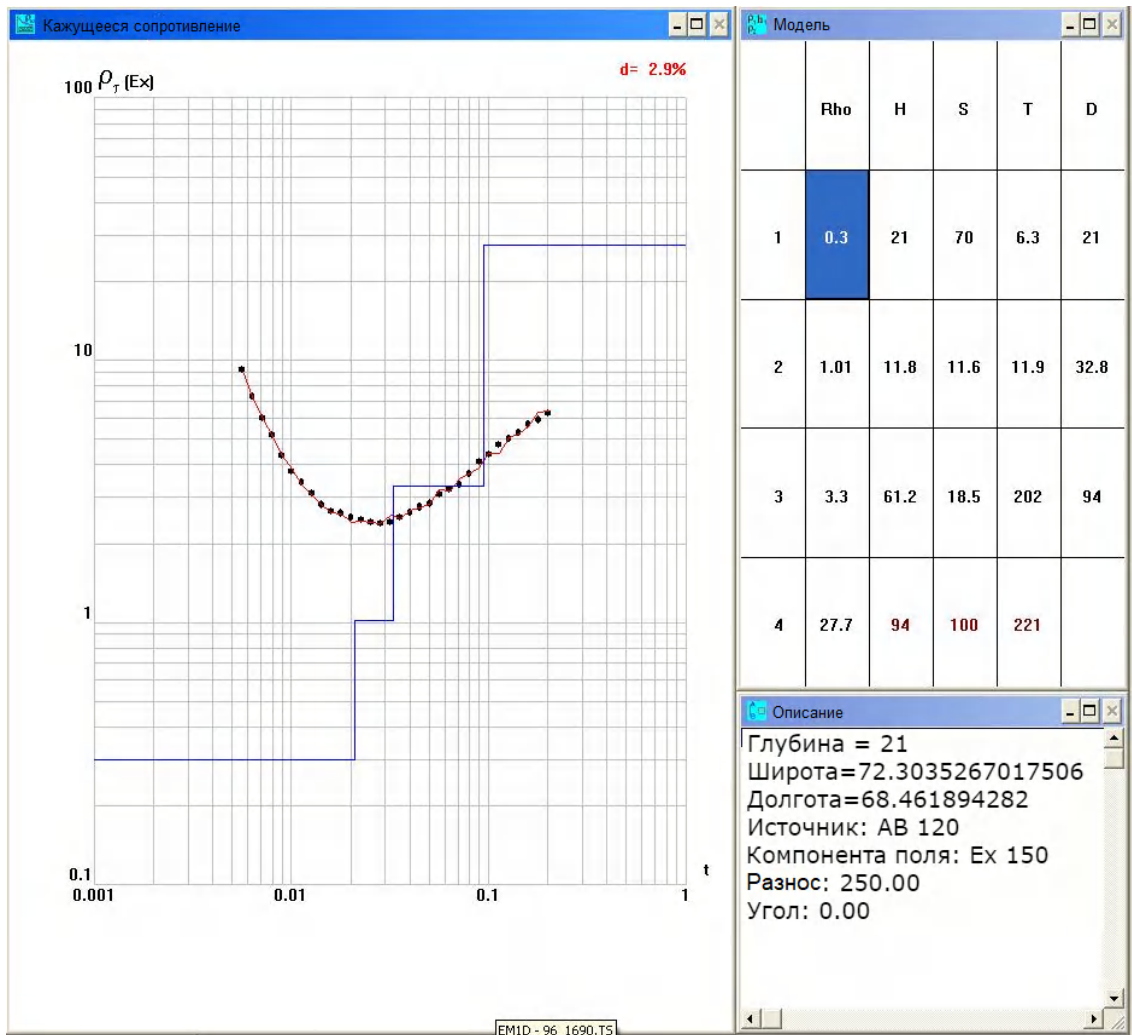


Рис. 4.19. Результат инверсии кривой ЗСБ 96_1690.

Глубина до кровли слоя аномально высокого сопротивления составила 94 м.

Пример инверсии кривой кажущегося сопротивления для типа 4 приведен ниже (рис. 4.20).

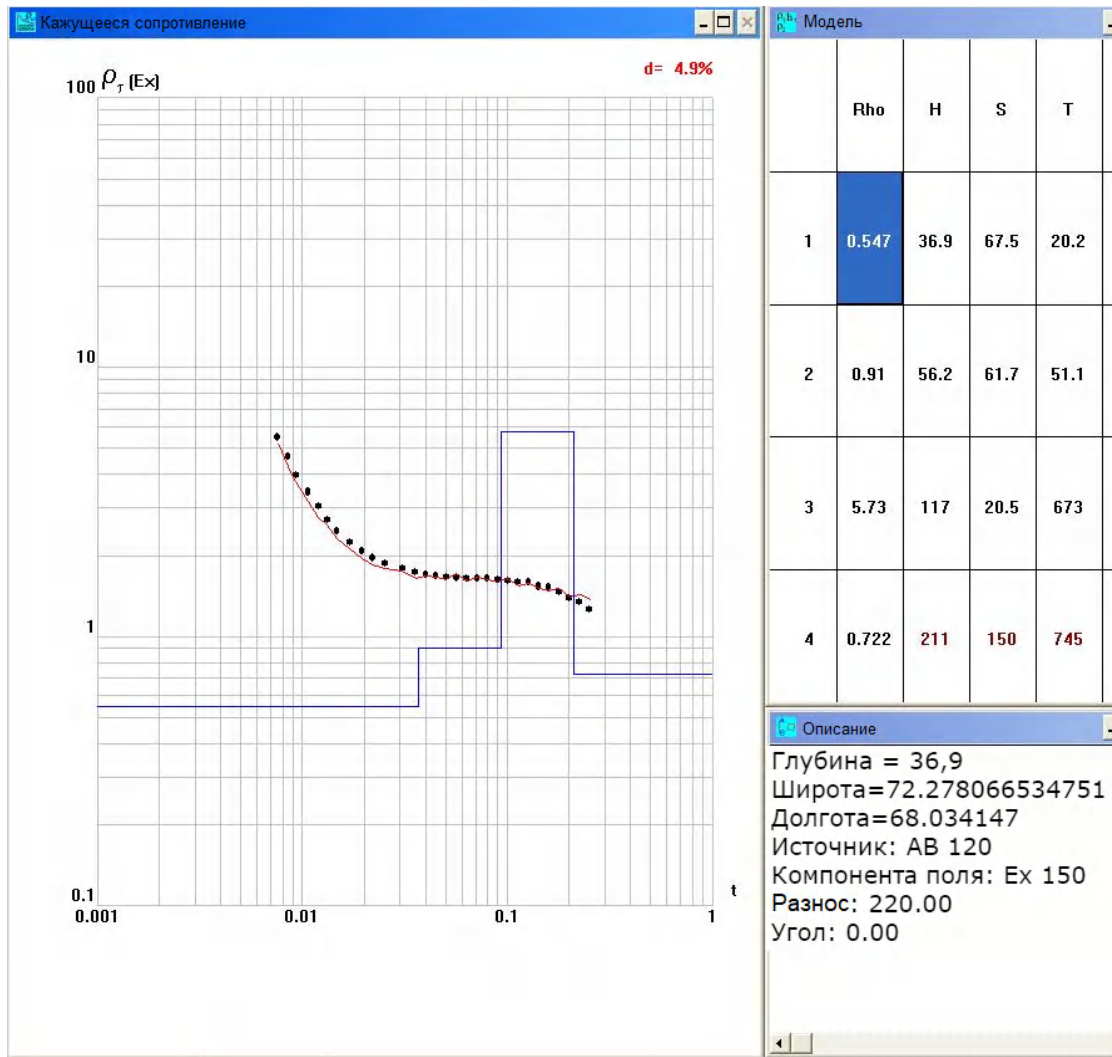


Рис. 4.20. Результат инверсии кривой ЗСБ 82_1997.

Глубина до кровли слоя аномально низкого сопротивления составила 215 м.

Точность полевых наблюдений при регистрации кривых ЭДС была не хуже 5%. Буровые работы, выполненные год спустя после геофизических работ, подтвердили правильность выбора УЭС и положения границ в геоэлектрической модели. Приведем оценку возможной области погрешностей при моделировании глубины до слоя высоких сопротивлений при инверсии кривых кажущегося сопротивления в условиях приямальского шельфа.

При использовании оптимальной модели, в которой высокоомный слой составляет 6,5 Ом·м, глубина залегания этого слоя составила 129 м. Максимальное значение УЭС высокоомного слоя, при котором полевая кривая

совпадает с модельной с погрешностью 5%, составляет 7 Ом·м, при этом глубина залегания высокоомного слоя составила 139 м (рис 4.21).

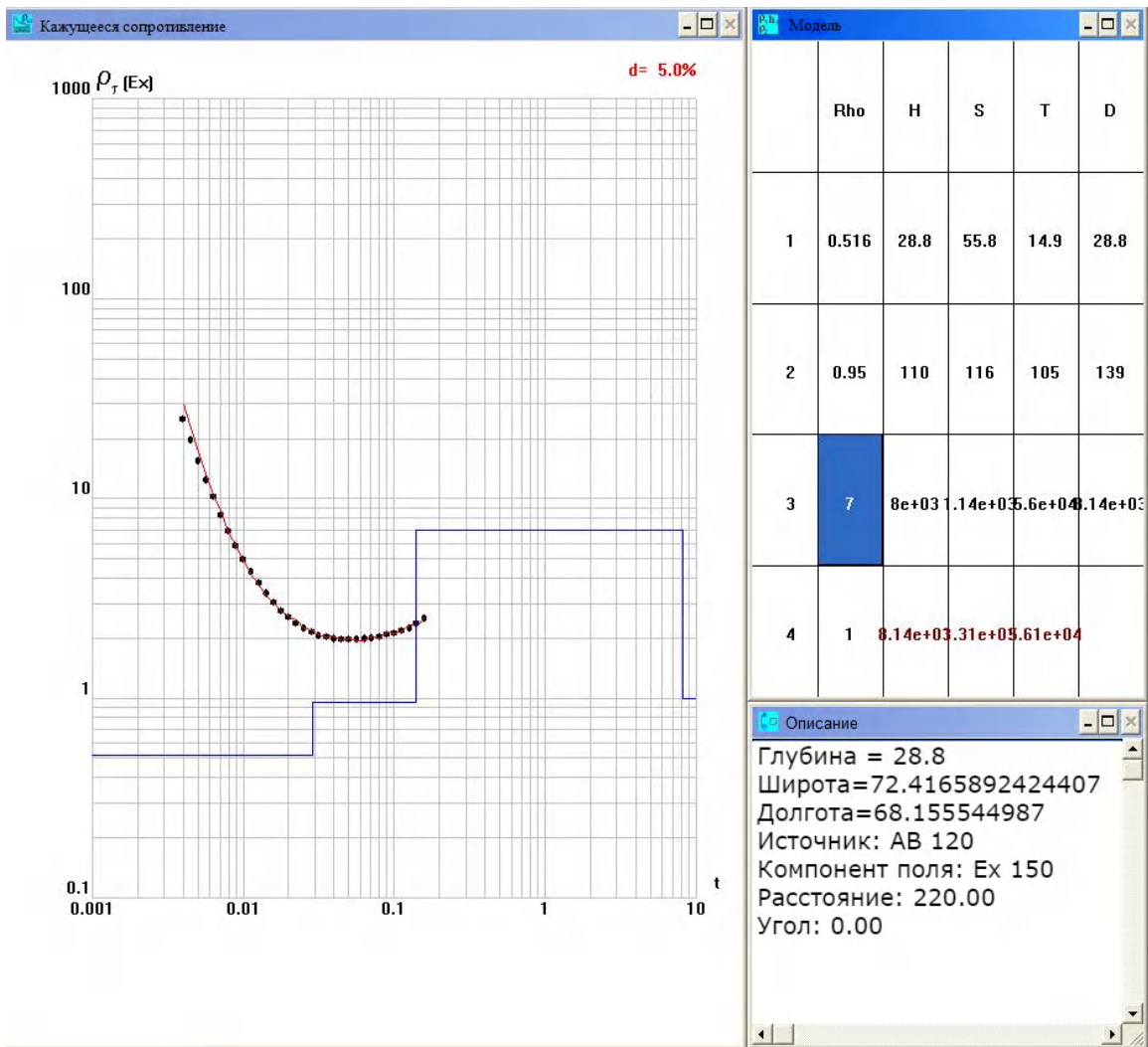


Рис. 4.21. Результат инверсии кривой 84–1014 с УСЭ высокоомного слоя 7 Ом·м.

Минимальное же сопротивление, при котором модельная кривая совпадает с полевой с заданной точностью составило около 6 Ом·м, глубина залегания высокоомного слоя составляет 126 м (рис. 4.22).

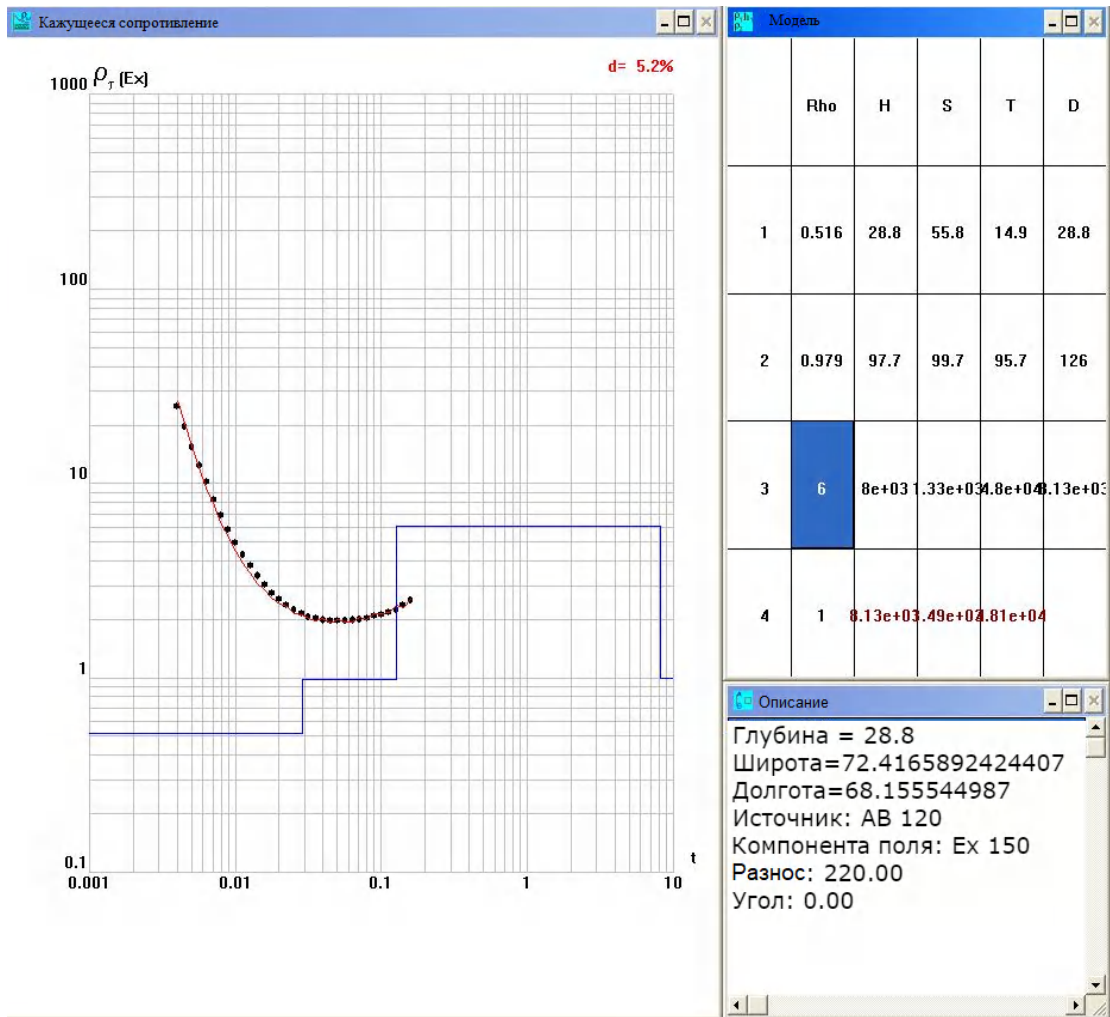


Рис. 4.22. Результат инверсии кривой ЗСБ 84-1014 при УЭС высокоомного слоя 6 Ом·м.

Таким образом, решения обратной задачи по методу ЗСБ для кривых кажущегося сопротивления типа 1 при определении глубины до высокоомного слоя работ лежит в узком интервале, составляющем порядка 10% от глубины залегания выделяемого слоя.

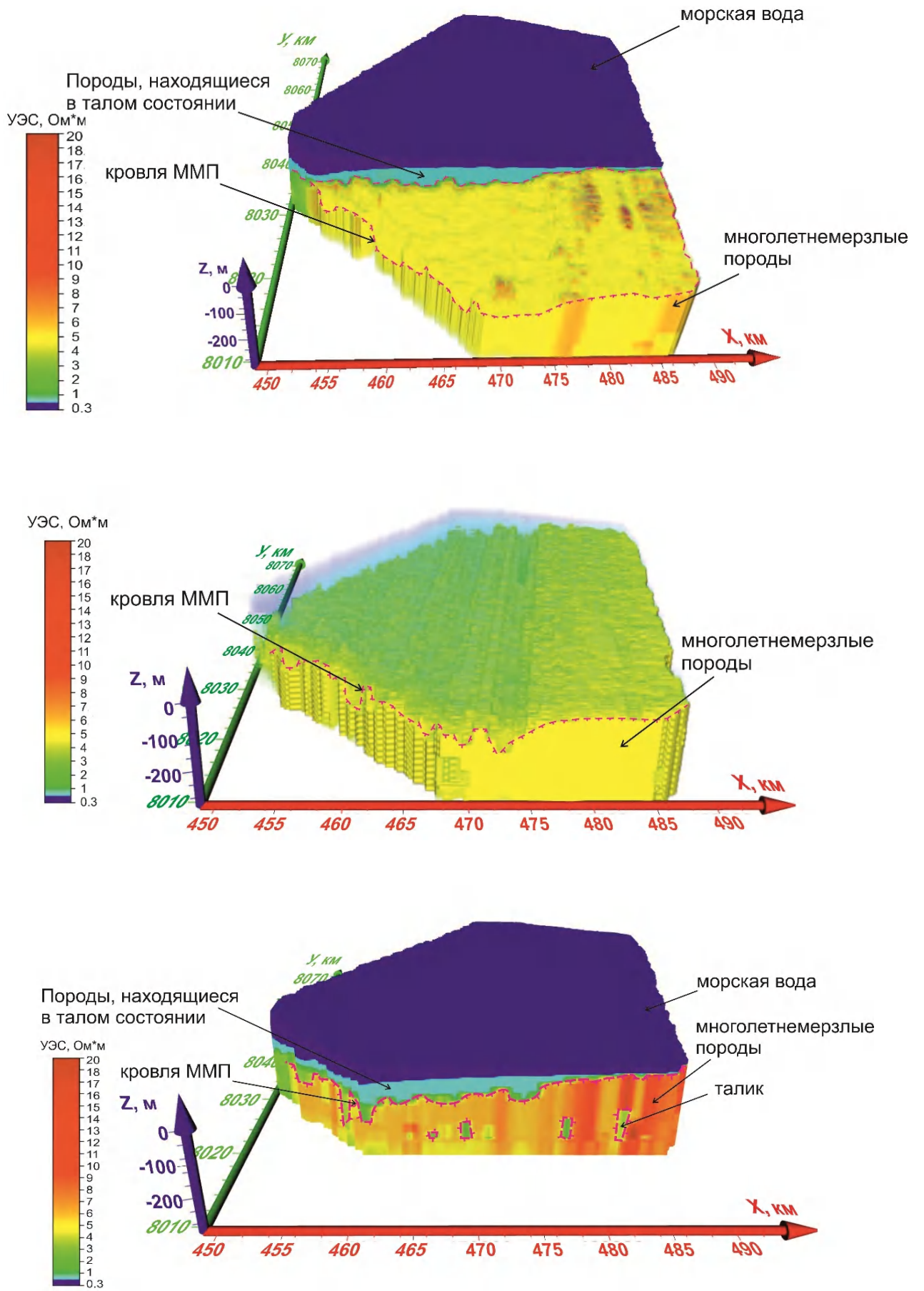


Рис. 4.23. 3D модель распределения УЭС на участке работ. Приразломный шельф, 2015 г.

Обобщая все результаты одномерной инверсии по программному обеспечению «Faraday», была построена трехмерная модель распределения УЭС на участке работ до глубины 240 м от поверхности моря (рис. 4.23).

В верхней части геоэлектрического разреза прослеживается слой с низкими значениями удельного электрического сопротивления (доли Ом·м) – морская вода. Второй от поверхности слой (первые Ом·м) – охлажденные породы. Ниже в геоэлектрическом строении разреза наблюдается зона повышенного сопротивления (более 4–5 Ом·м), природа этого слоя может быть связана с вяломерзлыми – засоленными многолетнемерзлыми породами, обладающими большим процентным содержанием незамерзшей воды, находящимися при температуре, близкой к температуре начала замерзания, имеющими безградиентное распределение температурного поля по глубине, как показали последующие буровые (АО «АМИГЭ») и термометрические исследования автора. Под термином «вяломерзлые» породы будем понимать породы, находящиеся в переходном состоянии между талым и мерзлым и имеющие переходные характеристики по УЭС между значениями для талых и мерзлых пород.

Высокоомный слой на участке выделяется на ~90 % точек зондирования. Детальные работы методом ЗСБ на участке работ были выполнены автором в 2015 г. с борта судна «Маршал Василевский». В 2016 г. с борта судна «Кимберлит» были выполнены буровые (АО «АМИГЭ») и термометрические работы автором на детальном участке приямальского шельфа. Результаты работ показали, что при бурении происходит растепление ММП на Нярмейском ЛУ и только по данным термометрии и определении температуры начала замерзания отложений можно судить об отсутствии или присутствии многолетнемерзлых пород на участке. Результаты термометрии и лабораторных испытаний полностью подтвердили вывод о связи кровли высокоомного слоя с кровлей ММП, что подтверждено актами выполненных работ автором по предлагаемой методике различными производственными организациями (Приложение И).

По результатам интерпретации данных ЗСБ была построена карта кровли залегающего высокоомного слоя (рис. 4.24). На этой карте выделяются участки загибания кровли высокоомного слоя, а также участки (отмечены белым), где во всей толще исследований высокоомный слой встречен не был.

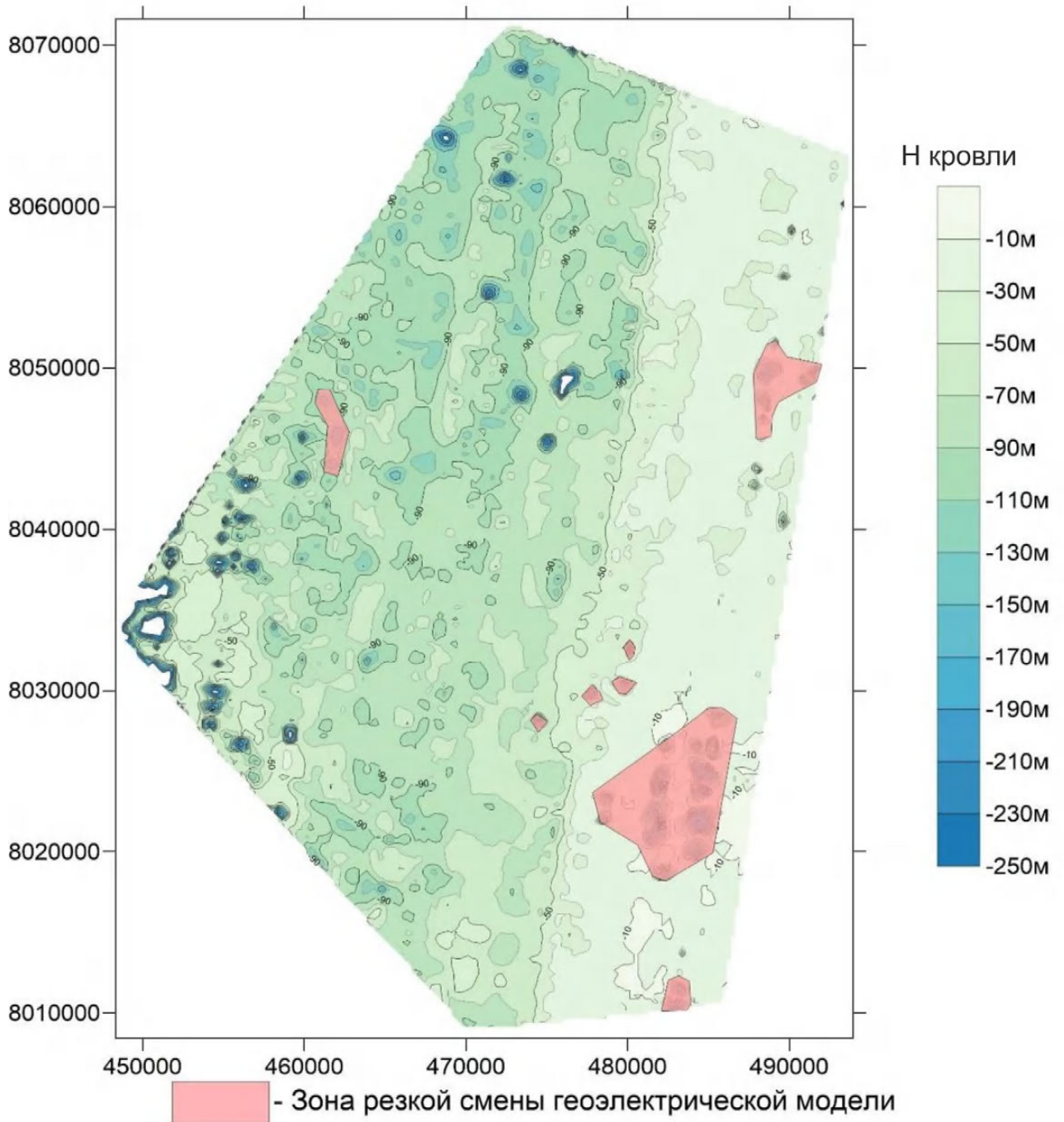


Рис. 4.24. Карта кровли высокоомного слоя от поверхности дна. Приразмальный шельф, 2015 г.

Кровля высокоомного слоя интерпретируется как кровля ММП. Такая морфология кровли ММП определяется, в основном, историей криогенного

развития территории до наступления моря на сушу. Изометричные заглабления кровли, вероятно, являются унаследованным результатом термокарстовых озер, а вытянутые – рек или временных водотоков.

Полученную 3D модель высокоомной зоны на участке работ можно срезать любым сечением и получить разрез УЭС, иллюстрирующий расположение кровли и подошвы ММП на участке (рис. 4.25).

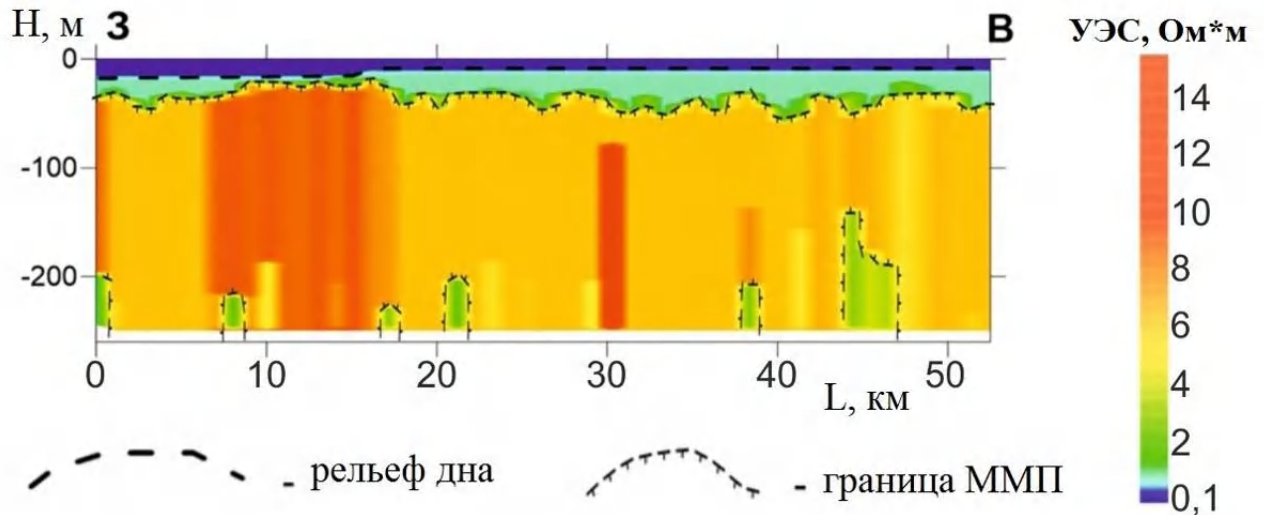


Рис. 4.25. Положение кровли и подошвы ММП на профиле детального участка. *H*-глубина, *L*-расстояние.

Работы, выполненные автором на участке перехода газопроводом Бованенково–Ухта через Байдарацкую губу Карского моря, свидетельствуют, что и многолетнемерзлые породы имеют здесь двухслойное строение, так, помимо реликтовой мерзлоты, существуют «kozyрьки» многолетнемерзлых пород на глубинах 0–10 м на Ямальском участке суша-море (рис. 4.26).

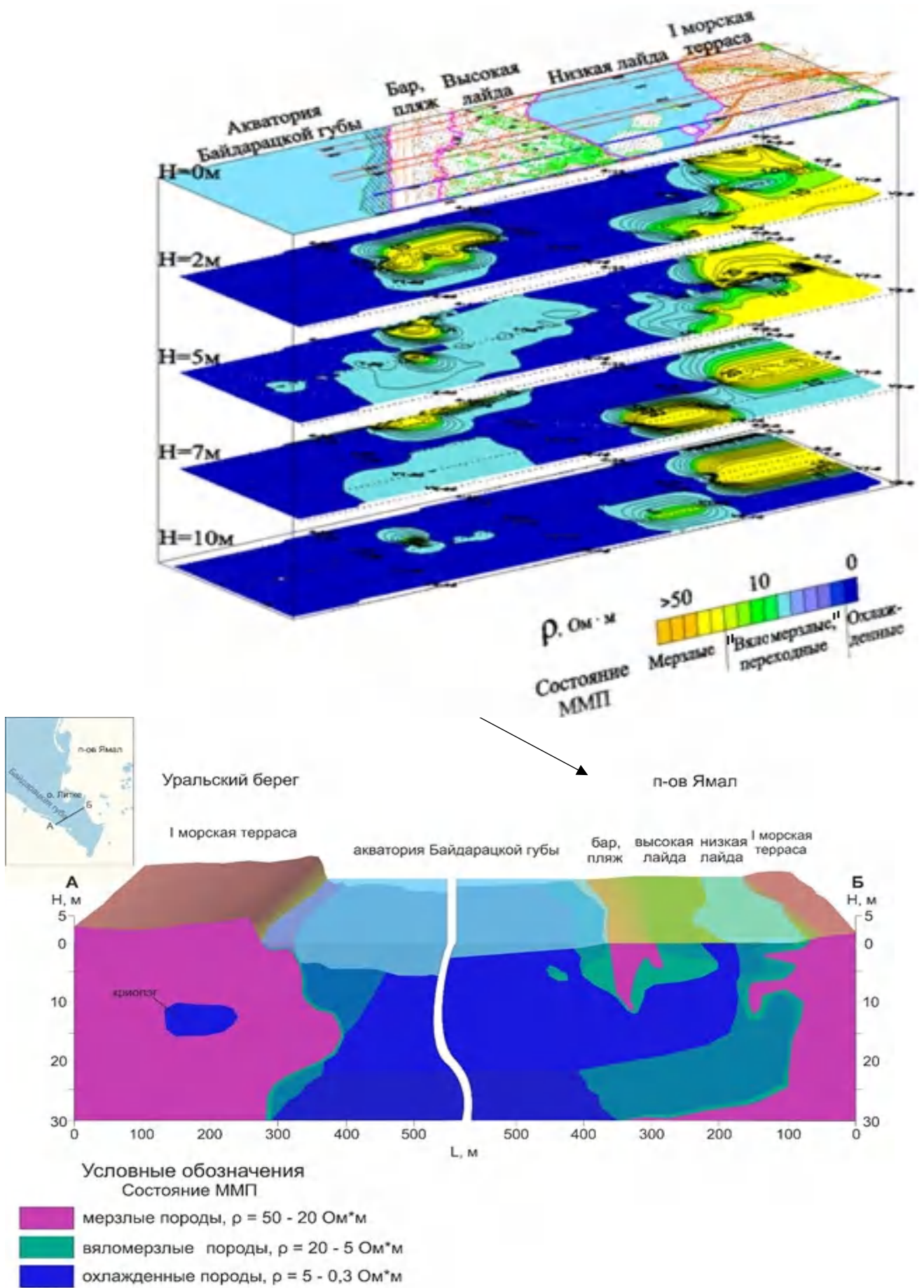
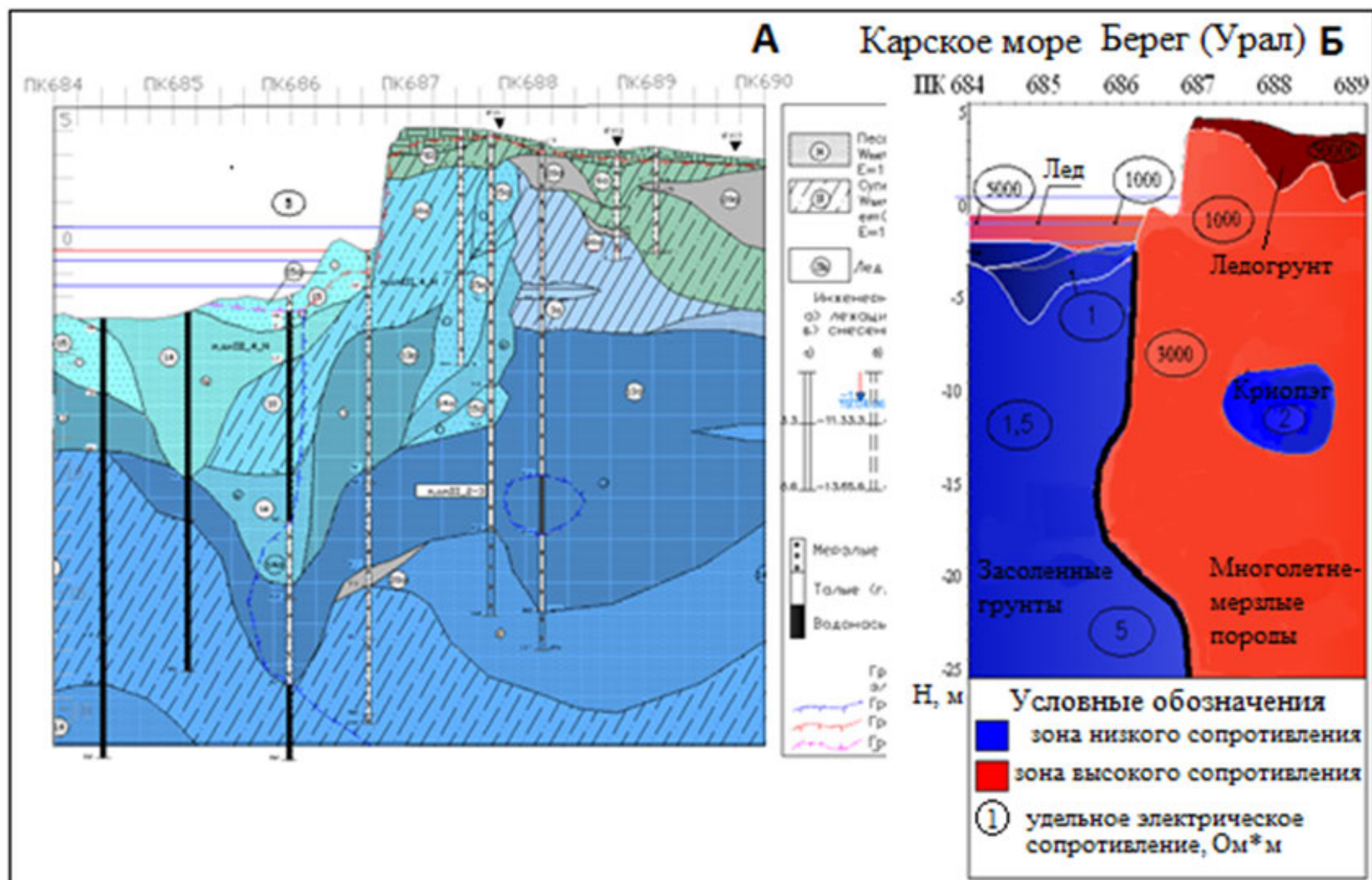
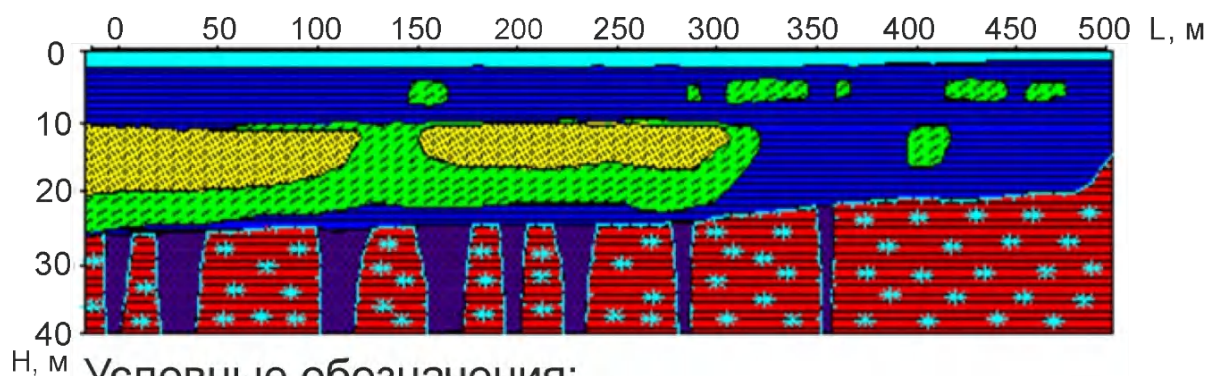


Рис. 4.26. 3D модель состояния многолетнемерзлых толщ участка транзитной зоны суша-шельф Карского моря.



Б



Условные обозначения:

- менее 1 Ом*м (пески, содержащие сильноминерализованные воды)
- 1 - 2 Ом*м (глины, суглинки)
- 3 - 4 Ом*м (супеси, переслаивание супесей и песков)
- 5 - 7 Ом*м (песок пылеватый)
- граница многолетнемерзлых пород
- вода
- мерзлые породы (более 10 Ом*м)

Геoeлектрический разрез по данным ЧЗ+ЗСБ профиль 9

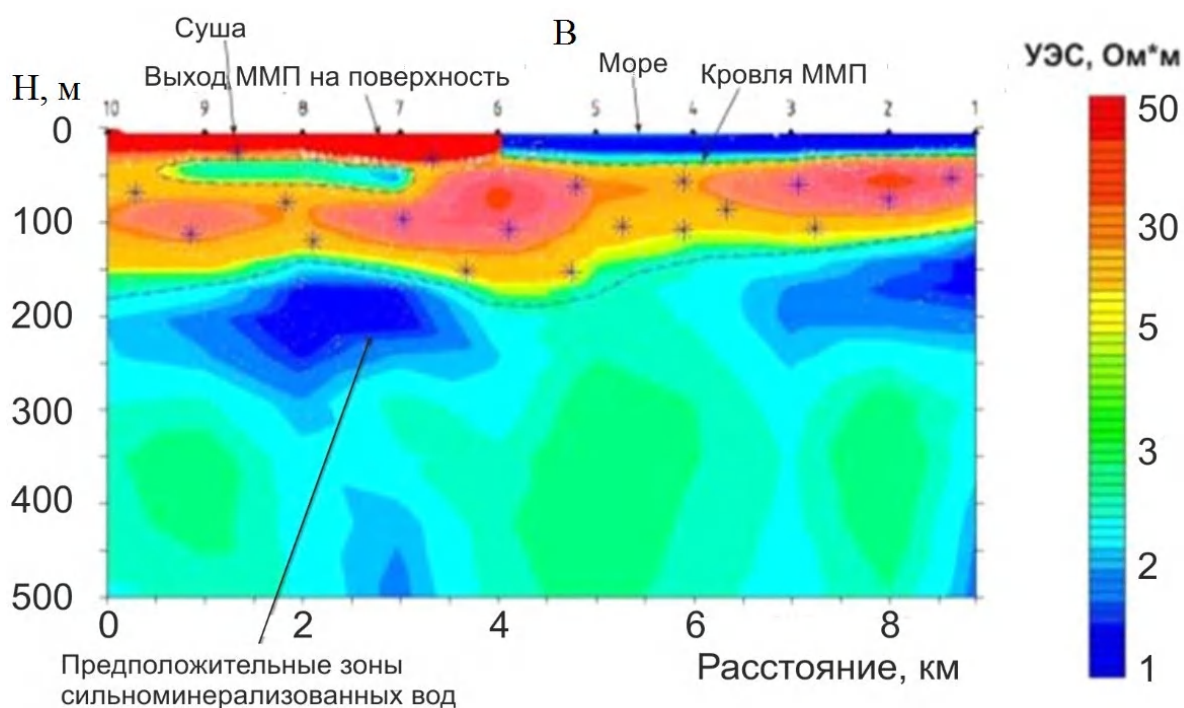


Рис. 4.27. Геoeлектрические разрезы на шельфе Карского моря: А – Байдарацкая губа (сопоставление инженерно-геокриологического и геoeлектрического разрезов), Б и В – зал. Шаранов Шар, 2010 г.

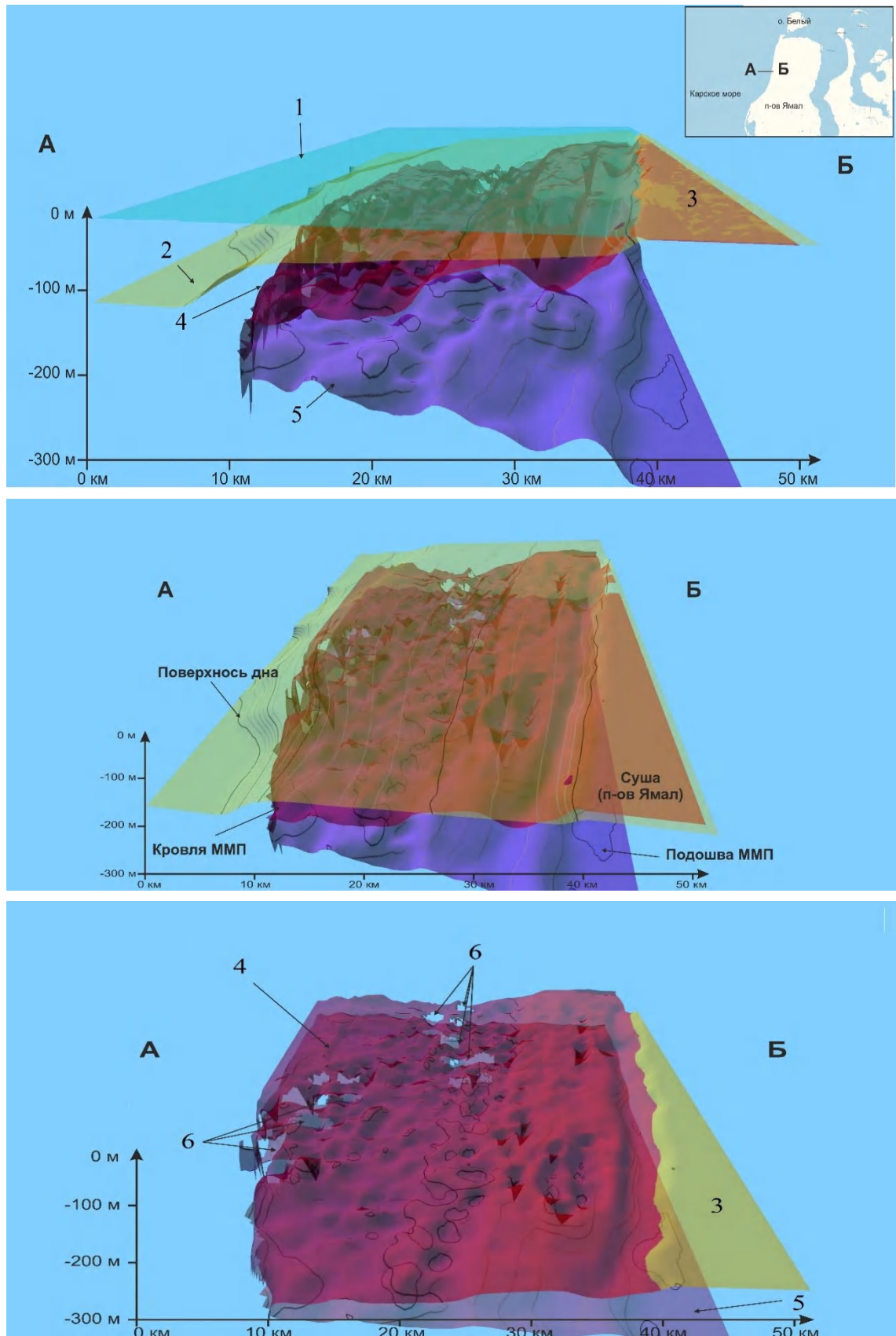


Рис. 4.28. 3D геокриологическая модель участка шельфа Карского моря. Цифрами и цветом показаны разные поверхности: 1 – уровень акватории (голубой), 2 – поверхность дна (песчаный), 3 – поверхность суши (желтый), 4 – кровля ММП (малиновый), 5 – подошва ММП (фиолетовый), 6 – таликовые зоны.

Работы, выполненные автором методами ЧЗ+ЗСБ на акватории залива Шарапов Шар в пределах северо-западного шельфа Карского моря, показали также несплошное развитие многолетнемерзлых пород на приямальском шельфе (рис. 4.27).

Таким образом, детальные работы автора на многих участках шельфа Карского моря показали прерывистое распространение многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря. Кровля и подошва многолетнемерзлых пород здесь крайне неоднородна, имеет большое количество погруженных участков или сквозных таликов (рис. 4.28), природа которых скорее всего связана с термокарстом (Романовский и др, 1996). В переходной зоне суша-шельф по материалам автора помимо выступов реликтовой мерзлоты (рис. 4.28), существуют «козырьки» современных многолетнемерзлых пород (рис. 4.26) на глубинах 0–10 м (Применение..., 2020, Кошурников и др., 2019, Брушков и др., 2016). На шельфе Печорского моря мерзлые породы имеют островное распространение в западной его части и массивно-островное в восточной.

На рисунке 4.29 приведена карта фактического материала геофизических и буровых работ на шельфе моря Лаптевых.

На полигоне в заливе губы Буор-Хая была выполнена проверка результатов геофизических работ методом ЗСБ бурением с припайного льда, показавшая, что природа высокоомного слоя связана с многолетнемерзлыми породами. Геофизические исследования проводились с поверхности морского льда и осуществлялись с помощью антенны, состоящей из генераторной и измерительной квадратных петель, и аппаратного комплекса «Цикл-7» (Zakharkin, 1981). На первом этапе работ ЭМ поле возбуждалось петлей 25×25 м, расположенной на льду, а его измерение петлей 20×20 м, расположенной соосно с возбуждающей петлей для изучения верхней части геоэлектрического разреза, что позволило получить высокое разрешение анализируемого сигнала до глубин 100 м. (Методические рекомендации..., 1987). Глубинная часть

геоэлектрического разреза исследовалась с помощью генераторных петель размером 400×400 м и измерительной петли 100×100 м, расположенной на льду соосно с возбуждающей петлей. При таких размерах антенны измерения ЭМ поля позволили получить информацию об удельном электрическом сопротивлении пород до глубины около 1 км.

Первые результаты зондирования показали существование в геоэлектрическом разрезе вблизи юго-восточного края дельты р. Лены и о. Муостах высокоомного слоя (рис. 4.31). Анализ кривых ЗСБ с генераторной петлей 25×25 м свидетельствует об увеличении кажущегося сопротивления со временем (с глубиной) в интервале времен 0,4–4 мс. Анализ кривых ЗСБ с генераторной петлей 400×400 м свидетельствует об увеличении кажущегося сопротивления с глубиной в интервале 3–10 мс и уменьшении кажущегося сопротивления с глубиной в интервале 20–50 мс (рис. 4.31 А).

Сводная кривая ЗСБ в районе о. Муостах приведена на рисунке 4.29 Б. Анализ сводной кривой позволяет сделать вывод, что по данным электромагнитных зондирований в районе о. Муостах зафиксирован высокоомный слой с величиной кажущегося сопротивления $40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, и выше, тогда как кажущееся сопротивление немерзлых толщ оказалось на 1–2 порядка меньше. Полученные данные позволяют оценить УЭС этого слоя и глубины до его кровли и подошвы.

Первой задачей при проведении ЭМ зондирований стала оценка достоверности и точности получаемых при этом результатов. Для этого вблизи северной оконечности о. Муостах (рисунок 4.30) в точке, где планировалось бурение одной из колонковых скважин, до подхода транспортного каравана (2 трактора, буровая установка на гусеничном ходу, два двухэтажных балка, грузовые сани) были выполнены 2 электромагнитных зондирования с размерами генераторных петель 25×25 м и 400×400 м (рис. 4.31Б). Это позволило исключить влияние металла тракторов, буровой установки и другой техники на результаты

зондирований и получить неискаженные данные о положении кровли многолетнемерзлых пород.

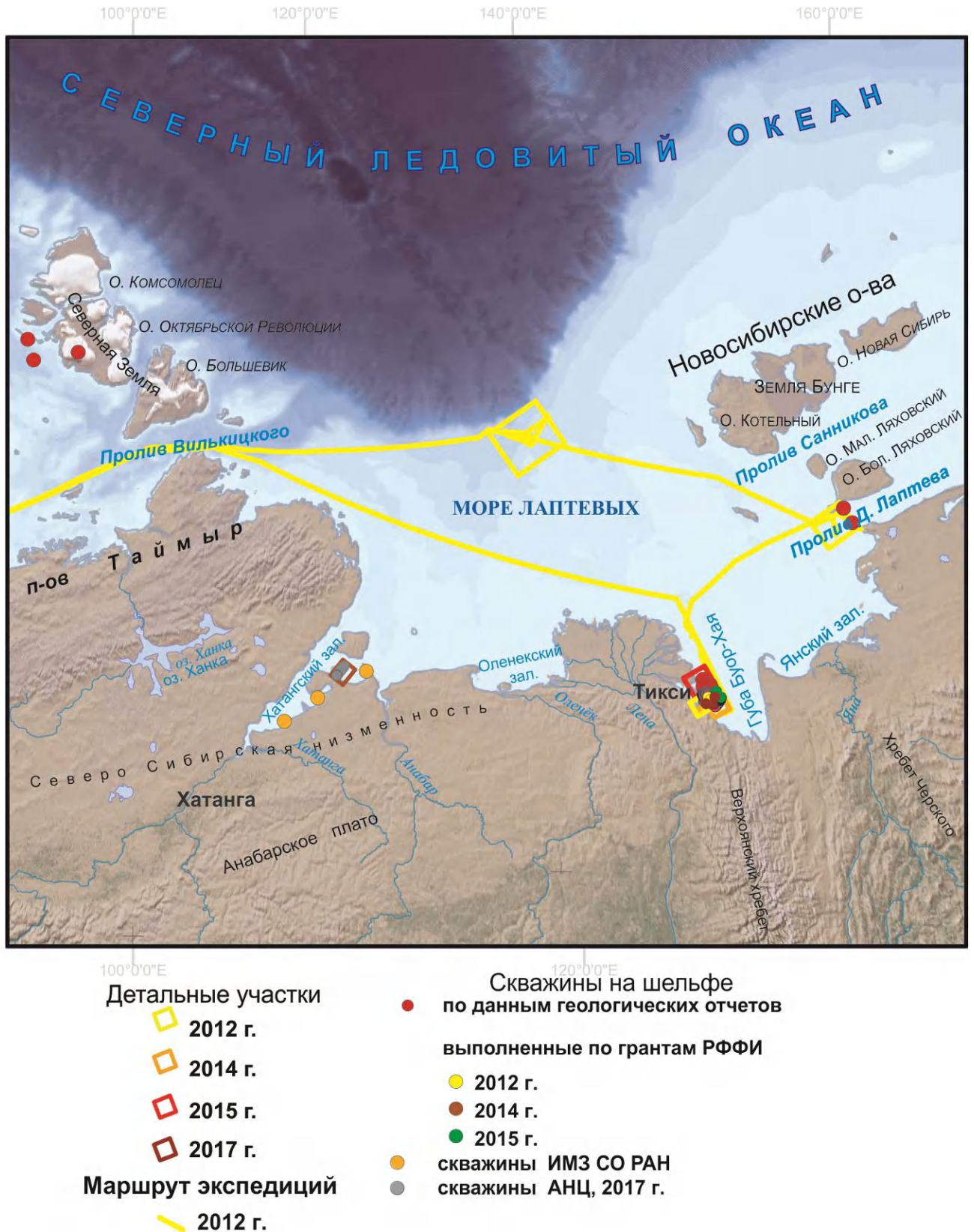


Рис. 4.29. Карта фактического материала на шельфе моря Лаптевых.

После осуществления зондирований было проведено математическое моделирование геоэлектрического разреза по данным ЗСБ. Математическое моделирование выполнялось с помощью программного обеспечения «Faraday» в классе «толстослойных» моделей (Основы..., 2020) Ниже приведен пример реализации этой модели для точки, где скважина 4D-12 была выполнена после электромагнитного зондирования.

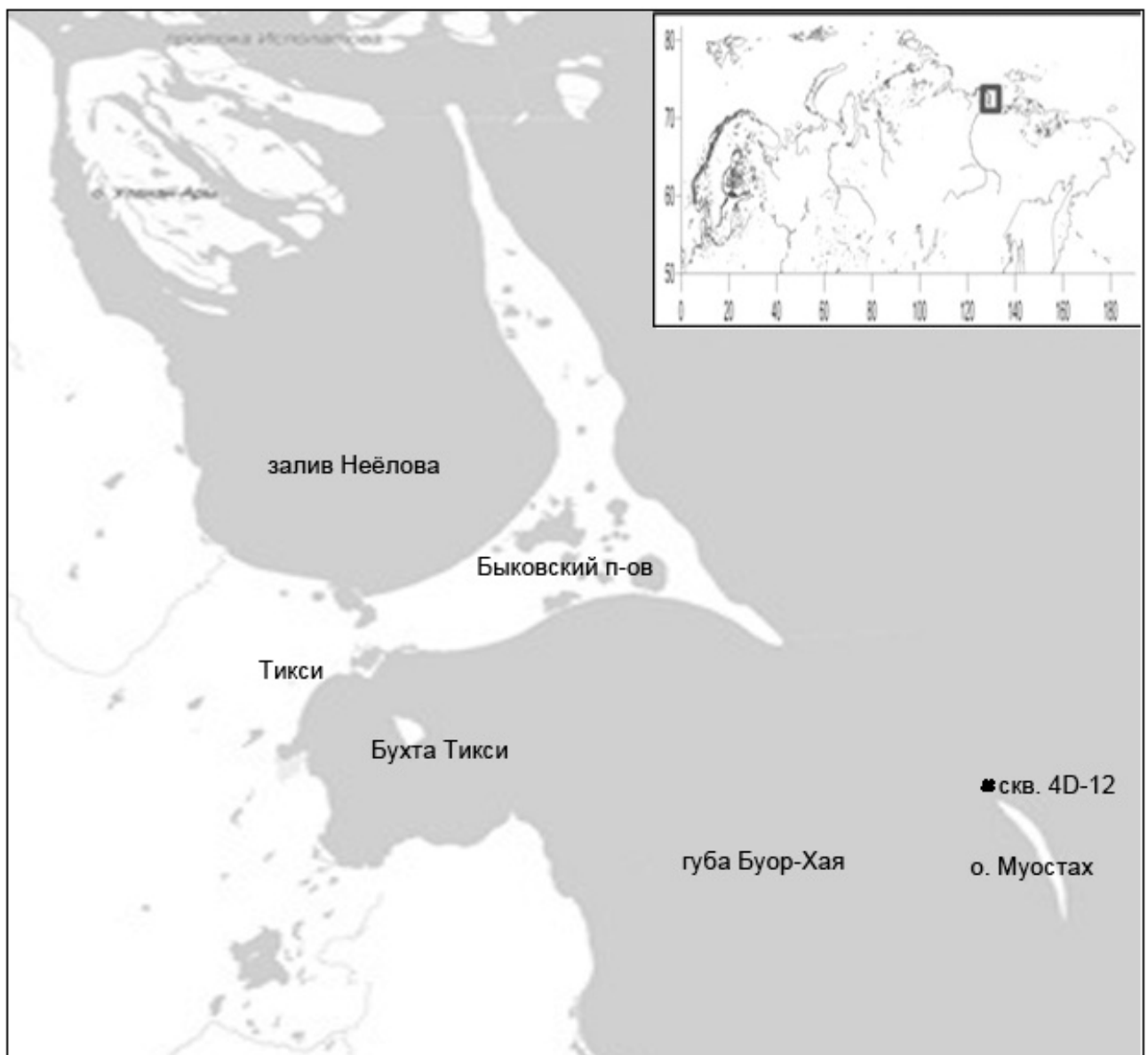


Рис. 4.30. Обзорная карта района работ, расположение точки электромагнитного зондирования и скважины 4D-12.

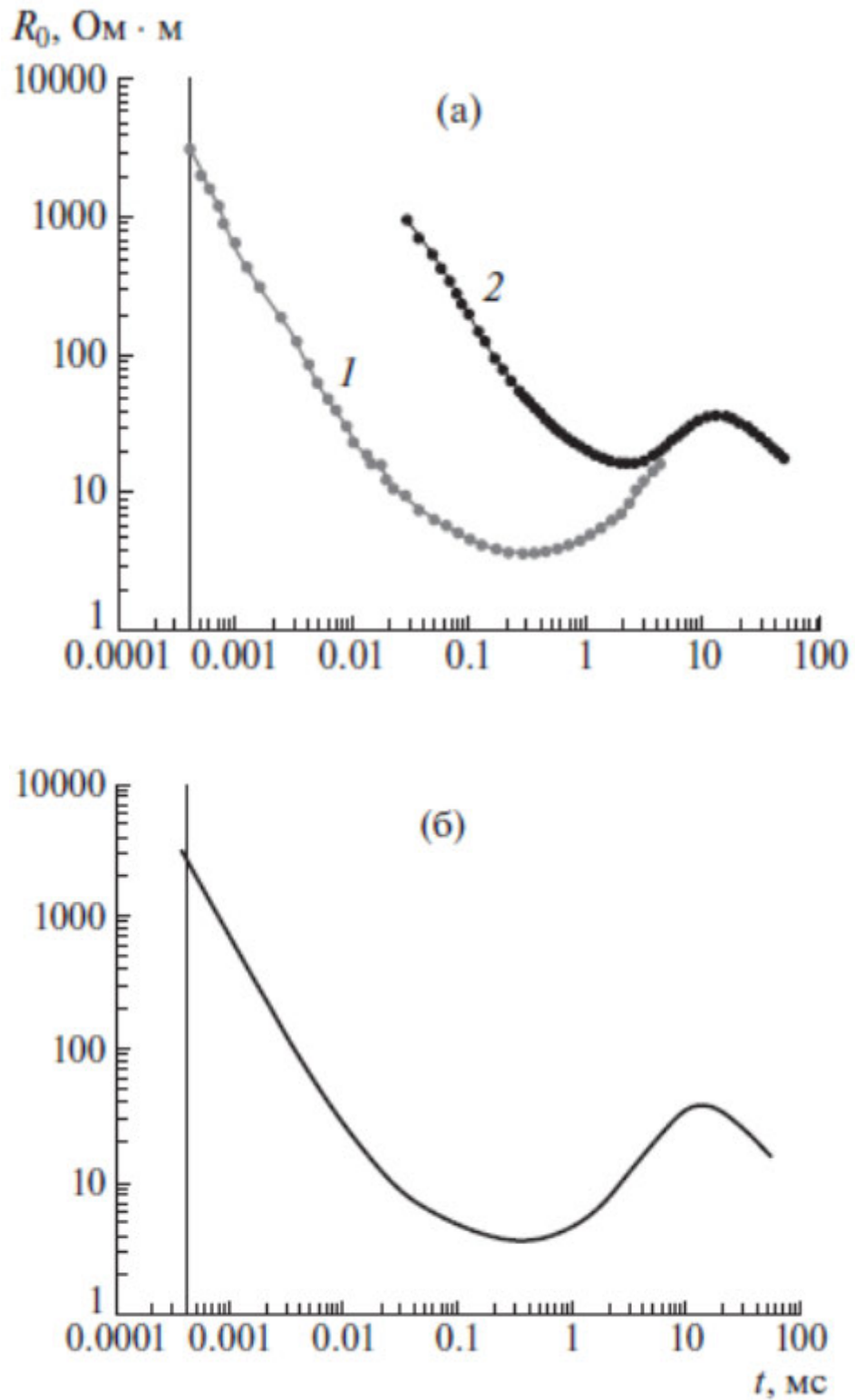


Рис. 4.31. Сравнение кривых ЗСБ с разными размерами антенн (1–25 × 25 м, 2–400 × 400 м) в районе о. Муостах, море Лаптевых (а), сводная кривая ЗСБ в районе о. Муостах (б).

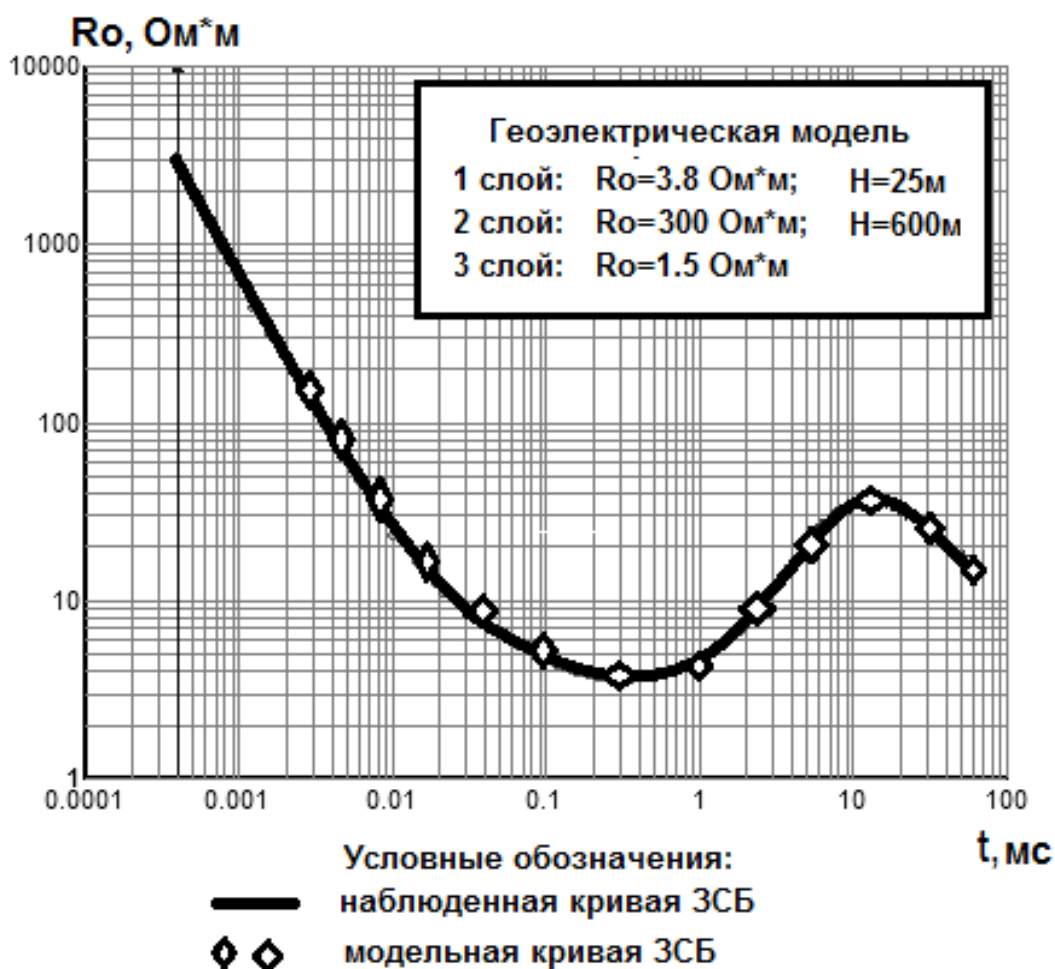


Рис. 4.32. Результаты моделирования геоэлектрического разреза в точке бурения скважины 4D-12.

Результаты моделирования геоэлектрического разреза вблизи о-ва Муостах приведены на рисунке 4.32. По данным наблюдений и математического моделирования было получено положение кровли высокоомного слоя на глубине 25 м. УЭС высокоомного слоя достигает 300 Ом·м. Измерения УЭС образцов керна из скважин позволяют задавать истинные величины УЭС слоев в геоэлектрической модели при моделировании результатов электромагнитных зондирований. Поскольку поле электромагнитного диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды зависит как от УЭС слоев, так и от их мощности (Жданов, 1995), то использование УЭС, измеренных на керне из скважин, позволяет определять мощности слоев с заданными УЭС, в частности глубину до кровли ММП.

Скважина 4D-12

Мощность льда 2.1 м,
глубина воды 2.5 м

Начало бурения 09.04.2012,
окончание - 11.04.2012

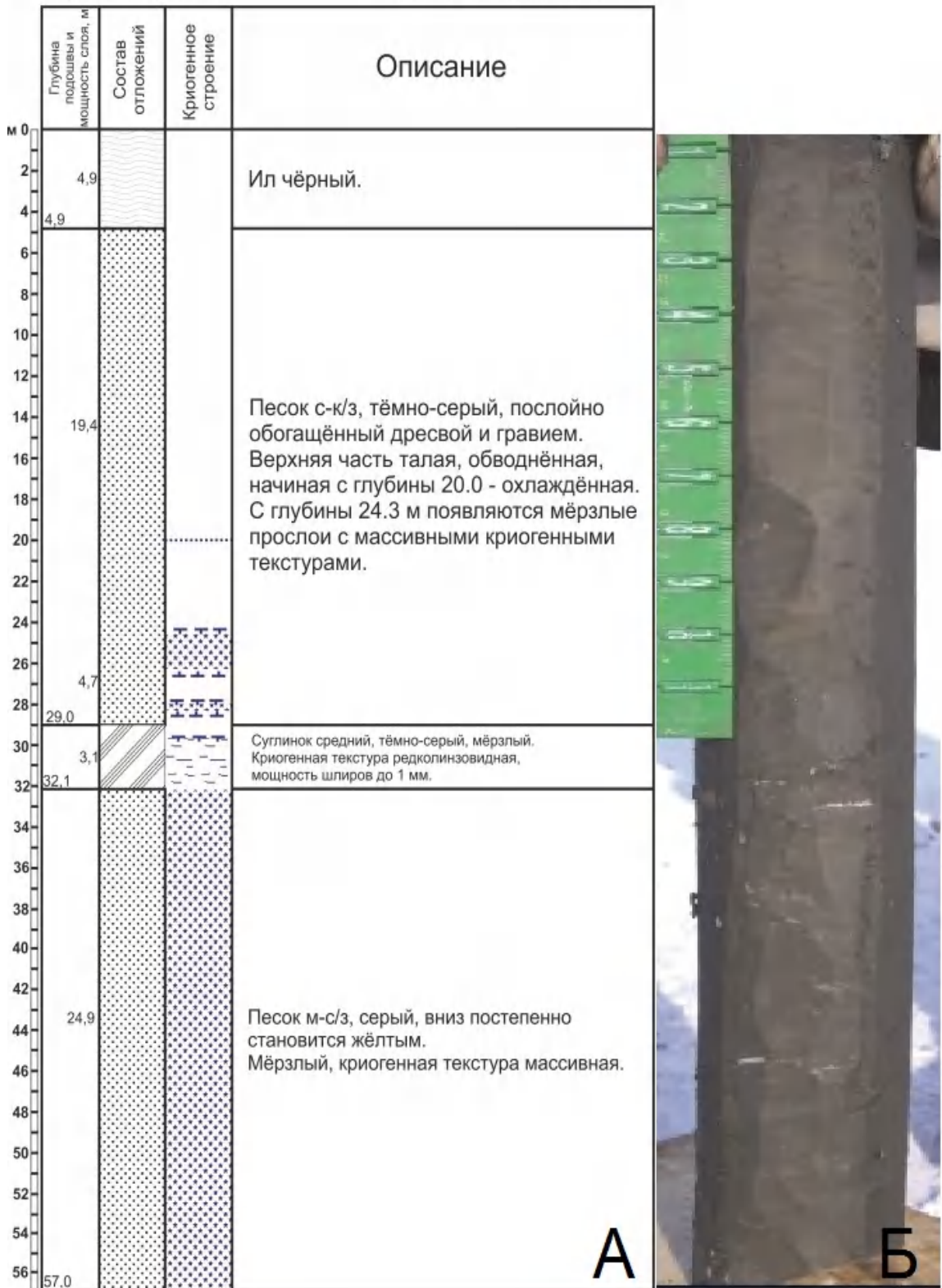


Рис. 4.33. Строение разреза отложений по результатам бурения скважины 4D-12 (А). Мёрзлый керн скважины 4D-12 из интервала 30–31 м (Б). Светлые горизонтальные линзы на керне скважины – шлиры льда, остальная часть керна имеет массивную криогенную текстуру

Вопрос о возможности картирования подошвы ММП требует дополнительного исследования, так как в настоящее время нет возможности ассоциировать глубину залегания подошвы высокоомного слоя с подошвой ММП, поскольку УЭС высокоомного слоя может быть проявлением существования высокоомного слоя (слоев) газогидратов. Тем не менее, ниже впервые документирована возможность использовать ЭМ зондирование для картирования кровли ММП.

После ЭМ зондирования в геометрическом центре петель антенны была пройдена скважина 4D-12 до глубины 57 м от поверхности дна (рис. 4.33 А). Глубина воды в точке бурения составила 2,5 м при толщине припайного льда примерно 2 м. С поверхности залежали немерзлые отложения (талые и охлажденные), а мерзлые породы были подняты начиная с глубины 24,3 м. Мерзлые породы были представлены твердомерзлыми песками с массивными криогенными текстурами. Отметим, что в интервале глубин 27–28 и 29–30 м были вскрыты немерзлые прослой суглинков в толще песков, ниже – слой суглинков мощностью около 2 м с редколинзовидной криогенной текстурой (рис. 4.33 Б), и далее, до забоя скважины – пески с массивными криогенными текстурами. Из этого следует, что метод ЗСБ в данной реализации пока не имеет возможности для выявления тонкой структуры (в масштабе метра) фазового перехода состояния осадков. Тем не менее, сопоставление результатов опережающего электромагнитного зондирования методом ЗСБ и бурения скважины 4D-12 показало хорошее совпадение глубины залегания кровли мерзлых пород: 25 м и 24,3 м соответственно.

Таким образом, по результатам электромагнитных зондирований на шельфе моря Лаптевых в районе губы Буор-Хая обнаружен высокоомный слой. Сравнение глубины залегания кровли высокоомного слоя геоэлектрического разреза и результатов бурения показало, что, по крайней мере, в верхней части разреза, существование высокоомного слоя связано с субмаринными мерзлыми породами, а положение кровли мерзлых пород определяется с высокой степенью точности. Это позволяет использовать ЭМ зондирование методом ЗСБ для

картирования кровли реликтовых мерзлых толщ на арктическом шельфе (Кошурников и др., 2016).

Продолжение работ методом ЗСБ на детальных участках шельфа моря Лаптевых позволило построить поверхность кровли многолетнемерзлых пород по геофизическим данным (рис. 4.34) и проследить детальное строение таликовой зоны (рис. 4.35).

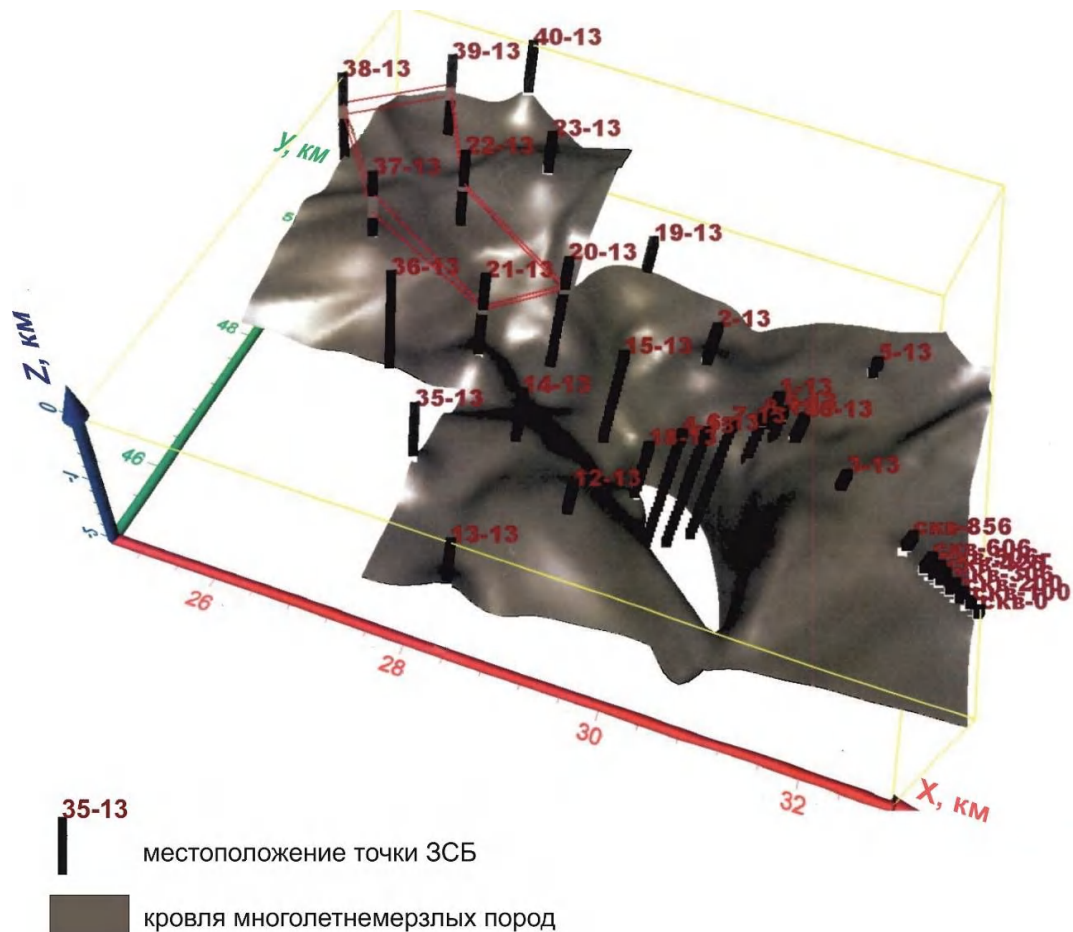


Рис. 4.34. 3D модель кровли ММП на участке работ (шельф моря Лаптевых, залив губы Буор-Хая).

В центре детальной площадки зафиксировано погружение кровли субмаринной криолитозоны.

На детальном участке были выполнены глубинные ЗСБ с припайного льда. Результаты этих работ позволили получить геоэлектрический разрез до глубин 1000 м (рис. 4.36).

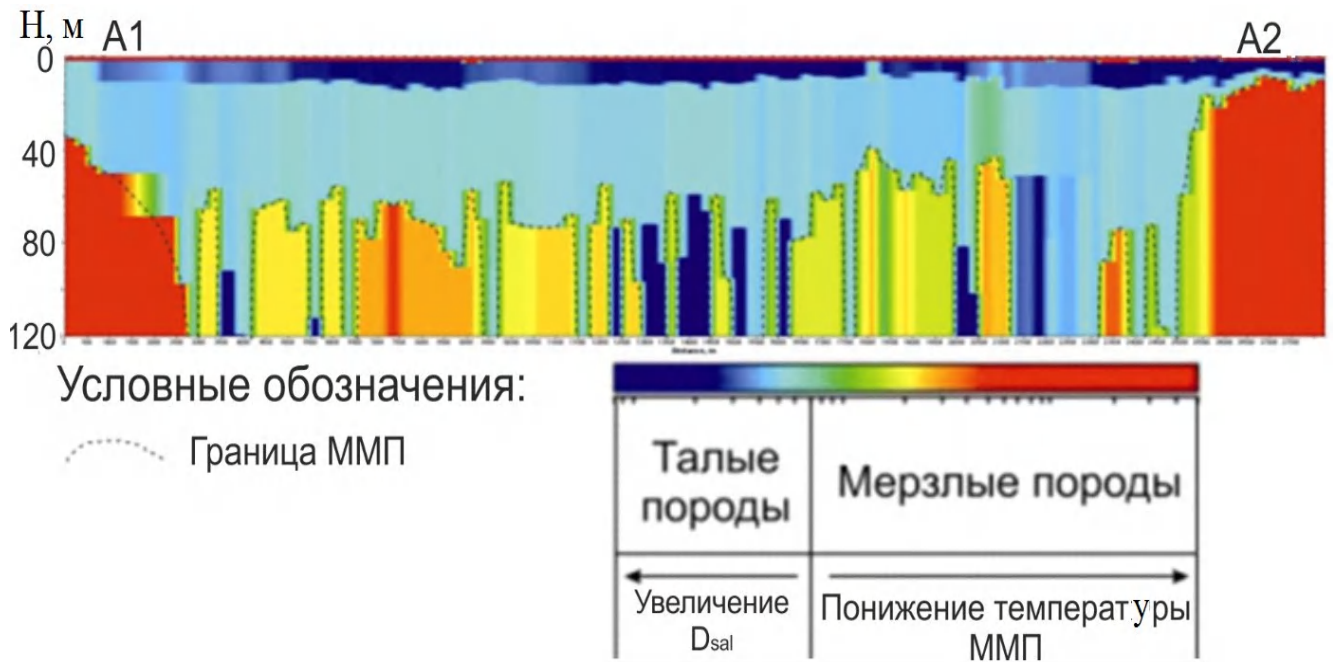


Рис. 4.35. Детальное строение таликовой зоны (шельф моря Лаптевых, залив губы Буор-Хая).

Интересной особенностью полученного разреза является зона пониженных сопротивлений, простирающаяся вдоль береговой линии. В этой зоне в период летних работ с акватории зафиксированы аномально высокие концентрации метана. Второй особенностью данного разреза является увеличение мощности высокоомного слоя в сторону шельфа. Если на береговом участке мощность высокоомного слоя составляет 700 м, то при движении на север до глубин акватории 10 м мощность высокоомного слоя составляет 1000 м (рис. 4.36).

Детальные 3D геофизические исследования в заливе губы Буор-Хая выявили погруженные участки сложной формы в кровле высокоомного слоя, сквозные нарушения в высокоомном слое, к которым приурочены выходы подмерзлотных подземных вод на шельфе моря Лаптевых (Charkin et. al., 2017). Аналогичные результаты были получены в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых, где по геофизическим данным, заверенным бурением с припайного льда, обнаружены сквозные таликовые зоны в субмаринных многолетнемерзлых породах (Koshurnikov et. al., 2020).

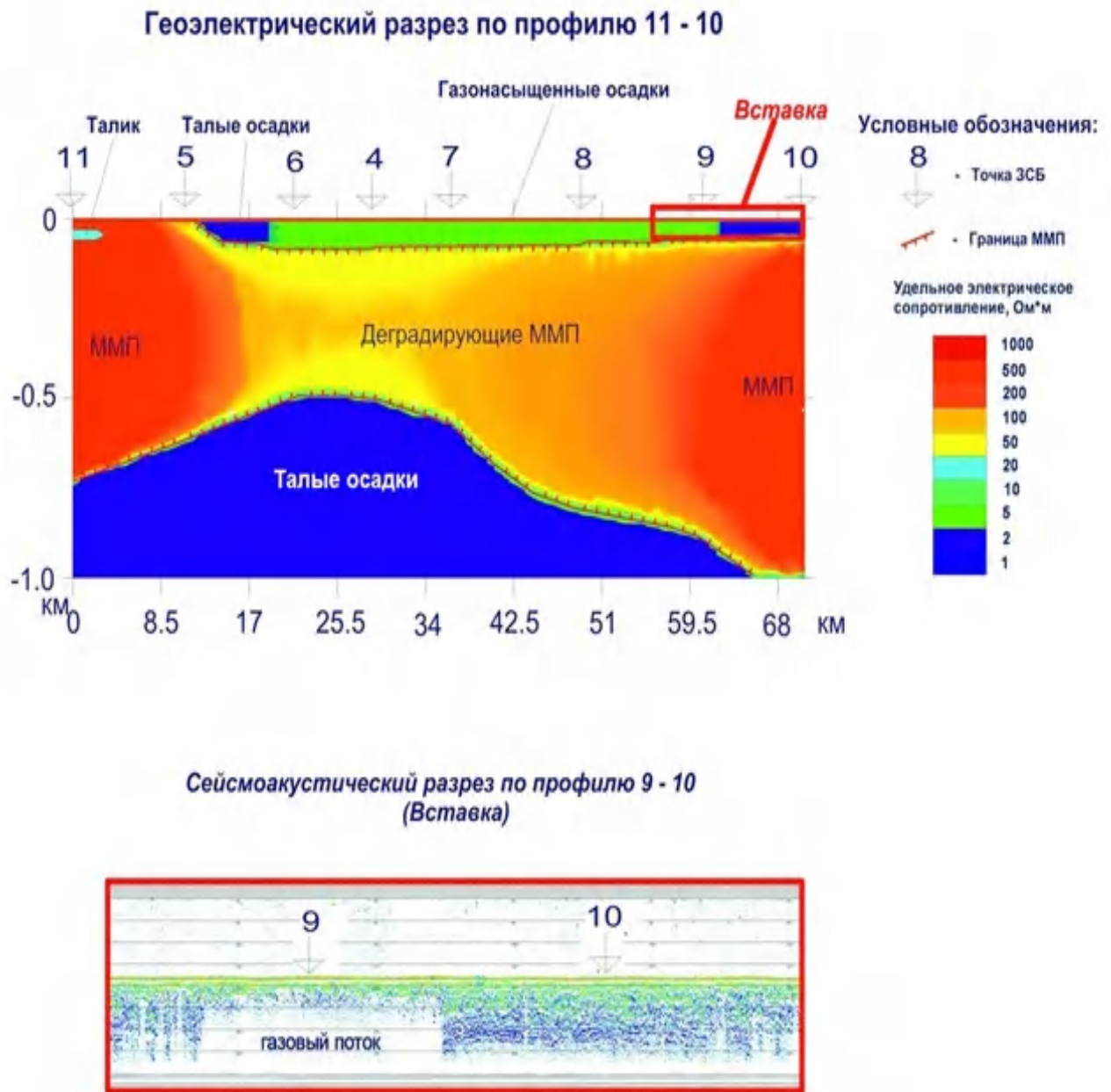


Рис. 4.36. Сравнение результатов электромагнитных зондирований и сейсмоакустического профилирования для шельфа моря Лаптевых.

Многочисленные примеры результаты буровых и термометрических работ на арктическом шельфе и в транзитной зоне суша-шельф, описанные выше, позволяют связать природу высокоомного слоя (как минимум в его верхней части) с субмаринными многолетнемерзлыми породами на арктическом шельфе. Тогда, анализируя геоэлектрические особенности разрезов и детальных участков работ на арктическом шельфе, возможно сформулировать основные

закономерности распространения субмаринных многолетнемерзлых пород (рис. 4.36).

4.2. Сравнение результатов геофизических исследований и теплового моделирования на шельфе

Геокриолого-геофизический анализ тепловых моделей для шельфа морей Лаптевых, Карского и Печорского показал следующее. Мощности многолетнемерзлых пород по данным тепловых расчетов, выполненных в главе 3, не превышают 600–700 м, тогда как мощности высокоомных слоев достигают 1000 м на шельфе моря Лаптевых. Эти новые данные позволили сделать заключение, что подошва высокоомного слоя в геоэлектрических моделях не всегда связана с подошвой многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе (рис. 4.37).

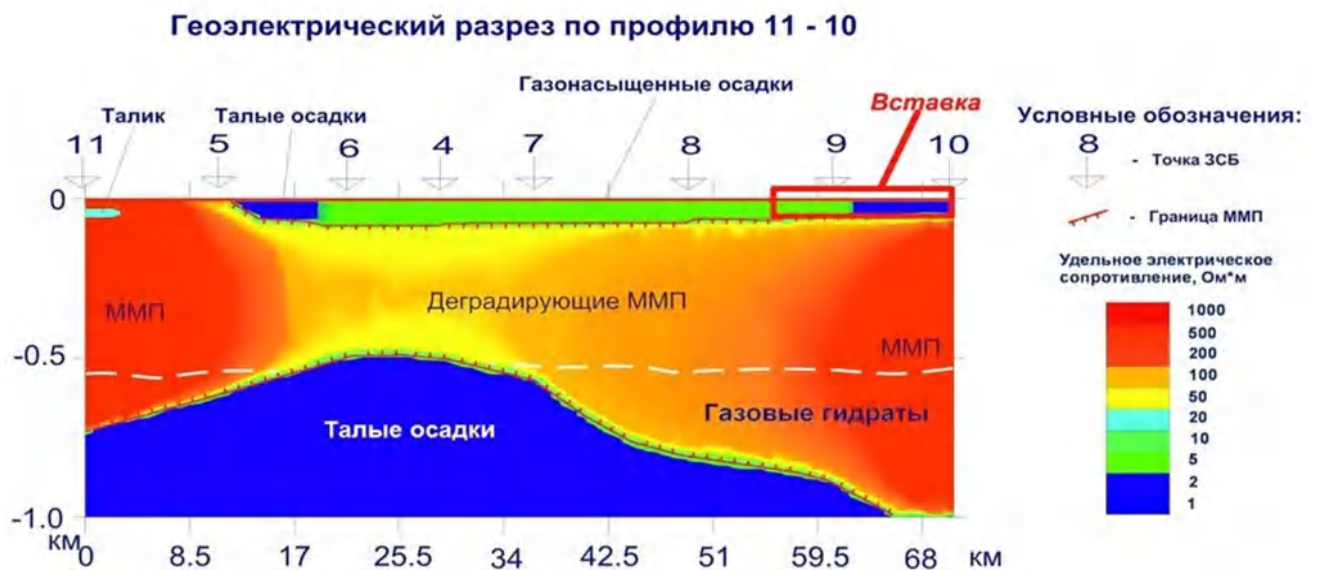


Рис. 4.37. Результаты сопоставления данных электроразведки и теплового моделирования.

На рисунке 4.37 видно, что для части профиля нижняя граница высокоомного слоя залегает выше подошвы ММП по результатам моделирования. На таких участках мы можем интерпретировать высокоомный слой как многолетнемерзлые породы. На участках профиля, где нижняя граница

высокоомного слоя залегает ниже подошвы ММП по результатам теплового моделирования, природа высокоомного слоя не ясна. Соответственно, возникает вопрос о природе нижней границы высокоомного слоя. Одним из возможных объяснений продолжения высокоомного слоя вглубь является существование под многолетнемерзлыми породами толщ газогидратов, известных на канадском арктическом шельфе по данным сейсморазведки по эффекту «двойного дна» (Hunter et al., 1976, 1978; Hunter, MacAulay et al., 1982). Газогидраты были подняты из нескольких скважин и подтверждены по каротажу в нескольких десятках скважин на шельфе Баренцева, Карского, Чукотского, Бофорта морей (Национальный атлас Арктики, Роскартография, 2017), на Бованенковском месторождении (Строение и свойства..., 2007). Для части профилей, где подошва высокоомного слоя совпадает с подошвой многолетнемерзлых пород по результатам моделирования, автор интерпретирует высокоомный слой как многолетнемерзлые породы. На участках профиля, где подошва высокоомного слоя залегает ниже подошвы многолетнемерзлых пород по результатам теплового моделирования, природа нижних горизонтов высокоомного слоя не вполне ясна. Можно предполагать, что высокоомный слой на больших глубинах связан с наличием газовых гидратов. Близкие значения удельных электрических сопротивлений для многолетнемерзлых пород и газовых гидратов пока не позволяют технологиям электроразведки зафиксировать эту границу. По некоторым данным (Мельников, Спесивцев, 1995) зона стабильности газовых гидратов начинается с глубин 200 м для Карского моря, а по данным Е.М. Чувилина, Г.С. Типенко, И.А. Комарова с 500 м для моря Лаптевых (Типенко et al., 1990; Романовский и др., 1988; Романовский и др., 1990; Комаров, 2003). Таким образом, в результате электромагнитных исследований на шельфе морей Российской Арктики можно, по-видимому, разделить кровлю многолетнемерзлых пород и подошву многолетнемерзлых пород или газогидратов. Эту толщу, включающую как мерзлые породы, так и газогидраты, и поэтому имеющую большую мощность, чем собственно многолетнемерзлая толща, предлагается называть криогенногидратной толщей (рис.4.37). Под

криогенногидратной толщей понимается толща пород, экспериментально зафиксированная на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта морей методами электроразведки, характеризующаяся удельными электрическими сопротивлениями 4–20 Ом·м, кровля которой связана с многолетнемерзлыми породами по данным бурения, а подошва с многолетнемерзлыми породами по результатам теплового моделирования или газогидратами по известным данным (Гинзбург и др., 1994) и распространении зон стабильности газовых гидратов (рис. 4.38). Выделение данной толщи как единого объекта оправдано с точки зрения общих физических свойств многолетнемерзлых пород и газовых гидратов. Поскольку будущие исследования шельфа будут, по-видимому, в основном выполняться с помощью дистанционных геофизических методов, выделение криогенногидратной толщи приобретает особую актуальность.



Рис. 4.38 Газогидраты Северного Ледовитого океана (по Г.Д. Гинзбургу и В.А.Соловьеву, 1994)

Криогенногидратная толща нередко включает участки протяженностью до 100 км и более, где удельные электрические сопротивления понижаются, но не достигают удельных электрических сопротивлений талых пород. На этих участках зафиксированы аномально высокие содержания метана по данным (Shakhova et al., 2017) и вертикальные восходящие потоки газов в толще пород и водной толще по данным сейсмоакустики. Предлагается называть толщу с удельными электрическими сопротивлениями 2–15 Ом·м по данным электроразведки, для которой в поверхностных слоях характерны аномальные скопления метана – предположительно высокотемпературной (т.е. физические свойства которой отличаются от фоновых) криогенногидратной толщей (рис.4.37). Огромное содержание метана, по изотопному составу отличающегося от приповерхностного метана в воздухе, в воде, в верхней части разреза, характерное для этих участков позволяет предположить частичную деградацию многолетнемерзлых пород в этих зонах и движение газов через многолетнемерзлые породы (Miller et al., 2016; Miller et al., 2017).

Выводы:

1. Выполнена обработка и интерпретация электромагнитных данных методом ЗСБ для изучения субмаринных многолетнемерзлогидратных толщ на геотраверсах и детальными площадками шельфа Печорского, Карского, Лаптевых, Чукотского морей общей протяженностью более 12000 км. В результате построено более 240000 геоэлектрических моделей. Выполнена обработка полученных геофизических данных и построены региональные 2D геокриологические модели через шельфы Печорского, Карского, Лаптевых морей. Построены детальные 3D геокриологические модели на шельфе Карского, Лаптевых, Чукотского морей.
2. Доказана перспективность электроразведки методом ЧЗ для изучения многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суша-шельф.
3. Показана эффективность комплекса буровых работ, математического моделирования, лабораторных испытаний и полевой термометрии для оценки строения криолитозоны шельфа.

4. На шельфе морей Российской Арктики обнаружен горизонт высокого сопротивления (высокоомный слой), подтвержденный буровыми работами и термометрическими наблюдениями, кровля которого связана с многолетнемерзлыми породами на шельфе Карского моря (прямальский участок, глубины моря до 100 м) и моря Лаптевых (залив губы Буор-Хая, Хатангский залив, глубины моря до 10 м).

5. По результатам теплового моделирования мощность современной многолетнемерзлой толщи составляет 100–250 м для западного сектора и 450–600 м для восточного сектора морей Российской Арктики. Мощность высокоомного слоя по геофизическим данным составила 350–380 м для западного сектора и 800–1100 м для восточного сектора морей Российской Арктики. Предполагается существование многолетнемерзлогидратной толщи на акватории шельфа морей Российской Арктики. В заливе губы Буор-Хая шельфа моря Лаптевых многолетнемерзлогидратная толща существует до глубин 900–1170 м от кровли донных отложений.

Глава 5. Районирование многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе

Обобщение результатов исследований позволяет сформулировать следующие закономерности распространения многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе.

Для западной части Печорского моря (рис. 5.1), от п-ва Канин до о-ва Колгуев, характерно островное проявление многолетнемерзлых пород в разрезе. Отдельные острова имеют простираие не более 1–5 км вдоль профиля, тогда как зоны отсутствия многолетнемерзлых пород составляют 10–50 км. Далее, на восток, многолетнемерзлая толща прерывается на расстоянии 40–50 км в районе Поморского пролива и вновь появляется в районе п-ва Русский Заворот, и далее продолжается с увеличением сплошности до пролива Югорский Шар. Для



Рис. 5.1. Линия Печорского профиля.

западной части Печорского моря характерно массивно-островное проявление многолетнемерзлых пород в разрезе. Острова имеют простираие от 10 до 50 км вдоль профиля, а зоны отсутствия многолетнемерзлых пород составляют 1–7 км. В целом кровля многолетнемерзлой толщи находится на глубине от 80 м от

кровли донных отложений, а ее мощность достигает 300 м (рис. 5.2). Для восточной части Печорского моря характерно массивно-островное проявление многолетнемерзлых пород в разрезе. Острова имеют простирание от 10 до 50 км вдоль профиля, а зоны отсутствия многолетнемерзлых пород составляют 1–7 км. В целом кровля многолетнемерзлой толщи находится на глубине от 80 м от кровли донных отложений, а ее мощность достигает 300 м (рис. 5.2).

На шельфе Карского (рис. 5.3) моря кровля многолетнемерзлых пород фиксируется на глубинах от 50–100 м, а подошва на 300–380 м от кровли донных отложений. Для шельфа Карского моря характерно прерывистое распространение многолетнемерзлой толщи. На протяжении 100–200 км участков профиля, где толща многолетнемерзлых пород непрерывна, встречаются участки профиля длиной 10–50 м, где они отсутствуют. Измерения показали, что преобладающий уровень удельных электрических сопротивлений на шельфе Карского моря для толщ многолетнемерзлых пород ниже и составляет около 7–10 Ом·м, чем на шельфе Печорского – 15–20 Ом·м (рис. 5.4). В целом, на шельфе Карского моря многолетнемерзлая толща имеют более низкий уровень удельных сопротивлений, более представительна, имеет большую сплошность, отсутствует полностью в западной части и частично – в восточной части участка профиля, пересекающего Байдарацкую губу. Низкий уровень удельных электрических сопротивлений характеризует состояние многолетнемерзлой толщи. По результатам буровых работ, лабораторных и термометрических исследований широко распространены вломерзлые породы (5.4).

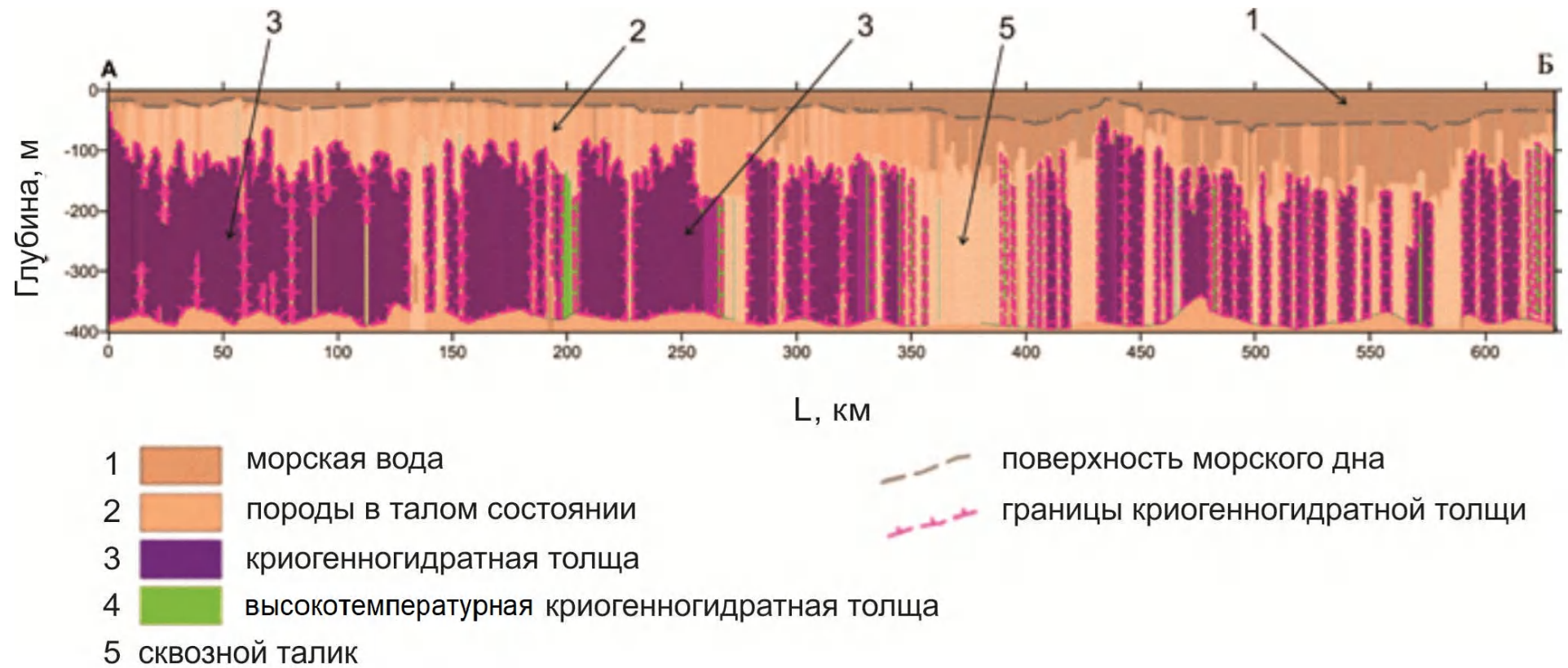


Рис. 5.2. 2D геокриологическая модель шельфа Печорского моря.



Рис. 5.3. Линия Карского профиля.

Отметим, что совместный анализ тепловых и геоэлектрических моделей на шельфах Печорского и Карского морей не дает оснований предполагать на западном секторе морей Российской Арктики мощных толщ газовых гидратов. Так, по данным тепловых расчетов подошва многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается – на глубинах 150–350 м, а по геофизическим данным подошва криогенногидратной толщи – в пределах 300–370 м от кровли донных отложений. Подошва многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря располагается на глубинах 200–350 м по данным тепловых расчетов, а подошва криогенногидратной толщи – в пределах 300–380 м от кровли донных отложений по геофизическим данным. Локальное присутствие газовых гидратов вдоль геофизических профилей возможно по данным Г.Д. Гинзбурга (Гинзбург и др., 1994).

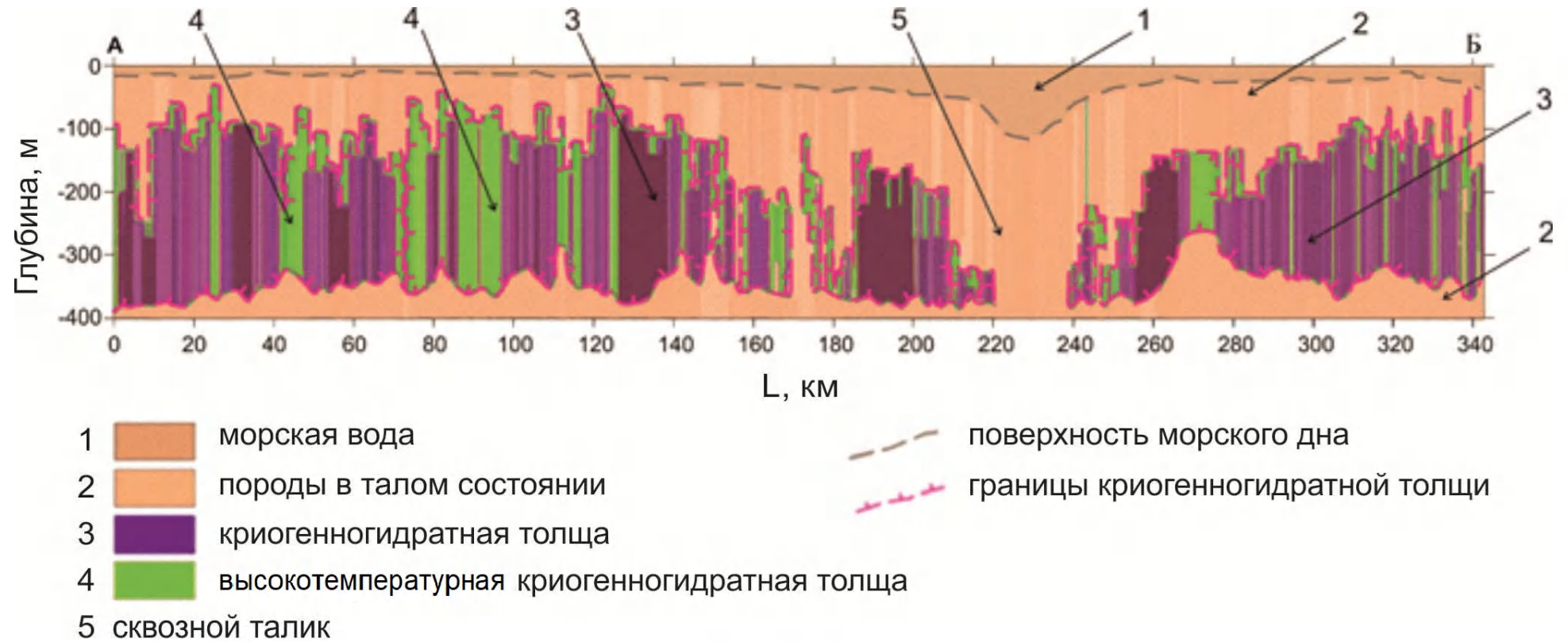


Рис. 5.4. 2D геокриологическая модель шельфа Карского моря.

Линия Карского профиля (рис. 5.3) длиной 342 км тянется с севера на юг от мыса Бурунный, вдоль о-вов Шараповы Кошки и прол. Мутный Шар, затем, не доходя до мыса Белужий Нос п-ова Ямал, линия поворачивает на запад и тянется до прол. Югорский Шар. Мощность криолитозоны составляет от 0 до 300 м. На выходе Байдарацкой губы в Карское море криолитозона отсутствует. Кровля криолитозоны располагается на глубинах 20–300 м, подошва на глубинах 300–350 м от кровли донных отложений (рис. 5.4).



Рис. 5.5. Линия геофизического профиля на шельфе моря Лаптевых.

На шельфе моря Лаптевых (рис. 5.5) зафиксирована наиболее мощная и сплошная криогенногидратная толща. Здесь возможны мощные газогидратные толщи, как по данным Г.Д. Гинзбурга (Гинзбург и др., 1994), так и по данным автора. Подошва многолетнемерзлых пород по данным тепловых расчетов определена на глубинах до 300–600 м, а подошва высокоомного слоя на – глубинах до 1000 м от кровли донных отложений по данным геофизики. Для криогенногидратной толщи на шельфе моря Лаптевых характерны высокие удельные электрические сопротивления 5–20 Ом·м. (из-за более низких температур) и сплошное распространение от пролива Вилькицкого до пос. Тикси.

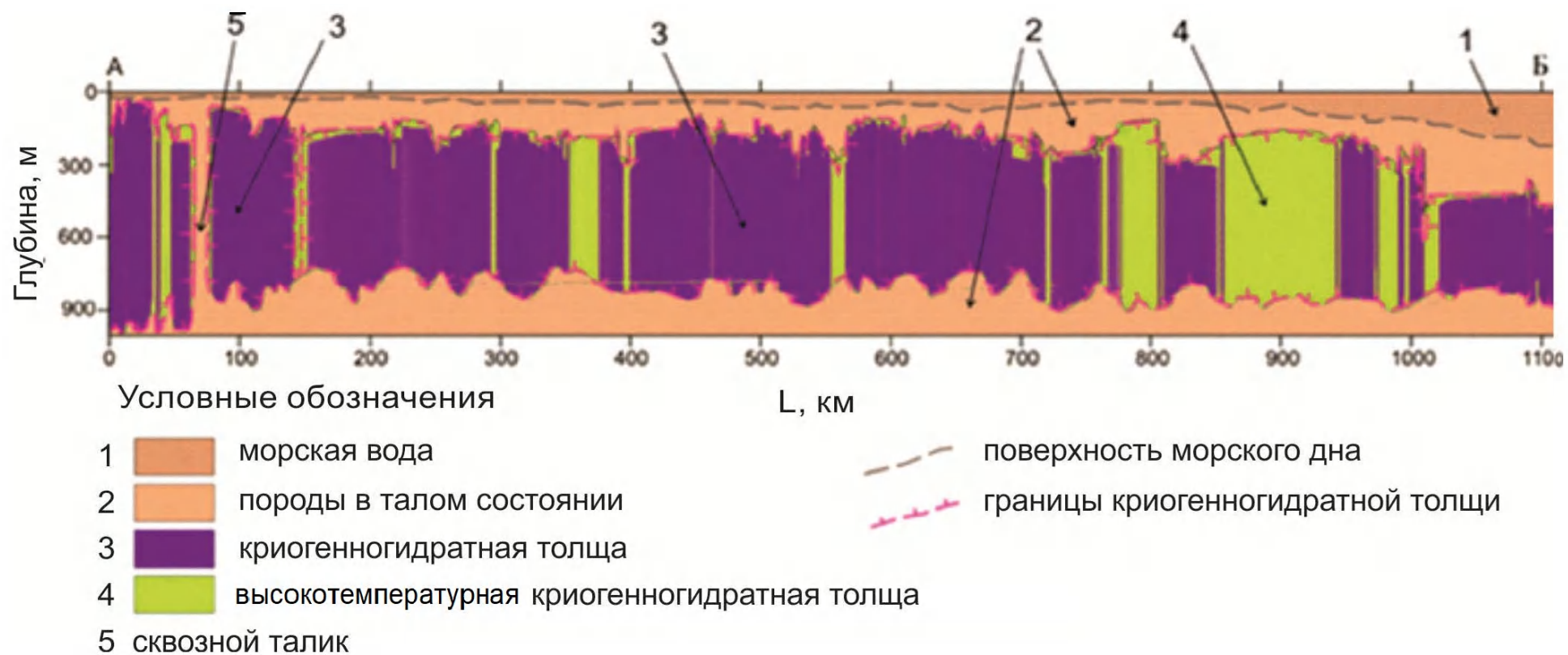


Рис. 5.6. 2D геокриологическая модель шельфа моря Лаптевых.

Исключением является относительно узкий (до 10 км) участок в районе губы Буор-Хая, где криогенногидратная толща прерывается. В районе губы Буор-Хая мощность толщи составляет 700–800 м. Перед проливом Вилькицкого мощность криогенногидратной толщи сокращается до 300–400 м. Подошва криогенногидратной толщи в районе Тикси отмечена на глубинах 950 м, далее погружается до 1170 м и перед проливом Вилькицкого поднимается до 600–700 м от кровли донных отложений. Важной особенностью распределения удельных электрических сопротивлений вдоль толщи является существование протяженных участков вдоль профиля от 5 до 100 км, где удельные электрические сопротивления уменьшаются до 5–6 Ом·м. Интересной особенностью полученного разреза является зона пониженных сопротивлений, простирающаяся вдоль береговой линии. В этой зоне в период летних работ с акватории зафиксированы аномально высокие концентрации метана. Предполагается, что в данной зоне идет активная дегградация криогенногидратной толщи в настоящее время. Таких зон с пониженным удельным электрическим сопротивлением относительного фонового для толщи выделено несколько, в основном на шельфе восточного сектора морей Российской Арктики. Вероятно, здесь присутствуют высокотемпературные криогенногидратные толщи и, возможно, идет их активная дегградация (рис. 5.2, 5.4, 5.6). Обобщения собранного фактологического геокриолого-геофизического материала на шельфе морей Российской Арктики (рис. 5.7) и новые представления о распространении многолетнемерзлых толщ позволяет предложить следующую типизацию многолетнемерзлых пород арктического шельфа (рис. 5.8). В ней учитываются 3 уровня по условиям формирования многолетнемерзлых пород: геолого-географические условия (глубина акватории, влияние теплого и пресного стока рек, тектонический режим); изменение радиационно-теплого баланса с широтой; изменение атмосферных условий с долготой.

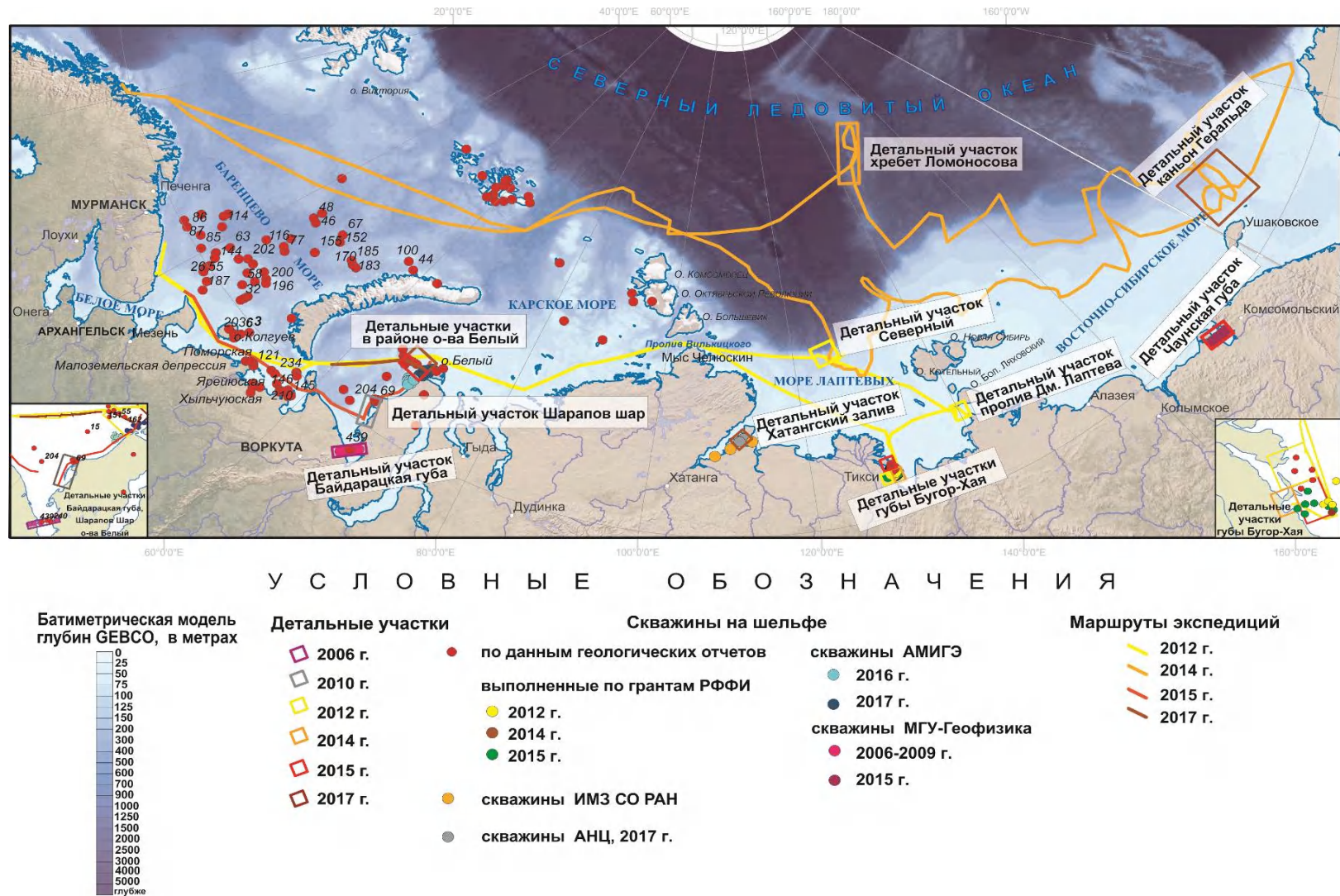


Рис. 5.7. Карта фактического материала. Контурами разного цвета указаны участки работ автора в разное время. Линии разного цвета — геофизические профили автора разных лет.

Выполненная типизация многолетнемерзлых пород шельфа позволила выделить 11 характерных особенностей для различных районов шельфа, полученных как экспериментальными, так и расчетными методами:

- глубины моря в м;
- время формирования в тыс. лет;
- время деградации в тыс. лет;
- распространение на шельфе арктических морей;
- литологическая характеристика;
- удельные электрические сопротивления в Ом·м;
- сплошность (от островного до прерывистого распространения);
- глубины кровли в м;
- глубины подошвы в м;
- размеры зон непрерывного распространения в км;
- размеры зон сквозной деградации в км.

Типизация многолетнемерзлых пород арктического шельфа позволила построить схему распространения криогенногидратных толщ на арктическом шельфе (рис. 5.9). Для построения схемы использовались региональные геокриологические 2D модели шельфа (рис. 5.2, 5.4, 5.6), построенные на основе геокриолого-геофизического анализа, описанного в Главе 4, детальные 3D модели на шельфе Карского и Лаптевых морей, результаты буровых и термометрических исследований на опорных участках. Интерполяция границ

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ		МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ТОЛЩИ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА РФ																
Регион, местоположение и время промерзания	ТИП	Непродолжительного промерзания <i>Короткое промерзание и дittleмьяя деградация сверху</i>			Длительного промерзания <i>Промерзание и дittleмьяя деградация сверху</i>			Продолжительного промерзания <i>Продолжительное промерзание и короткая деградация сверху</i>			На участках влияния речного стока <i>Промерзание и дittleмьяя деградация на участках оттаивания и оттаивания морских вод за счет речных вод</i>		На активных тектонических участках <i>Промерзание и дittleмьяя деградация снизу за счет повышенного потока тепла за морь</i>					
		А	Б	В	Г	Д												
Секторная зональность атмосферного влияния	ПОДТИП	Сильного влияния атлантических циклонов	Умеренного влияния атлантических циклонов	Умеренного влияния атлантических циклонов	Влияния сибирского антициклона	Влияния тихоокеанских циклонов	Влияния сибирского антициклона	Сильного влияния атлантических циклонов	Умеренного влияния атлантических циклонов	Влияния сибирского антициклона	Сильного влияния атлантических циклонов	Умеренного влияния атлантических циклонов	Влияния сибирского антициклона	Влияния тихоокеанских циклонов				
		<i>Высокотемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -10 до -15 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>	<i>Низкотемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -20 до -30 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -20 до -30 °С</i>	<i>Низкотемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -10 до -15 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>	<i>Низкотемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -20 до -30 °С</i>	<i>Высокотемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -10 до -15 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>	<i>Низкотемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -20 до -30 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>	<i>Среднетемпературное промерзание пород шельфа при средне-содовых температурах от -15 до -20 °С</i>			
Радиационно-тепловой баланс	КЛАСС	Суб-арктического промерзания	Суб-арктического промерзания	Суб-арктического промерзания	Арктического промерзания	Высокоширотного арктического промерзания	Суб-арктического промерзания	Арктического промерзания	Арктического промерзания	Высокоширотного арктического промерзания	Суб-арктического промерзания	Суб-арктического промерзания	Арктического промерзания	Суб-арктического промерзания	Арктического промерзания	Арктического промерзания	Высокоширотного арктического промерзания	Арктического промерзания
		Глубины моря, м	100-50	50-20	50-20	100-50	Менее 20	60	80	110	60	80	110	100-50	50-20	Менее 20	50-20	100-50
ХАРАКТЕРИСТИКА КЛАССА		Время формирования, тыс. лет	60	80	110	60	80	110	60	80	110	60	80	110	60	80	110	
		Время деградации сверху, тыс. лет	10	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	
		Распространение	Западная часть Печорского моря	Восточная часть Печорского моря	Западная часть Карского моря	Центральная часть Карского моря	Восточная часть Карского моря	Чукотское море	Лаптевых, Восточно-Сибирское моря	Печорское море (Печорская губа)	Карское море (Байдарацкая, Обская губы, Енисейский зал.)	Лаптевых (Хатангский, Буор-Хая, Янский зал.), Восточно-Сибирское (Уларовская губа, Кольмский зал.) моря	Западная часть Печорского моря	Центральная часть Карского моря	Лаптевых моря	Чукотское море		
		Литология	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Пылевато-супесч. породы	Пылевато-супесч. породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	Суглинисто-супесчаные породы	
		УЭС, Ом*м	3-25	3-25	5-30	5-30	10-30	10-30	10-30	10-30	10-30	10-30	3-7	3-7	5-10	5-10		
		Сплошность	Островное	Массивно-островное	Прерывистое	Прерывистое	Островное	Островное	Островное	Островное	Островное	Островное	Островное	Островное	Островное	Островное		
		Области простирания, км	1-5	150-350	1-5	150-350	1-5	150-350	1-5	150-350	1-5	150-350	1-5	150-350	1-5	150-350		
		Глубины кровли, м	30-150	24-150	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7	1-7		
		Глубины подошвы, м	320-350	320-350	300-660	300-660	300-600	300-600	300-600	300-600	300-600	300-600	300-600	300-600	300-600			
		Сквозная деградация многолетнемерзлых пород шельфа, простирание, км	10-20	10-20	5-10	5-10	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20			

Сингенетические
 Эпигенетические
 Повторного промерзания
 ГЕНЕЗИС

Рис. 5.8 Типизация многолетнемерзлых толщ арктического шельфа РФ.

мерзлых пород, гидратных (в том числе высокотемпературных) толщ выполнена с учетом результатов теплового моделирования, границ и природных особенностей опорных районов, значений удельных электрических сопротивлений, полученных при исследованиях. При построении схемы учитывалось, что мерзлые породы характеризуются значениями удельных электрических сопротивлений 15 и более Ом·м, высокотемпературные мерзлые породы от 2,5 до 15 Ом·м, в зависимости от района исследований, солёности отложений и их литологического состава. Подтверждение удельных электрических сопротивлений для высокотемпературных газонасыщенных многолетнемерзлых пород выполнено по экспериментальным измерениям метана в воздухе, акватории и породах арктического шельфа автора и коллег (Shakhova et al., 2017; Хименков и др., 2020, 2021). Карта фактического материала всех имеющихся данных, по которым построена схема, приведена в диссертации. Геокриолого-геофизические данные были систематизированы на актуальной геодезической основе GEBCO (The GEBCO..., 2017) (рис. 5.9). Новые результаты позволили уточнить и дополнить представления о состоянии многолетнемерзлых толщ, известные ранее (Романовский, 1993; Романовский и др, 1997). Эти результаты свидетельствуют о более широком распространении мерзлых пород, меньшим распространением пластично-мерзлых пород и существованием в настоящее время обширных зон (до 100 км в поперечнике) высокотемпературных, газонасыщенных, и возможно, деградирующих многолетнемерзлых пород на шельфе морей восточной Арктики. Аналогичные зоны возможной деградации многолетнемерзлых пород обнаружены и на шельфе морей западной Арктики (рис. 5.9).

На схеме распространения криогенногидратных толщ указаны районы, где результаты автора отличаются от данных других исследователей. Сравнение новых данных, например, о мощности многолетнемерзлых толщ вдоль геофизических профилей и значений мощности многолетнемерзлых толщ, указанных на геокриологической карте кафедры геокриологии МГУ, позволило уточнить мощность многолетнемерзлых толщ на схеме распространения

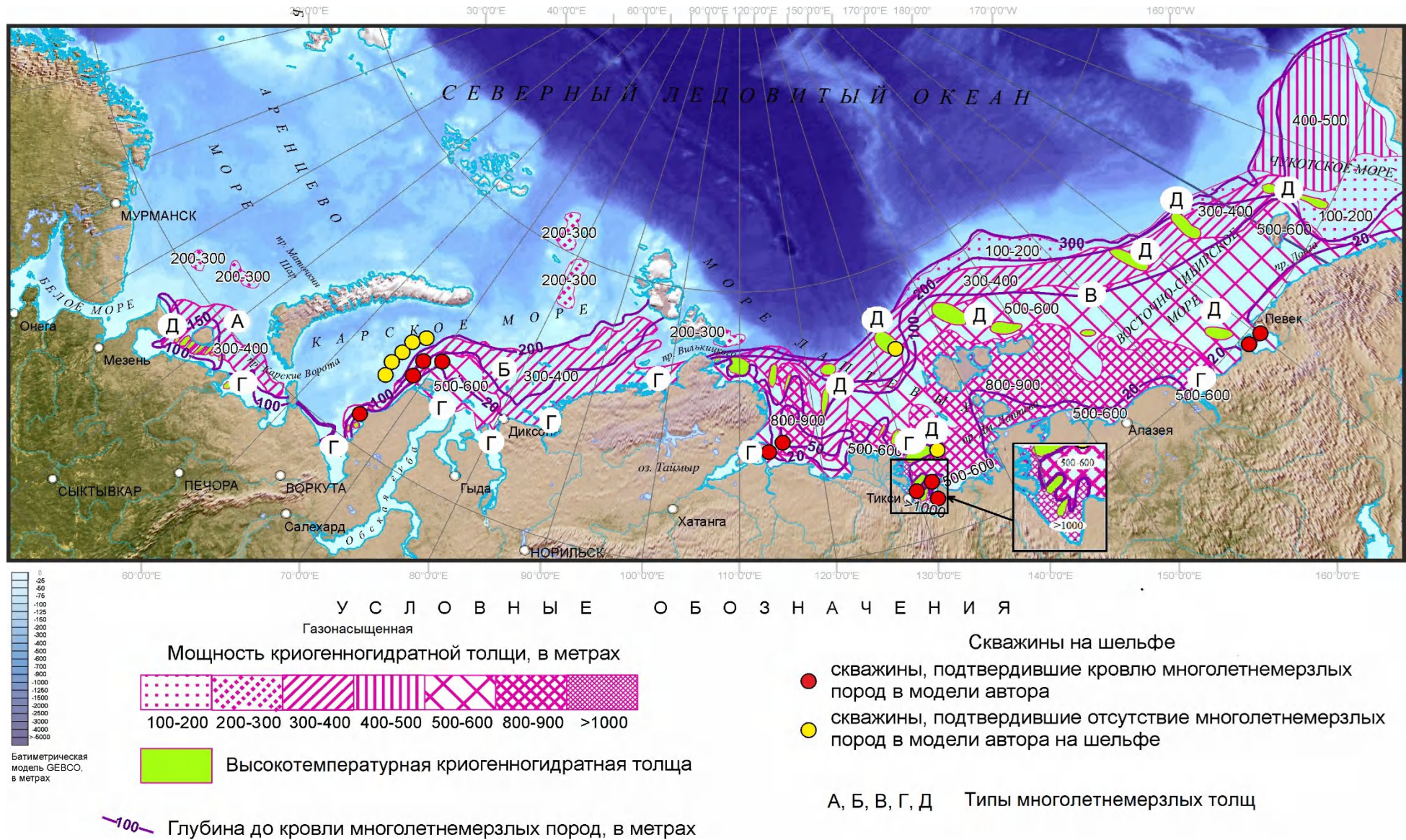


Рис.5.9. Типы криогенногидратных толщ и их распространение на шельфе морей Российской Арктики.

многолетнемерзлых и гидратных толщ на шельфе (рис. 5.9). В исследованиях М.А. Холмянского (Холмянский и др., 2017) показана граница между многолетнемерзлыми и охлажденными породами на приямальском шельфе. Новые данные позволили уточнить границу между многолетнемерзлыми и охлажденными породами на 300 км в юго-восточном направлении на приямальском шельфе. По данным автора, для шельфа Карского моря в районе о-ва Вайгач и пролива Югорский Шар характерно также присутствие преимущественно многолетнемерзлых, а не охлажденных пород (рис. 5.9). В работе Е.В. Перловой (Перлова и др., 2017) на шельфе Карского моря к западу от п-ва Ямал, а также в транзитной зоне суша-шельф Крузенштернского месторождения показано островное распространение многолетнемерзлых пород. Экспериментальные исследования автора показали, что для этого участка приямальского шельфа характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород (рис. 5.9). По результатам анализа сейсмоакустических данных (С.И. Рокос) многолетнемерзлые породы отсутствуют на шельфе Печорского моря, в южной части Карского моря. Согласно экспериментальным данным автора, эти участки шельфа характеризуются прерывистым распространением многолетнемерзлых пород. Данные автора не согласуются с картой, построенной по моделированию (Гаврилов и др., 2019), в западной части шельфа Карского моря. Своеобразным многолетним полигоном для изучения вертикальной и горизонтальной динамики многолетнемерзлых пород во времени на шельфе моря Лаптевых является траверс мыс Муостах п-ова Быковского – о-в Муостах. Первые исследования были выполнены здесь Н.Ф. Григорьевым и Е.Н. Молочушкиным в 1969 г. Автором были учтены и дополнены эти исследования, позволившие оценить динамику деградации многолетнемерзлых толщ на шельфе моря Лаптевых в заливе губы Буор-Хая, составившую 14–18 см/год по глубине и 10–16 см/год по простиранию за последние 30 лет (Shakhova et al., 2017) и на шельфе Карского моря до 1,9 м в год в районе Байдарацкой губы за последние 15 лет (Isaev et al., 2019).

Выводы:

1. Установлено, что для западной части Печорского моря характерно островное распространение многолетнемерзлых пород. Отдельные острова многолетнемерзлых пород имеют размеры более 1–5 км по горизонтали и 150–300 м по вертикали. Для восточной части Печорского профиля характерно массивно-островное распространение многолетнемерзлых пород. Отдельные острова многолетнемерзлых пород имеют размеры до 10–50 км и 200–300 м по вертикали. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается на глубинах от 24 до 150 м, подошва многолетнемерзлых пород – на глубинах от 320 до 350 м, а подошва криогенногидратной толщи – в пределах 300–370 м от кровли донных отложений.
2. Установлено, что для шельфа Карского моря характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород с зонами их сквозной деградации протяженностью от 10 до 20 км. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря располагается на глубинах от 1,7 до 160 м, подошва многолетнемерзлых пород – на глубинах 320–350 м, а подошва криогенногидратной толщи – в пределах 300–380 м от кровли донных отложений. Многолетнемерзлые породы в транзитной зоне суша-шельф имеют двухслойное строение, что связано с условиями их формирования и промерзанием в условиях мелководья. Мощность современных «козырьков» многолетнемерзлых пород составляет не более 10 м, а простирание – до 100–200 м.
3. Установлено, что для шельфа моря Лаптевых характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород с зонами их сквозной деградации протяженностью до 10 км. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых располагается на глубинах от 2 до 90 м, подошва многолетнемерзлых пород – в пределах 300–660 м, а подошва криогенногидратной толщи – в пределах 660–1170 м от кровли донных отложений.

4. В многолетнемерзлых толщах на арктическом шельфе обнаружены зоны высокотемпературных многолетнемерзлых пород, по-видимому, газонасыщенных, имеющих простирание на шельфе Карского моря 10–50 км, на шельфе моря Лаптевых – 10–110 км, на шельфе Восточно-Сибирского моря – 20–130 км, на шельфе Чукотского моря – 10–70 км.
5. Предложена типизация многолетнемерзлых пород арктического шельфа РФ.
6. Составлена схема типов криогенногидратных толщ и их распространения на шельфе морей Российской Арктики, отличающаяся распространением, состоянием, строением криолитозоны, с изменением глубин залегания кровли, подошвы многолетнемерзлых и гидратных толщ, а также выделением зон современной деградации многолетнемерзлых толщ от известных ранее геокриологических карт.
7. Получены новые данные о динамике многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе в последние десятилетия. Деградация субмаринных многолетнемерзлых толщ по глубине составляет 14–18 см/год, по простиранию 10–16 см/год.

Заключение

Новые представления о распространении многолетнемерзлых толщ на шельфе морей Российской Арктики – основной результат исследований. Экспедиционные исследования на протяжении более 18 лет на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта морей, обеспечившие производство более 12000 километров электромагнитной съемки, моделирование более чем 240000 1D геоэлектрических моделей, бурение более 54 скважин на арктическом шельфе, изучение свойств более 500 образцов с арктического шельфа позволили собрать фактологический геокриолого-геофизический материал на шельфе морей Российской Арктики.

По результатам исследований:

1. Разработана методика и программно-технические средства для комплексных геокриолого-геофизических исследований при изучении субмаринных многолетнемерзлых и гидратных толщ на траверсах и полигонах шельфа Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского морей. Предложена новая структура комплексного геокриолого-геофизического анализа, включающего электроразведку методом зондирования становлением поля для изучения многолетнемерзлых пород на шельфе, электроразведку методом частотных зондирования для изучения многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суша-шельф, инверсию геофизических данных в режиме фиксированных модельных УЭС по лабораторным испытаниям грунтов, буровые работы, моделирование тепловых полей, лабораторные испытания грунтов и термометрию в выстоявшихся скважинах.
2. На основании полевых и лабораторных исследований многолетнемерзлых пород шельфа морей Российской Арктики создана база данных физических свойств пород арктического шельфа. Выполнена обработка полученных геофизических данных и построены региональные 2D геокриологические модели через шельфы Печорского, Карского, Лаптевых морей. Построены

детальные 3D геокриологические модели на шельфе Карского, Лаптевых, Чукотского морей.

3. Проанализированы и определены возможные условия формирования многолетнемерзлых толщ и построены 42 модели теплового режима горных пород на шельфе арктических морей.
4. Выполнено сравнение результатов численного теплового моделирования с данными бурения и геофизических исследований, определены границы распространения многолетнемерзлой и гидратной толщ на арктическом шельфе.
5. На шельфе морей Российской Арктики обнаружен горизонт высокого сопротивления (высокоомный слой), подтвержденный буровыми работами и термометрическими наблюдениями, кровля которого связана на шельфе с многолетнемерзлыми породами Печорского моря (простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние до 90 км и до глубин моря 150 м), Карского моря (приямальский участок, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние 50 км и до глубин моря 100 м), моря Лаптевых (залив губы Буор-Хая, Хатангский залив, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние до 100 км и до глубин моря 10 м), Восточно-Сибирского моря (пролив Дмитрия Лаптева, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние 40 км и до глубин моря 20 м), Чукотского моря (Чаунская губа, простирающегося от побережья в сторону моря на расстояние 20 км и до глубин моря 10 м).
6. Установлено, что кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается на глубинах от 24 до 150 м, на шельфе Карского моря – от 1,7 до 160 м; на шельфе моря Лаптевых – от 2 до 90 м, на шельфе Восточно-Сибирского моря – от 1,5 до 70 м, на шельфе Чукотского моря – от 10 до 120 м от кровли донных отложений.
7. Установлено, что подошва многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается на глубинах 320–350 м, на шельфе Карского моря –

в пределах 320–350 м, на шельфе моря Лаптевых – в пределах 300–660 м, на шельфе Восточно-Сибирского моря – в пределах 520–640 м, на шельфе Чукотского моря – в пределах 220–630 м от кровли донных отложений.

8. Многолетнемерзлые толщи в транзитной (переходной) зоне суша-шельф имеют двухслойное строение, что связано с условиями их формирования и промерзанием в условиях мелководья. Мощность современных «козырьков» многолетнемерзлых пород составляет не более 10 м, а их простирание до 180–220 м.
9. Прослежена непрерывность многолетнемерзлых пород на различных участках арктического шельфа. Для западной части Печорского моря острова многолетнемерзлых пород имеют простирание 1–5 км, для Восточной – 10–50 км. На шельфе Карского моря зоны деградации многолетнемерзлых пород имеют простирание простирание 10–20 км, на шельфе моря Лаптевых – 5–10 км, на шельфе Восточно-Сибирского моря – 2–10 км, на шельфе Чукотского моря – 10–20 км.
10. В многолетнемерзлых толщах на арктическом шельфе обнаружены зоны высокотемпературных многолетнемерзлых пород, по-видимому, газонасыщенных, имеющих простирание на шельфе Карского моря 10–50 км, на шельфе моря Лаптевых – 10–110 км, на шельфе Восточно-Сибирского моря – 20–130 км, на шельфе Чукотского моря – 10–70 км.
11. Изучены мощности многолетнемерзлых толщ на различных участках арктического шельфа по результатам теплового моделирования. Их корреляция с мощностями высокоомного слоя указывает на присутствие газогидратной толщи мощностью — от 20 до 110 м в интервале глубин 270–380 м от кровли донных отложений на шельфе морей западного сектора Российской Арктики (Печорское, Карское моря). На шельфе морей восточного сектора Российской Арктики в интервале глубин 660–1170 м присутствуют газогидратные толщи значительной мощности – от 120 до 540 м на шельфе моря Лаптевых, от 140 до 570 м на шельфе Восточно-Сибирского моря, от 90 до 480 м от кровли донных отложений на

шельфе Чукотского моря. Распространение газогидратных толщ коррелируется с известными газогидратными областями Северного Ледовитого океана.

12. Предложена типизация многолетнемерзлых пород арктического шельфа РФ.
13. Составлена схема типов криогенногидратных толщ на шельфе морей Российской Арктики, отличающаяся распространением, состоянием, строением криолитозоны, с изменением глубин залегания кровли, подошвы многолетнемерзлых и гидратных толщ, а также выделением зон современной деградации многолетнемерзлых толщ от известных ранее геокриологических карт.
14. Получены новые данные о динамике многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе в последние десятилетия. Деградация субмаринных многолетнемерзлых толщ по глубине составляет 14–18 см/год, по простиранию 10–16 см/год.

Выполненные исследования открывают перспективу для картирования криогенногидратных толщ, многолетнемерзлых толщ и составления карты гидратных толщ на шельфе морей Российской Арктики. Для достижения этой цели необходимо продолжить экспедиционные исследования по авторской методике, дополняя схему распространения криогенногидратных толщ новыми данными, а также продолжить лабораторные исследования свойств субмаринной криолитозоны для выбора новых информативных геофизических методов, позволяющих разделить толщу многолетнемерзлых пород и газогидратную толщу.

Список литературы

1. Альпин Л.М. Теория поля. М.: Недра, 1966. 384 с.
2. Арэ Ф.Э. О субаквальной криолитозоне Северного Ледовитого океана // Региональные и теплофизические исследования мерзлых горных пород в Сибири. Якутск, 1976. С. 3–26.
3. Атлас Арктики/Под ред. Трешникова А.Ф. М.: Изд-во ГУГК, 1985. 204 с.
4. Баду Ю.Б., Трофимов В.Т. Основные закономерности криогенного строения многолетнемерзлых пород полуострова Ямал // Проблемы криолитологии, 1974, вып. 4. С. 125–147.
5. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы Севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 191 с.
6. Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В. Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне. // Физика Земли. М.: Наука, № 10, 1999. С. 3–25.
7. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка // АИС, 2006, 744 с
8. Богданов Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника, №3 2004. С. 13–30.
9. Брушков А.В., Булдович С.Н., Волохов С.С., Гарагуля Л.С., Комаров И.А., Кошурников А.В., Кучуков Э.З., Мотенко Р.Г., Несмелова Е.И., Оспенников Е.Н., Пармузин С.Ю., Пустовойт Г.П., Тюрин А.И., Шушерина Е.П. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях, "Геоинфо" Москва, 2016. 512 с.
10. Бурлин Ю.К., Ступакова А.В. Геологические предпосылки перспектив нефтегазоносности шельфа российского сектора Северного Ледовитого океана // Геология нефти и газа, 2008, №3.
11. Васильчук Ю.К. Позднечетвертичные синкриогенные толщи севера Евразии: Строение, изотопно-кислородный состав и условия формирования / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. М.: 1991. 48 с.

12. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М. Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН. МГУ. ПНИИИС. 1992. В 2-х томах. Т.1. – 420 с. Т.2 – 264 с.
13. Васильчук Ю.К. Повторно–жильные льды; гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. – М.: МГУ, 2006. 404 с.
14. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Черкашев Г.А., Ванштейн Б.Г. Динамика берегов Карского моря. Криосфера Земли, т. X, № 2, 2006. С. 56–67.
15. Гаврилов А.В., Павлов В.А., Фриденберг А.И., Болдырев М.Л., Хилимонюк В.З., Пижанкова Е.И., Булдович С.Н., Косевич Н.И., Аляутдинов А.Р. Геокриологическое картографирование шельфа Карского моря. Методика и результаты // Нефтяное хозяйство, издательство Нефтяное хоз-во (М.), № 11, 2019. С. 28-32.
16. Гаврилов А.В. Криолитозона Арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние история развития в среднем плейстоцене-голоцене). Докторская диссертация, 2008.
17. Геокриология СССР, 1989.
18. Геокриологическая карта СССР. М.: 1:2500000/Под ред. Э.Д. Ершова, К.А. Кондратьевой. 1991.
19. Гинзбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб. ВНИИОкеангеология, 1994. 199 с.
20. Гончаров А.А., Алексеев Д.А., Кошурников А.В., Гунар А.Ю., Семилетов И.П., Пушкарев П.Ю. Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на Арктическом шельфе // Физика Земли, № 5, С. 158-170 DOI, 2022.
21. Грамберг И.С., Додин Д.А., Лаверов Н.П., Погребницкий Ю.Е., Садиков М.А., Мусатов Е.Е., Поселов В.А., Супруненко О.И., Каминский В.Д., Крюков В.Д., Павленко В.И., Сорокин М.Ю., Ушаков В.И., Фролов И.Е. Арктика на пороге третьего тысячелетия. С.-Пб.: Наука, 2000. 245 с.

22. Григорьев Н.Ф. Температурная характеристика донных отложений в прибрежной зоне Карского моря (Западное побережье п-ова Ямал). – В кн.: Термика почв и горных пород в холодных регионах. Якутск, 1982. С. 101–111.
23. Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1987. 112 с.
24. Гусев Е.А., Зайончек А.В., Мэннис М.В., Рекант П.В., Рудой А.С., Рыбаков К.С., Черных А.А. Прилаптевоморское окончание хребта Гаккеля // Геолого-геофизические характеристики литосферы... Вып. 4, 2002.
25. Данилов И.Д. Пластовые льды и субквальный криолитогенез // Геокриологические исследования. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 16-29.
26. Данилов И.Д., Булдович С.Н., Жигарев Л.А., Комаров И.А., Талденкова Е.Е. Криолитозона арктического шельфа и ее динамика в прошлом и будущем. Информационный бюллетень РФФИ, 1996. Т. 4, № 5, 1996. 617 с.
27. Данилов И.Д., Комаров И.А., Власенко А.Ю. Динамика криолитосферы в зоне взаимодействия шельф-континент в последние 25000 лет (на примере Восточно-Сибирского моря), Криосфера Земли, т. 1, № 3, 1997.
28. Данилов И.Д., Комаров И.А., Луковкин Д.С. Количественная оценка динамики и палеотемпературы мерзлых пород Баренцева шельфа в позднем плейстоцене-голоцене. Морской перигляциал и оледенение Баренцево-Карского шельфа в плейстоцене. Доклад на конференции. Мурманск, Россия, 19–21 ноября, 1998.
29. Данилов И.Д., Комаров И.А., Власенко А.Ю. Криолитозона Восточно-Сибирского шельфа в последние 80000 лет. Криосфера Земли, № 4, 2000. С. 18–23.
30. Дмитриев В.И. Морские электромагнитные зондирования. // М.:Аргмак-Медиа, 2014.
31. Долгунов К.А., Мартиросян В.Н., Васильева Е.А., Сапожников Б.Г. Структурно-тектонические особенности строения и перспективы нефтегазоносности северной части Баренцево-Карского региона// Геология нефти и газа. 2011. № 6. С. 70–83.

32. Драчев А.Ф. Тектоника рифтовой континентальной окраины Северо-Восточной Евразии в Арктике (моря Лаптевых и Восточно-Сибирское). Автореф. дис. д-ра геол.-мин. наук, М., Институт литосферы РАН, 1999. 40 с.
33. Драчев А.Ф. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника, 2000. С. 43–58.
34. Драчев С.С., Елистратов А.В., Савостин Л.А. Структура и сейсмостратиграфия шельфа Восточно-Сибирского моря вдоль сейсмического профиля «Индибирский залив – остров Жаннетты» // Доклады академии наук, 2001, том 377, №4, С. 1-5
35. Елисеева А.А. Современное состояние и эволюция криолитозоны и зоны стабильности газовых гидратов на арктическом шельфе Восточно Сибири в позднем кайнозое. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, 2007.
36. Жданов М.С. Электроразведка, М, 1995.
37. Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. Изд-во МГУ. 1997. с. 320.
38. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. //М.: Издательство МГУ, 2007.
39. Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Пушкарев П.Ю. Применение частотного электромагнитного зондирования при проектировании газопроводов. // Инженерные изыскания, № 3, 2008. С. 70–74.
40. Зыков Ю.Д., Скворцов А.Г., Кошурников А.В., Погорелов А.А. Информативность геофизических исследований при инженерных изысканиях в криолитозоне. // Инженерные изыскания, № 12, 2009. С. 57–63.
41. Зыков Ю.Д., Мотенко Р.Г., Кошурников А.В., Озерицкий К.В., Гречищева Э.С., Гунар А.Ю. Экспериментальное исследование влияния нефтяного загрязнения на теплофизические и геофизические свойства засоленных мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. //Вестник Московского государственного областного университета, № 1, 2013. С. 1–17.
42. Исаев В.С., Кошурников А.В., Игнатов Е.И., Каширина Е.С., Новиков А.А., Гуцин А.И., Комаров О.И., Пушкарев П.Ю., Владов М.Л., Котов П.И.,

- Вербовский В.В., Аманжуров Р.М., Горшков Е.И., Береговые процессы: мониторинг и инновационные комплексные исследования, ООО "Колорит" Севастополь, 2018, ISBN 978-5-6041191-2-9. 258 с.
43. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. М: Недра. Часть 1, 1997, 520 с. Часть 2. 2000. 483 с.
44. Кауфман А.А., Алексеев Д.А., Ористальо М.О. Принципы электромагнитных методов наземной геофизики. Тверь: АИС, 2016. 558 с.
45. Кеннет Дж.П. Морская геология, т. 1, перевод с английского Мурдмаа И.О., Ивановой Е.В., под редакцией Лисицына А.П., Москва: МИР, 1987.
46. Кондаков В.В., Кусова О.Ф., Кондаков М.В. Геокриологические условия северо-восточной части полуострова Ямал // Материалы Четвертой конференции геокриологов России, МГУ, 7-9 июня 2011 г. Москва: Университетская книга, 2011. Т. 2, С. 89–94.
47. Комаров И.А. Термодинамика и теплообмен в дисперсных мерзлых породах, 2003, Научный мир Москва. 608 с.
48. Кошурников А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. № 3 2020. С. 116–125.
49. Кошурников А.В. Применение комплексного геокриолого-геофизического анализа при исследовании многолетнемерзлых пород и газогидратов на шельфе морей Российской Арктики. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. №. 3. 2020. С. 36–44.
50. Кошурников А.В., Котов П.И., Агапкин И.А. Влияние засоленности на акустические и электрические свойства мерзлых грунтов. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. № 6. 2019. С. 99–106.
51. Кошурников А.В., Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Желтенкова Н.В., Кривошея К.В., Погорелов А.А., Зыков Ю.Д. Информативность геофизических методов разведки при решении геокриологических задач на суше и шельфе. // Российские полярные исследования, № 2, 2019. С. 17–23.

52. Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Гунар А.Ю., Пушкарев П.Ю., Семилетов И.П., Кошурников А.А. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых. // Доклады Академии наук, т. 469, № 5, 2016. С. 616–620.
53. Кошурников А.В., Зыков Ю.Д., Пушкарев П.Ю., Хасанов И.М. Электромагнитные исследования при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне. //Разведка и охрана недр, № 12, 2008. С. 25–27.
54. Кошурников А.В., Зыков Ю.Д., Панин А.В., Сизых Е.М., Петрухина Е.С., Константинов Е.А., Селезнева Е.В., Просунцов К.С., Алексютина Д.М., Изучение мерзлого основания археологического памятника «Крепость Пор-Бажын» (Тува). //Инженерные изыскания, № 6, 2008. С. 28–31.
55. Кошурников А.В. Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне, Забайкалье и на Дальнем Востоке / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М.: 2001.
56. Крапивнер Р.Б. Быстрое погружение Баренцевского шельфа за последние 15–16 тыс. лет. Геотектоника, №3, 2006. С. 39–51.
57. Куницкий В.В. Криолитология низовьев Лены. Якутск, изд-ие ИМ СО РАН. 1989. 162 с.
58. Куницын А.В. Глубинное строение шельфа Баренцева-Карского региона по данным сейсмических геотраверсов. Автореферат диссертации кандидата геолого-минералогических наук. Москва, МГУ, 2008.
59. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология. Москва. Высшая школа, 1979.
60. Методические рекомендации при выполнении работ аппаратурой «Цикл-7», СНИИГИМиС, 1987.
61. Методы геокриологических исследований // М., МГУ, 2004.

62. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. – Новосибирск: Наука. Сибирская издание РАН, 1995. 198 с.
63. Морская геология под ред. Логвиненко Н.В., Л. Недра, 1980. 343 с.
64. Национальный атлас Арктики // АО «Роскартография», 2017.
65. Неизвестнов Я.В. Мерзлотно-геологические условия зоны арктических шельфов СССР // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, 1981. С. 18–28.
66. Неизвестнов Я.В., Холмянский М.А., Боровик О.В., Колчина Н.Л. Криолитозона западно-арктической шельфовой зоны России (методологические аспекты изучения). – Материалы доклада на научном семинаре «Субаквальная криолитозона западной Арктики: результаты исследований, методика изучения, моделирование», 27–28 марта 2008 г., Санкт-Петербург, ФГБУ «ВНИИОкеангеология».
67. Павлидис Ю.А. и др. Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. Москва. 1998.
68. Панин А.В., Бронникова М.А., Успенская О.Н., Аржанцева И.А., Константинов Е.А., Кошурников А.В., Селезнева Е.В., Фузеина Ю.Н., Шеремецкая Е.Д. История озера Тере-Холь и голоценовая динамика природной среды на юго-востоке Саяно-Тувинского нагорья // Доклады Академии наук, издательство, том 446, № 5, С. 568-574, 2012.
69. Перлова Е.В., Микляева Е.С., Леонов С.А., Ткачева Е.В., Ухова Ю.А. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // Научно-технический сборник Вести Газовой науки, № 3 (31) 2017. С. 255 – 262.
70. Пискарев А.Л., Сорока И.В., Чернышев М.Ю. Строение земной коры Восточно-Баренцевского шельфа // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. С.-Пб.: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2002. Вып. 4. С. 55–69. Полуостров Ямал / Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г., М. МГУ, 1975.

71. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал-Центр. / Баулин В.В., Дубиков Г.И., Комаров И.А., Корейша М.М., Пармузин С.Ю. и др., М.: ГЕОС, 1997. 432 с.
72. Пушкарев П.Ю. Интерпретация низкочастотных электромагнитных зондирований неоднородных сред применительно к решению геологических задач / Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, 2017.
73. Рекант П.В., Васильев А.А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря. Криосфера Земли. 2011г. Т. XV, №4, С. 69–72.
74. Рокос С.И., Длугач А.Г., Костин Д.А., Куликов С.Н., Локтев А.С. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания. // Инженерные изыскания, 2009, №10, С. 38–41.
75. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. Изд-во МГУ, 1993.
76. Романовский Н.Н., Барковская Е.Н., Комаров И. Роль гидратов газов в криолитозоне морских отложений арктического бассейна. // Вестник МГУ. Сер. 4, Геология 1988, №5, С. 3–14.
77. Романовский Н.Н., Типенко Г.С., Серегина Н.В., Комаров И.А. Численное моделирование взаимодействия мерзлой толщи и залежей гидратов природных газов Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), № 2, С. 73–83 (основные результаты в книге стр.363–369), 1990.
78. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Холодов АЛ. и др. Реконструкция палеогеографических условий шельфа моря Лаптевых для позднплейстоценового гляциоэвстатического цикла. //Криосфера Земли, 1997, т.1, №2, С. 42–49.

79. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Холодов А.Л. и др. Распределение и мощность субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых. //Криосфера Земли, 1997 т.1, №3, С. 9–18.
80. Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Хуббертен Х.В., Кассенс Х. Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, С. 22–32.
81. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., и др. Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1996, т. III, №3, С. 79–91.
82. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В. Формирование и эволюция криолитозоны шельфа и приморских низменностей (на примере региона моря Лаптевых) // Известия АН. Серия географическая, 2001, № 3, С. 1–28.
83. Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В., Типенко Г.С., Хуббертен Х.В. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов в рифтовых структурах арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2). // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1
84. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов, м.: Стройиздат, Москва, 1973 г.
85. Селиванов А.О. Изменения уровня Мирового океана в плейстоцене-голоцене и развитие морских берегов. М., Институт водных проблем РАН, 1996.268 с.
86. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития под ред. Кассенс Х, Лисицына А.П., МГУ, 2009.
87. Слагода Е.А., Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень, ИПЦ Экспресс, 2004. 120 с.
88. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Михалюк Ю.Н. Оценка мерзлотно-геотермических условий Баренцево-Карского шельфа, 1981 г.
89. Соловьев В.А. Палеогеографические предпосылки существования субаквальной реликтовой мерзлой зоны на шельфе восточно-арктических

- морей СССР // Гидрогеологические и мерзлотные условия арктического континентального шельфа Евразии. Ленинград, ПГО «Севморгеология». 1982. С. 24–36.
90. Стрелецкая И.Д. Реконструкция палеоклимата Российской Арктики в позднем неоплейстоцене-голоцене на основе данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // Криосфера Земли, т. XIX, №2 2015. С. 98-106.
91. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. Отв. ред. Е.М. Чувилин. – М.: ГЕОС, 2007. 137 с.
92. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. М-Л: ОГИЗ, 1948, 539 с.
93. Ступакова А.В. Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий. «Геология нефти и газа», № 6, 2011. С. 99–115.
94. Теплофизические свойства горных пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1984. 204 с.
95. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М-Л: ОГИЗ, 1949. 628 с.
96. Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М.. МГУ, 1980. 246 с.
97. Тюрин А.И., Исаев В.С., Сергеев Д.О., Тумской В.Е., Волков Н.Г., Соколов И.С., Комаров О.И., Кошурников А.В., Гунар А.Ю., Комаров И.А., Ананьев В.В. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 2. С. 72–83.
98. Ульянов Г.В. Геолого-геохимические предпосылки газонефтеносности юрских отложений Южно-Карской впадины. Диссертация кандидата геолого-минералогических наук. Москва, МГУ, 2011.
99. Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск: Наука, 1993. 135 с.
100. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, 2005.

101. Фролов Д.М., Ржаницын Г.А., Кошурников А.В., Гагарин В.Е. Мониторинг сезонных изменений температуры грунта. // Арктика и Антарктика, 2022. № 4. С. 43-53.
102. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М: Мир. Вып. V, 1966, 296 с. Вып. VI, 1966. 344 с.
103. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез.// М.: Наука 2003 г.
104. Хименков А.Н., Гагарин В.Е., Кошурников А.В., Шешин Ю.Б., Скосарь В.В. Лабораторное моделирование процессов формирования криогенного строения морских отложений. Криосфера Земли, том 22, №3, 2018. С. 40–51.
105. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Станиловская Ю.В. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика, № 2, С. 65-105 DOI 2020
106. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. Фильтрации газа в мерзлых грунтах // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, № 3, С. 97-104, 2020.
107. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Сергеев Д.О., Соболев П.А. Газонасыщенные мерзлые породы криолитозоны // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 2, С. 3-16 DOI, 2021.
108. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки (ч.1, ч.2) М., 1981.
109. Холмянский М.А., Анохин В.М. Связь типов криолитозоны западно-арктического шельфа с его геологическими особенностями. // Проблемы Арктики и Антарктики, № 2 (112), 2017.
110. Чеверев В.Г., Видяпин И.Ю., Тумской В.Е. Состав и свойства отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова. Ж. «Криосфера Земли», 2007 г., № 11. С. 44–50.
111. Чеховский А.Л. О распространении многолетнемерзлых пород под шельфом Карского моря // Тр. ПНИИИС Госстроя СССР. М., 1972. Т. XVIII. С. 100–111.

112. Шепард Ф.П. Морская геология, перевод с английского Филатов С.С., Недра, 1976.
113. Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики «глазами» подземных льдов.// М.: Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2015 г. 151
114. Электроразведка: справочник геофизика. Книга первая. Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М: Недра, 1989, 438 с.
115. Brigham-Grette J., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Glushkova O.Y., Paleoenvironmental conditions in western Beringia before and during the Last Glacial Maximum. In: Madsen, D.B. (Ed.), *Entering America: Northeast Asia and Beringia Before the Last Glacial Maximum.* // University of Utah Press, P. 29-61 (Chapter 2), 2004.
116. Charkin A.N., Rutgers van_der_Loeff M., Shakhova N.E., Gustafsson O., Dudarev O.V., Cherepnev M.S., Salyuk A.N., Koshurnikov A.V., Spivak E.A., Gunar A.Y., Ruban A.S., Semiletov I.P. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea // *The Cryosphere*, 2017, № 11, P. 2305-2327.
117. Commission on the Continental Shelf. Receipt of the Submission made by the Russian Federation to the Commission on the Continental Shelf. UN Doc. CLCS.01.2001. LOS (Continental Shelf Notification), 2001, 2012.
118. Drachev S.S., Kaul N., Beliaev V.N. Eurasia spreading basin to Laptev shelf transition// *Geophys. J. Int.*, 2003, №152, P.688–698.
119. Gemery L., Cronin T.M., Poirier R.K., Pearce C., Barrientos N., O'Regan M., Johansson C., Koshurnikov A.V., Jakobsson M. Central Arctic Ocean paleoceanography from ~50 ka to present, on the basis of ostracode faunal assemblages from SWERUS 2014 expedition. // *Climate of the Past Discussions*. 2017. V 13, P. 1473–1489.

120. Geibert W., Matthiessen J., Stimac I., Wollenburg J., Stein R. Glacial episodes of a freshwater Arctic Ocean covered by a thick ice shelf. *Nature*. 2021 Feb;590 (7844):97-102.
121. Hunter J. A.M., Judge A.S., MacAulay H.A. et al. Permafrost and frozen sub-sea bottom materials in the southern Beaufort Sea Canada, Department of the Environment, Beaufort Sea Project report, 1976, P. 22–174.
122. Hunter J.A., MacAulay H.A., Burns R.A. and Good, R.L. Some measurements of seabottom sediment velocities on the Scotian shelf; in *Current Research, Part B*, Geological Survey of Canada, Paper 82-1B, 1982, P. 293–296.
123. Hunter J.A., Neave K.G., MacAulay H.A. and Hobson G.D. Interpretation of sub-bottom permafrost in the Beaufort Sea by seismic methods. Part I – seismic refraction methods. Part II – estimating the thickness of the highvelocity layer; in *Proceedings of III International Permafrost Conference*, Edmonton, Alberta, July 10–13, 1978, v.1, P. 515–526.
124. Isaev V.S., Koshurnikov A.V., Pogorelov A.A., Amangurov R.M., Podchasov O.V., Buldovich S.N., Aleksyutina D., Grishakina E.A., Kioka A. Cliff retreat of permafrost coast in the southwest Baydaratskaya Bay of Kara Sea during 2005–2016.// *Permafrost and Periglacial Processes*, John Wiley & Sons Inc. (United States). 2019. N 30, P. 35-47.
125. Jakobsson M., Nilsson J., Anderson L., Backman J., Bjork G., Cronin T.M., Kirchner N., Koshurnikov A., Mayer L., Noormets R., O'Regan M., Stranne C., Ananiev R., Barrientos N., Cherniykh D., Coxall H., Eriksson B., Floden T., Gemery L., Gustafsson O., Jerram K., Johansson C., Khortov A., Rezwan Mohammad R., Semiletov I. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the penultimate glaciation. // *Nature communications*, Nature Pub. Group (United Kingdom). 2016 г. N 7 (10365).
126. Koshurnikov A.V., Tumskoy V.E., Skosar V.V., Efimov Y.O., Kornishin K.A., Bekker A.T., Piskunov Y.G., Tsimbelman N.Y., Kosmach D.A. Submarine

- permafrost in the Laptev Sea. // *International Journal of Offshore and Polar Engineering* (ISSN 1053-5381) Vol. 30, N. 1, March 2020, P. 86–93.
127. Lambeck K., Yokoyama Y., Purcell T. Into and out of the Last Glacial Maximum: sea-level change during oxygen isotope stages 3 and 2. // *Quaternary Science Reviews* 21, 2002, P. 343–360.
128. Mackay J.R. The word of undergoun ice // *Annals of the Association of American Geographers*, Volume 62, 1972.
129. Miller C.M., Dickens G., Jakobsson M., Johanson C., Koshurnikov A., O'Regan M., Muschitiello F., Stranne C., Carl-Magnus M. Low methane concentrations in sediment along the continental slope north of Siberia: Inference from pore water geochemistry. // *Biogeosciences Discussions*, издательство European Geosciences Union (Germany). 2016. P. 1–92.
130. Miller C.M, Dickens G.R., Jakobsson M., Johansson C., Koshurnikov A., O'Regan M., Muschitiello F. Pore water geochemistry along continental slopes north of the East Siberian Sea: inference of low methane concentrations // *Biogeosciences*. European Geosciences Union (EGU). (Germany) 2017, N 14. P. 2929–2953.
131. Miller G.H., Brigham-Grette J., Alley R.B., Anderson L., Bauche H.A., Douglas M.S.V., Edwards M.E., Elias S.A., Finney B.P., Fitzpatrick J.J., Funder S.V., Herbert T.D., Hinzman L.D., Kaufmanm D.S., MacDonald G.M., Polyak L., Robock A., Serreze M.C., Smol J.P., Spielhagen R., White J.W.C., Wolfe A.P., Wolff E.W. Temperature and precipitation history of the Arctic. // Elsevier, 2010.
132. O'Regan M., Preto P., Stranne C., Jakobsson M., Koshurnikov A. Surface heat flow measurements from the East Siberian continental slope and southern Lomonosov Ridge, Arctic Ocean // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, издательство Geochemical Society (United States), March 2016. P. 1608–1622.
133. Pollack H. N., Hurter S. J., and Johnson J. R. New Global Heat Flow Compilation – 1991.201.

134. Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate-sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf// *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014. 119 (doi: 10.1002/2014JG002685).
135. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovskiy L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrievsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Curret rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature communications*, Nature Pub. Group (United Kingdom). 2017. N 8 (158172).
136. Schmidt G.A., LeGrande A.N., Hoffman G. Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled oceanatmosphere model. // *Journal of Geophysical Research* 2007, 112, D10103. doi:10.1029/2006JD007781.
137. The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) 2017, <https://www.gebco.net/search/>.
138. Tilmann S., Spiess V., Rekant P., Gusev E., Kassens H. Structure of Late Quaternary sediments and submarine permafrost in the Laptev Sea-results from mutltichannel seismic survey during Expedition TRANSDRIFT X. Groningen, Netherlands. The 6 th Annual Arctic Coastal Dynamics (ACD) Work-shop, Oct. 22–26, 2006.
139. Tipenko G.S., Seregina N.V., Komapov J.A., Romanovskii N.N. Mathematical simulation of permafrost and natural gas hydrate deposits interaction, *Vestnik MGU*, Volume 4, № 2, P. 73–84, 1990.
140. Tipenko G.S., Seregina N.V., Romamovsky N.N., Komarov I.A. Mathematical modeling of permafrost rocks and natural gas hydrates pool interaction. *Moscow University Geology Bulletin*, Volume 45, № 2, P. 67–77, 1990.
141. Zakharkin A.K. Methodological Recommendations on Electrical Exploration by Probing Field Steady-Stating in Nearest Zone With the Help of “Cycle” Equipment (Siberian Sci. Res. Inst. Geol., Geophys., Miner. Raw. Materials, Novosibirsk, 1981) [in Russian].

Фондовые материалы:

142. Анализ геокриологических условий первоочередных нефтегазоперспективных площадей (Штокмановская, Русановская, Адмиралтейская): отчет по объекту N 147 за 1990–1992гг./ Спесивцев В.И., Рокос С.И., Длугач А.Г., и др., 1992 г.
143. Выполнение инженерно-геологических, инженерно-геофизических, инженерно-геокриологических изысканий на участке перехода газопроводом Бованенково –Ухта через Байдарацкую губу, 2007–2009 гг.: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Обществом с ограниченной ответственностью «Питер Газ» (ООО «Питер Газ») ПАО «Газпром», 2010.
144. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ и изучению инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий на объектах: Поисково-оценочная скважина №1 Нярмейского лицензионного участка, площадка Нярмейского лицензионного участка: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ»), 2015.
145. Выполнение термометрических исследований в глубоких скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномерзлых грунтов, направленных на изучение инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий на объекте «Площадные инженерно-геологические изыскания для определения опасностей, связанных с поверхностным газом и многолетнемерзлыми породами на Нярмейском лицензионном участке» и «Поисково-оценочная скважина № 1 Нярмейского лицензионного участка»: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом с ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ»), 2016.
146. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ, термометрических исследований в глубоких

- скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномерзлых грунтов, направленных на изучение инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий на объекте: Скуратовская лицензионная площадь: отчет Росгеолфонд/ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ»), 2017.
147. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ, термометрических исследований в глубоких скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномерзлых грунтов, направленных на изучение инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий на объекте: Белоостровская лицензионная площадь: отчет Росгеолфонд/ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ»), 2018.
148. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ, термометрических исследований в глубоких скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномерзлых грунтов, направленных на изучение инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий на объекте: Ленинградская площадка №1: отчет Росгеолфонд/ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ»), 2019.
149. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ, термометрических исследований в глубоких скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномерзлых грунтов, направленных на изучение инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий на объекте: Поисково-оценочная скважина № 1 Скуратовская лицензионная площадь: отчет Росгеолфонд/ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом

«Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ»), 2020.

150. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ, термометрических исследований в глубоких скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномёрзлых грунтов, направленных на изучение опасностей, связанных с многолетнемёрзлыми породами на объекте: Поисково-оценочная скважина № 10 Западно-Ленинградская лицензионная площадь: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Акционерным обществом «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО «МАГЭ»), 2021.
151. Выполнение инженерно-геофизических изысканий методом электроразведочных ЗСБ, термометрических исследований в глубоких скважинах и лабораторных геокриологических исследований вечномёрзлых грунтов, направленных на изучение опасностей, связанных с многолетнемёрзлыми породами на объекте: Разведочная скважина № 4 Русановского газоконденсатного месторождения; Разведочная скважина № 7 газоконденсатного месторождения им. В.А. Динкова: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Акционерным обществом «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО «МАГЭ»), 2022.
152. Выполнение инженерных изысканий и геокриологических исследований под альтернативный вариант строительства гидротехнических сооружений для плавучей атомной теплоэлектростанции (на базе плавучего энергоблока проекта 20870 с реакторными установками КЛТ-40С) в г. Певеке Чукотского автономного округа: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Открытым акционерным обществом «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт морского транспорта «Союзморниипроект» (ОАО «Союзморниипроект»), 2015.
153. Выполнение инженерно-геокриологических изысканий в бухте Нордвик: отчет Росгеолфонд/ ООО «МГУ-геофизика» по договору с Обществом с

- ограниченной ответственностью «Арктических научный центр» (ООО «АНЦ») ПАО «НК «Роснефть», 2017.
154. Заключение об инженерно-геологических условиях площадки строительства скважины глубокого нефтегазопроискового бурения Ленинградская-1. Карское море: отчет Росгеолфонд/ Бондарев В.Н. - НПО "Союзморинжгеология", АО «АМИГЭ», 1989.
 155. Изучение литолого-фациального состава пород, корреляция разрезов и составление эталонных коллекций мезозойско-палеозойских отложений Баренцева и Карского морей по материалам бурения ПО "Арктикморнефтегазразведка": отчет Росгеолфонд/ Павлов Л.А., Матигоров А.А., Егорова О.Л. – ПО "Арктикморнефтегазразведка", 1988.
 156. Изучение основных закономерностей пространственного распространения и строения криолитозоны Баренцево-Карского шельфа в связи с поиском и освоением нефтегазовых месторождений: отчет по объекту N 159 за 1992–1995 гг./ Длугач А.Г., Антоненко С.В., Потапкин Ю.В., 1995.
 157. Инженерно-геокриологические исследования в составе инженерно-геологических изысканий береговых участков перехода газопровода через Байдарацкую губу// №31/05 -01-РП-ИКрИ-0101- С1, 191 с.: отчет Росгеолфонд/ Булдович С.Н., Роман Л.Т., Мотенко Р.Г., Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., 2006.
 158. Картирование границ субмаринных мерзлых толщ и газовыводящих каналов на шельфе восточно-арктических морей по геофизическим данным: отчет НИР/ООО «МГУ-геофизика» по договору с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований», 2014–2015 гг.
 159. Карта криогенных физико-геологических процессов Российской Арктики м-ба 1:7 500 000.Тема 253: отчет Росгеолфонд/Гравис Г.Ф., Мельников Е.С., Кондратьева К.А.,1995.

160. Литостратиграфическое изучение опорных инженерно- геологических скважин Баренцева и Карского морей: отчет №463746/ Гатауллин В.Н. - ГНПО «Моринжгеология» и НИИМОРГЕО. Рига, 1992.
161. Обработка материалов бурения Дресвянской параметрической скважины №1. / Тема №1/84-86/. Научная обработка материалов бурения параметрических и особо важных поисковых скважин на шельфе Баренцева и Карского морей: отчет Росгеолфонд/ Зарипов О.Г., Тимофеев А.П., Молоканова Е.Е., 1984.
162. Опытнo-производственные геофизические исследования ВСП в скважинах глубокого бурения на акватории Баренцева и Карского морей и высокоразрешающие сейсморазведочные работы МОВ ОГТ. Объект 16/89: отчет Росгеолфонд/ Касимов А.Н., Певнева Л.А., Найко Э.В., 1990.
163. Отчет о прогнозно-оценочных геолого-геофизических работах на акватории губ Ванькиной и Эбеляхской в восточной части моря Лаптевых: отчет Росгеолфонд / Семенов Н.П., Зайцев И.М., Генин Б.Л., 1976.
164. Отчет инженерно-геологические исследования на шельфе Карского моря (Ленинградская структура): отчет Росгеолфонд/ Спесивцев В.И., Костюхин А.И., Агалаков В.В., 1986.
165. Отчет о результатах региональных геолого-геофизических работ в юго-восточной части Карского моря в 1986–1989 гг.: отчет Росгеолфонд/ Хапилин А.Ф., Кальной Г.А., Чешуин В.В., 1990.
166. Отчет о результатах проведения геологической съемки шельфа масштаба 1:200 000 в прол. Дмитрия Лаптева. (Восточно-Лаптевская оловоносная зона): отчет Росгеолфонд/ Судаков Л.А., Серов Е.К., Ильин О.М., 1991.
167. Отчет о результатах геологической съемки шельфа м-ба 1:200 000 в Восточной части Карского моря в 1989–1994 гг.: отчет Росгеолфонд/ Кальной Г.А., Кулаков С.Б., Падерин П.Г., 1995.
168. Отчет ревизионной партии о литолого-стратиграфическом изучении разрезов на островах и побережье Баренцева и Карского морей в нефтегазопроисловых целях и региональных геологических исследованиях на

- шельфе Восточных морей СССР (Лаптевых, Восточно-Сибирском и др.) на попутных гидрографических судах в 1976–1977 гг.: отчет Росгеолфонд/ Михайлов Ю.А., Черкесов О.В., Сергеев Д.В., 1977.
169. Отчет о региональных ревизионных геологических работах по изучению фанерозойских отложений арктических островов и донных осадков арктических морей. Том 1 – Результаты геологических работ в западной части о. Колгуев правобережье р. Ненгдей и о. Котельный в 1983–1985 гг.: отчет Росгеолфонд/ Ефремова В.И., Бирюков А.С., Черкесов О.В., 1985.
170. Отчет по обработке материалов бурения параметрической скважины Белый-1 (о. Белый, Карское море). Тема: IX((И.П.)/101(3,41)) 74-2/894: отчет Росгеолфонд/ Бро Е.Г., Армишев А.М., Войцеховская А.Г., 1986.
171. Отчет по обработке материалов бурения северной параметрической скважины (остров Грэм-Белл, архипелаг Земля Франца-Иосифа): отчет Росгеолфонда / Школа И.В., Бро Е.Г., Вербя В.В., 1980.
172. Отчет по теме: "Обработка и обобщение материалов бурения параметрических скважин на арктических островах (Нагурская и Северная параметрические скважины на архипелаге Земля Франца-Иосифа): отчет Росгеолфонда / Школа И.В., Бро Е.Г., Вербя В.В., 1980.
173. Результаты геологических исследований на островах (Грэм-Бэлл, Колгуев) и побережье (п-ов Говена) арктических морей и донного опробования на гидрографических судах: отчет Росгеолфонд/ Тараховский А.Н., Бочарникова А.И., Рождественская И.И. - Арктический институт, 1976.
174. Создание комплекса Государственной геологической карты масштаба 1: 1 000 000 листов R-1(о. Врангеля) и R-2 (Чукотское море): Госконтракт № 06/07/12-16.Объект № 4-31 /Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Гусев Е.А., 2007.
175. Сравнительный анализ нефтегазоперспективных осадочных бассейнов акваторий советской Арктики и Северной Америки с целью разработки критериев прогнозной оценки нефтегазоносности арктического шельфа

- России: Отчет по договору N 080/ Лазуркин Д.В., Бро Е.Г., Дибнер В.Д., 1992.
176. Условия формирования, структура и перспективы нефтегазоносности осадочного чехла шельфа западной части Восточно-Сибирского моря. (тема "Условия формирования, структура и перспективы нефтегазоносности осадочного чехла шельфа западной части Восточно-Сибирского моря и Приморской низменности"). 74-6/621: отчет Росгеолфонд/ Косько М.К., Непомилуев В.Ф., Преображенская Э.Н., 1978.
177. Field investigation and laboratory analyses; Baydaratskaya bay., №1, 48 с.: отчет НИР/ Исаев В.С., Кошурников А.В., Погорелов А.А., Аманжуров Р.М., Подчасов О.В., МГУ, 2015.
178. Field investigation and laboratory analyses; Baydaratskaya bay., №1, 41 с.: отчет НИР/ Исаев В.С., Кошурников А.В., Погорелов А.А., Аманжуров Р.М., Сергеев Д.О., Подчасов О.В., Киока Арата, –МГУ, 2016.

Патенты:

179. Пат. 2754364 Российская Федерация. Способ многокомпонентной электромагнитной съёмки на акватории и система для его осуществления / Кошурников А. В., Парамонов Н.В., Пушкарев П.Ю., Рыбин Н.А., Иванов Н.А., Хоштария В.Н., Мартын А.А., Гунар А.Ю., Демидов Н.Э., Литвишков Д.Н., Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика» (ООО «МГУ-геофизика»). – №2019133314; заявл. 2019.10.21; опубл. 2006.08.01.
180. Пат. 2280269 Российская Федерация. Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления / Пушкарев П.Ю., Кошурников А.В., Джалилов Ф.Ф., Кириаков В.Х., Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика» (ООО «МГУ-геофизика»). – №2005124350; заявл. 2005.08.01; опубл. 2006.07.20.

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Кошурников Андрей Викторович

**Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики
(по данным геофизических исследований)**

Том 2

Специальности:

1.6.7 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

1.6.9 – геофизика

ПРИЛОЖЕНИЕ К ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени

доктора геолого-минералогических наук

Научный консультант:

доктор геолого-минералогических наук

Брушков А. В.

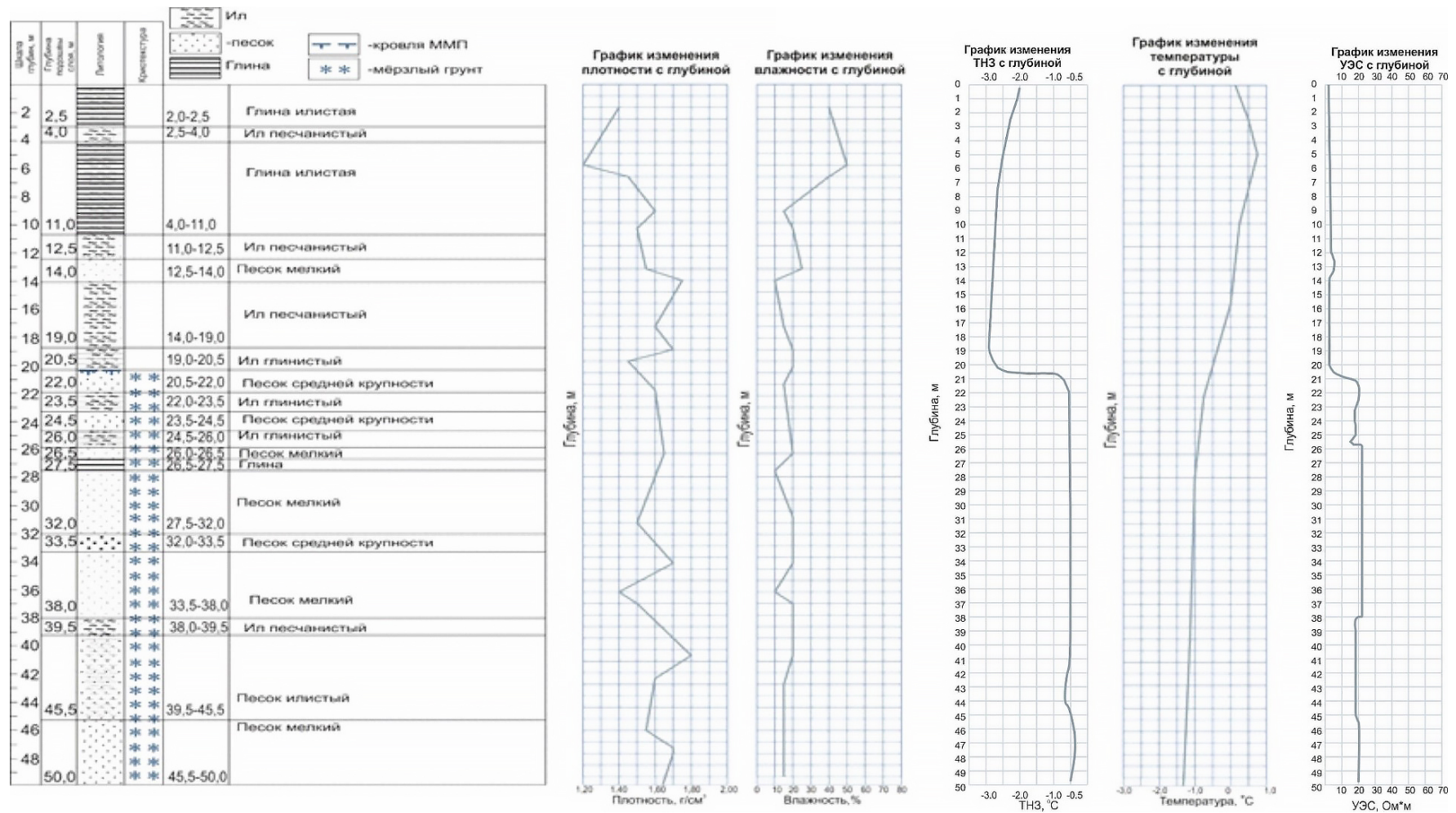
Москва – 2023

Оглавление

Приложение А. Сводные геологические колонки и результаты лабораторных испытаний пород для опорных участков арктического шельфа.....	3
Приложение Б. Тепловые модели опорных участков арктического шельфа	10
Приложение В. Комплект документации по сертификации средства измерения Косы цифровые термометрические.....	31
Приложение Г. Сертификат соответствия геофизической продукции «ТЕЛСС-3-Э».....	89
Приложение Д. Заключение соответствия заводским характеристикам геофизической продукции «APL-02».....	90
Приложение Е. Патенты на изобретение.....	91
Приложение Ж. Заключение соответствия заводским характеристикам геофизической продукции «HF-EM»	93
Приложение И. Свидетельство о государственной регистрации программы «Faraday»	94
Приложение К. Акты выполненных работ автора по предлагаемой методике	96

Приложение А. Сводные геологические колонки и результаты лабораторных испытаний пород для опорных участков арктического шельфа

А 1. Опорный разрез 1 (Тикси)



А 2. Опорный разрез 2 (Хатанга)

Скважина БН-2-17



График изменения плотности с глубиной

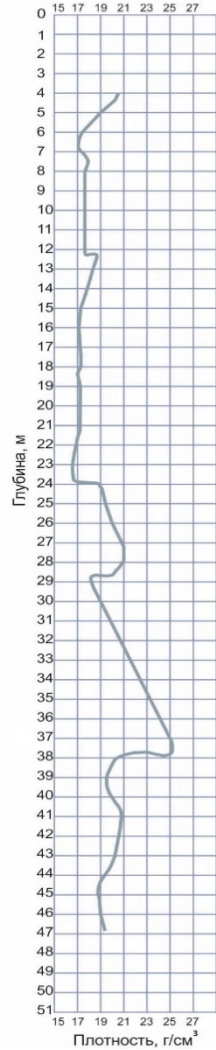


График изменения влажности с глубиной

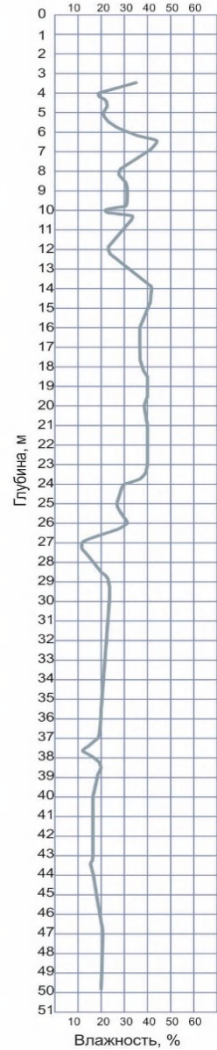


График изменения ТНЗ с глубиной

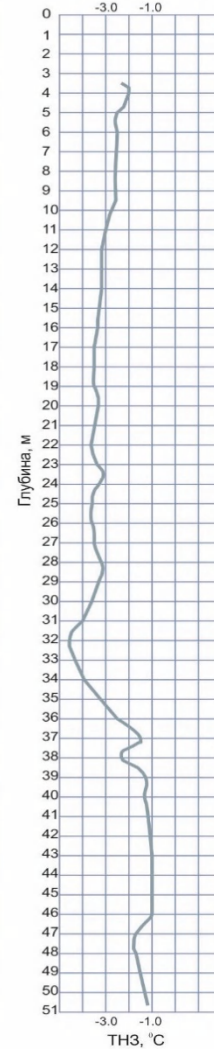


График изменения температуры с глубиной

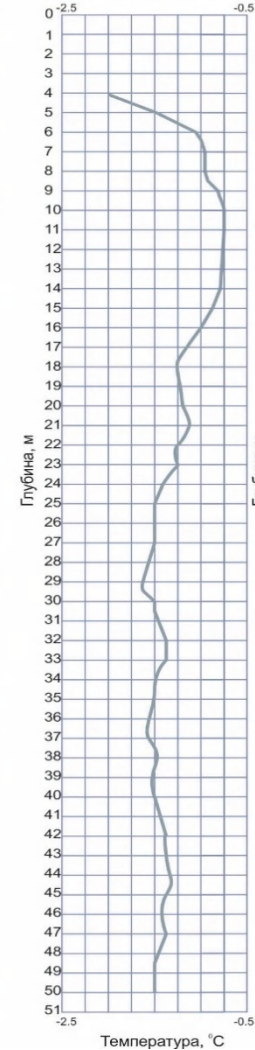
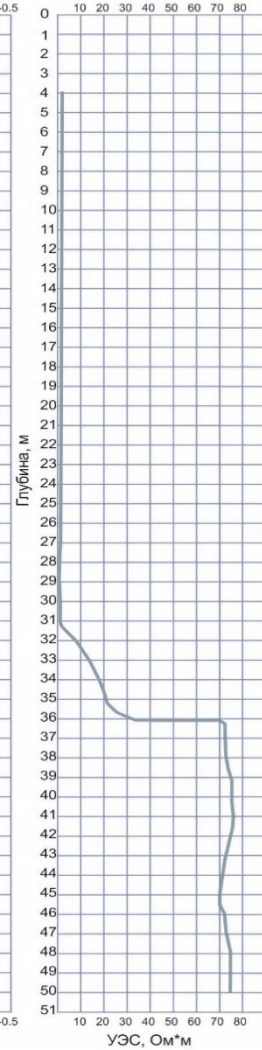


График изменения УЭС с глубиной



А 3. Опорный разрез 3 (Вилькицкого)

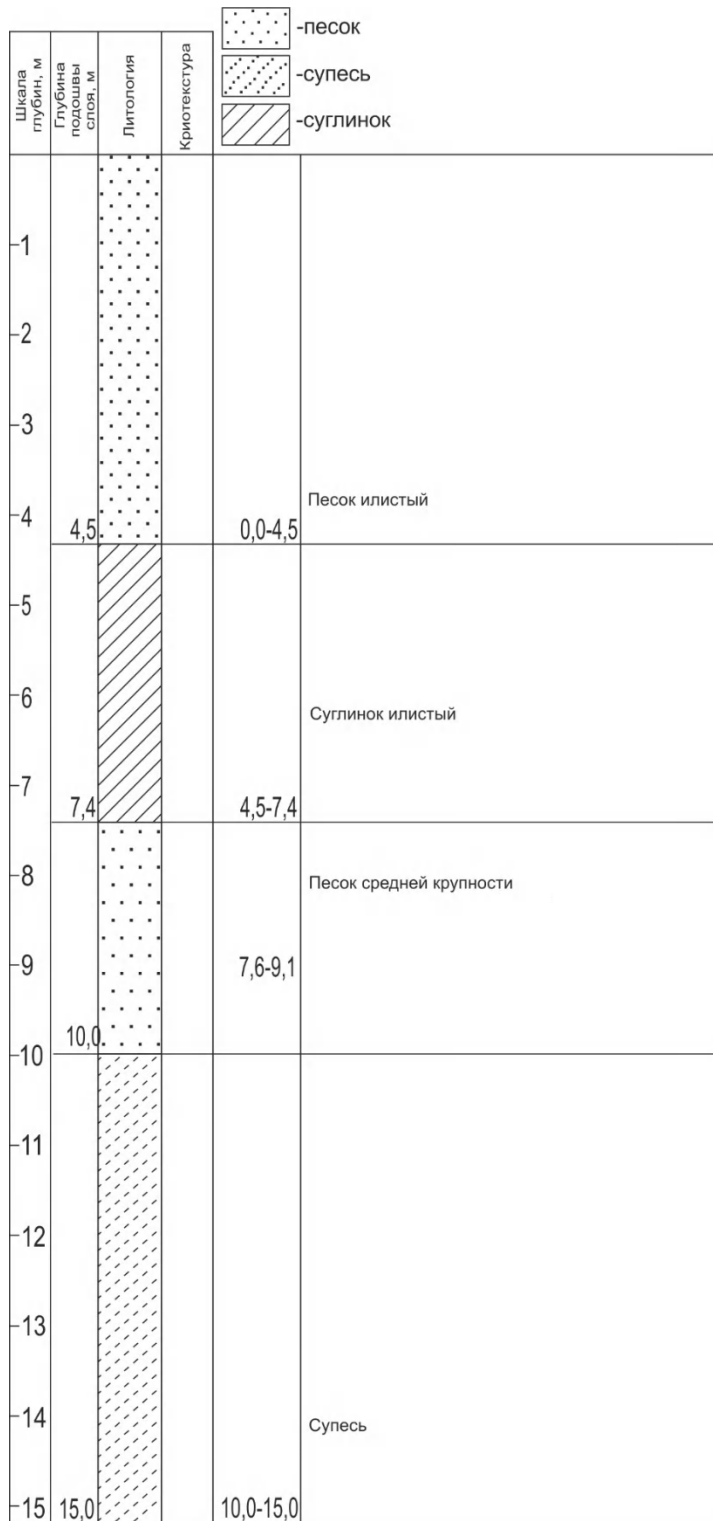


График изменения плотности с глубиной

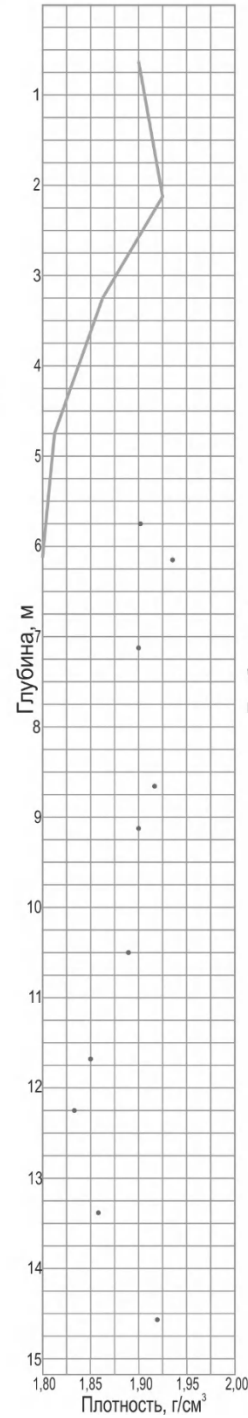
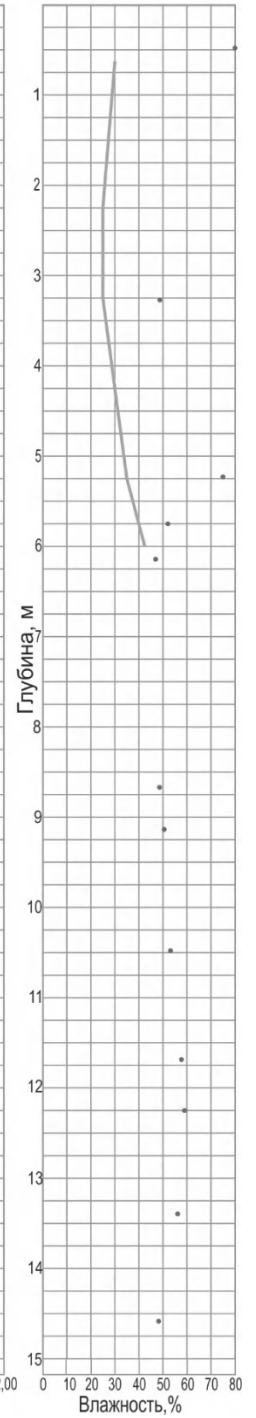


График изменения влажности с глубиной



А 4. Опорный разрез 4 (Диксон)

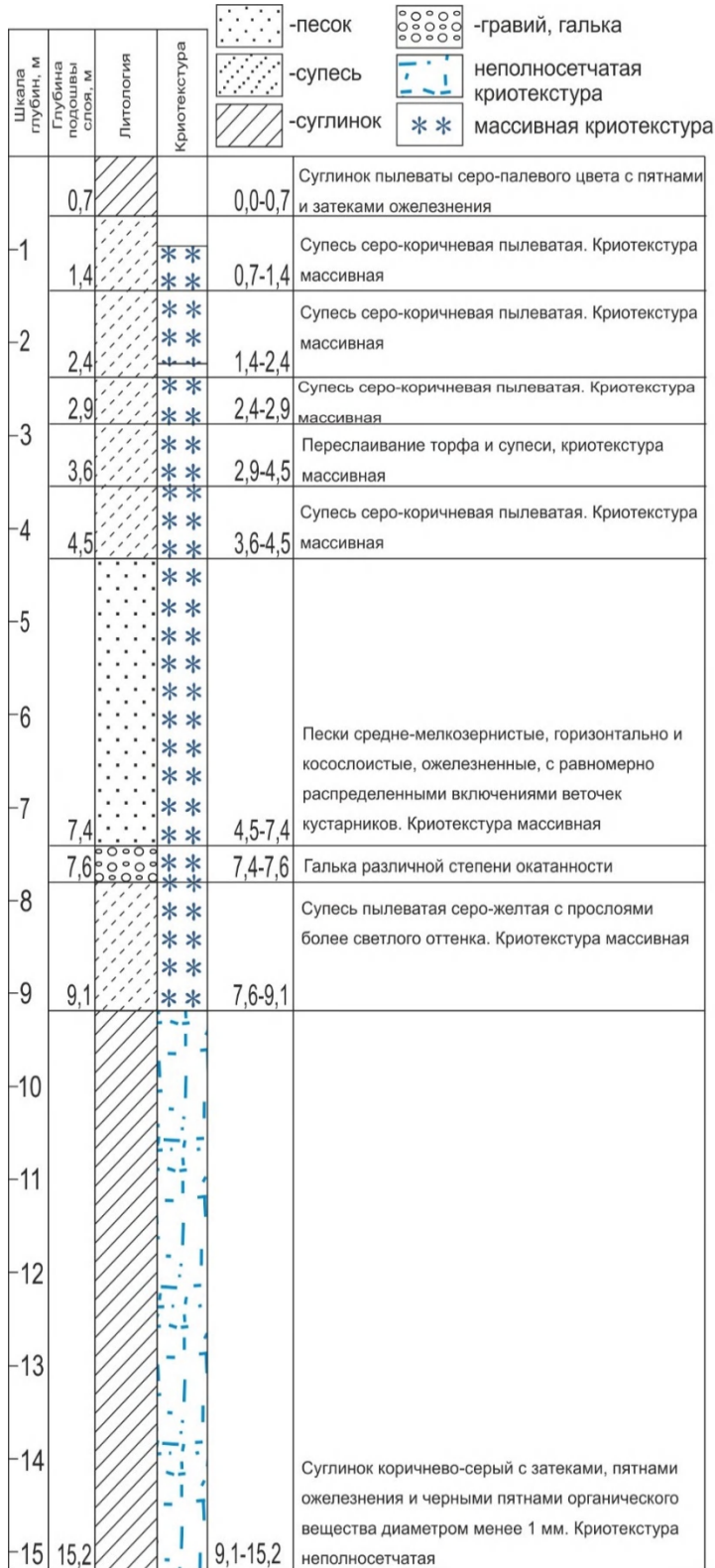


График изменения плотности с глубиной

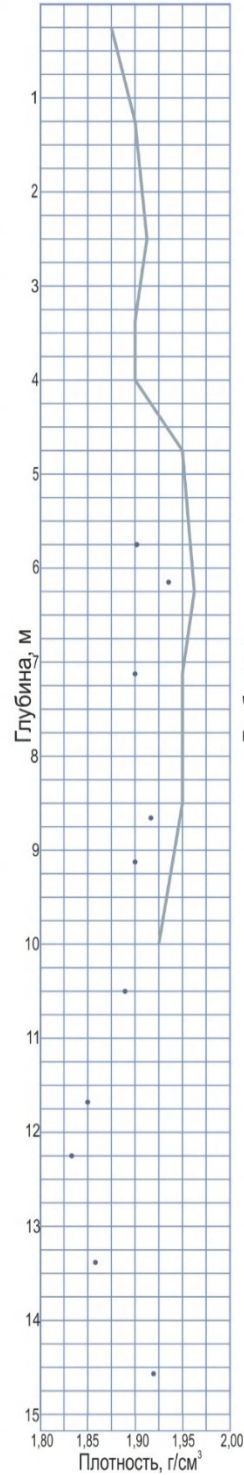
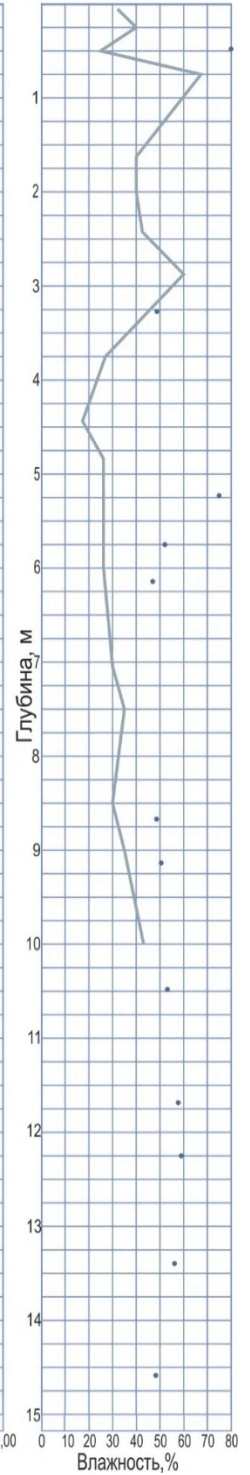


График изменения влажности с глубиной



А 5. Опорный разрез 5 (о. Белый)

Шкала глубин, м	Глубина подошвы слоя, м	Литология	Криотекстура	Описание
2	8,2	песок		Песок пылеватый тёмно-серый, одонасыщенный, средней плотности сложения, с ракушечным детритом и целыми створками раковин моллюсков, насыщен гидротроилитом. В начале и нтервала с частыми прослоями суглинка текучепластичного тёмно серого. КERN с запахом H2S.
4				
6				
8				
10	16,5	суглинок		Суглинок текучий зеленовато-серый, с прослоями песка пылеватого серого, с гнёздами гидротроилита, с рассеянным ракушечным детритом. КERN с запахом H2S.
12				
14				Суглинок текучепластичный зеленовато-серый, с гнёздами и прослоями песка пылеватого, серого, с пятнами гидротроилита, с рассеянным ракушечным детритом. По керну газопроявления в виде пузырьков на поверхности.
16				
18				
20	22,0	песок		Песок пылеватый тёмно-серый, средней плотности сложения, водонасыщенный, с редкими окатышами суглинка серого. Контакт с подстилающим слоем резкий, по смене литологии.
22				
24	25,0	песок		Песок пылеватый тёмно-серый, средней плотности сложения, водонасыщенный, с редкими окатышами суглинка серого. Контакт с подстилающим слоем резкий, по смене литологии.
26				
28				
30	30,5	суглинок		Суглинок тугопластичный з еленовато-серый, песчанистый, текстура массивная, с редкими примазками гидротроилита, с гнёздами, прожилками песка пылеватого серого.
32			** **	
34			** **	
36	37,5	суглинок	** **	Суглинок пластичномёрзлый зеленовато-серый, массивной криотекстуры, с пятнами гидротроилита, с включениями линз чистого льда толщиной от 2 до 5 мм, с единичными включениями песка пылеватого серого. В кровле слоя (инт. 31.7-31.8 м) прослойка чистого льда мощностью до 3 мм. Видимые включения льда составляют 5-10 %.
38			** **	
40			** **	
42			** **	
44	45,5	песок	** **	Песок пылеватый тёмно-серый, средней плотности сложения, водонасыщенный, с единичными включениями растительных остатков.
46			** **	
48	50,0	суглинок	** **	Суглинок текучепластичный зеленовато-серый, с примазками гидротроилита, с редкими присыпками и гнёздами песка пылеватого, серого, текстура листовая.

График изменения плотности с глубиной

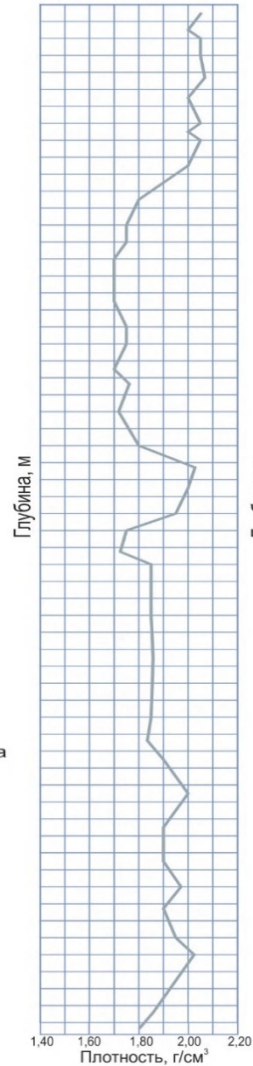


График изменения влажности с глубиной

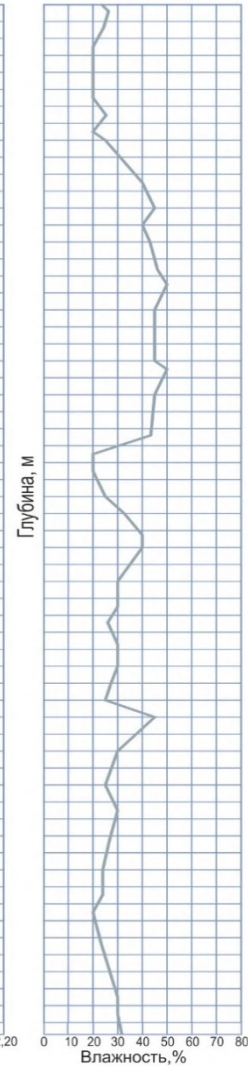


График изменения ТНЗ с глубиной

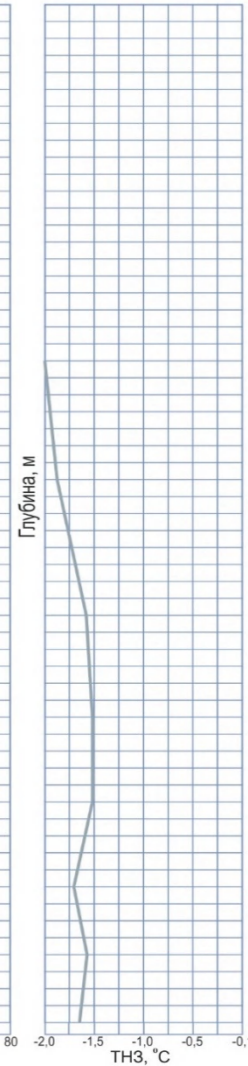
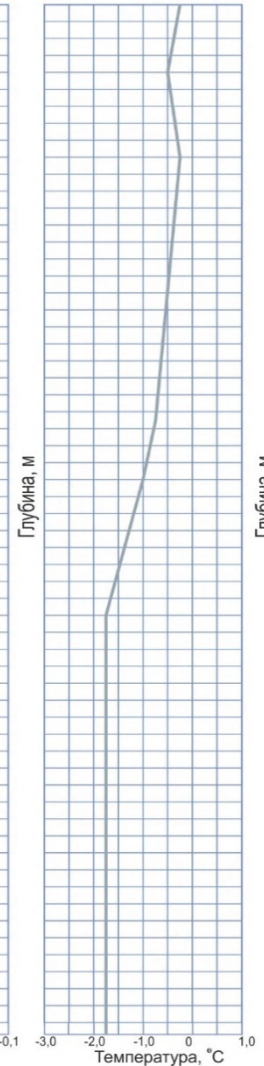
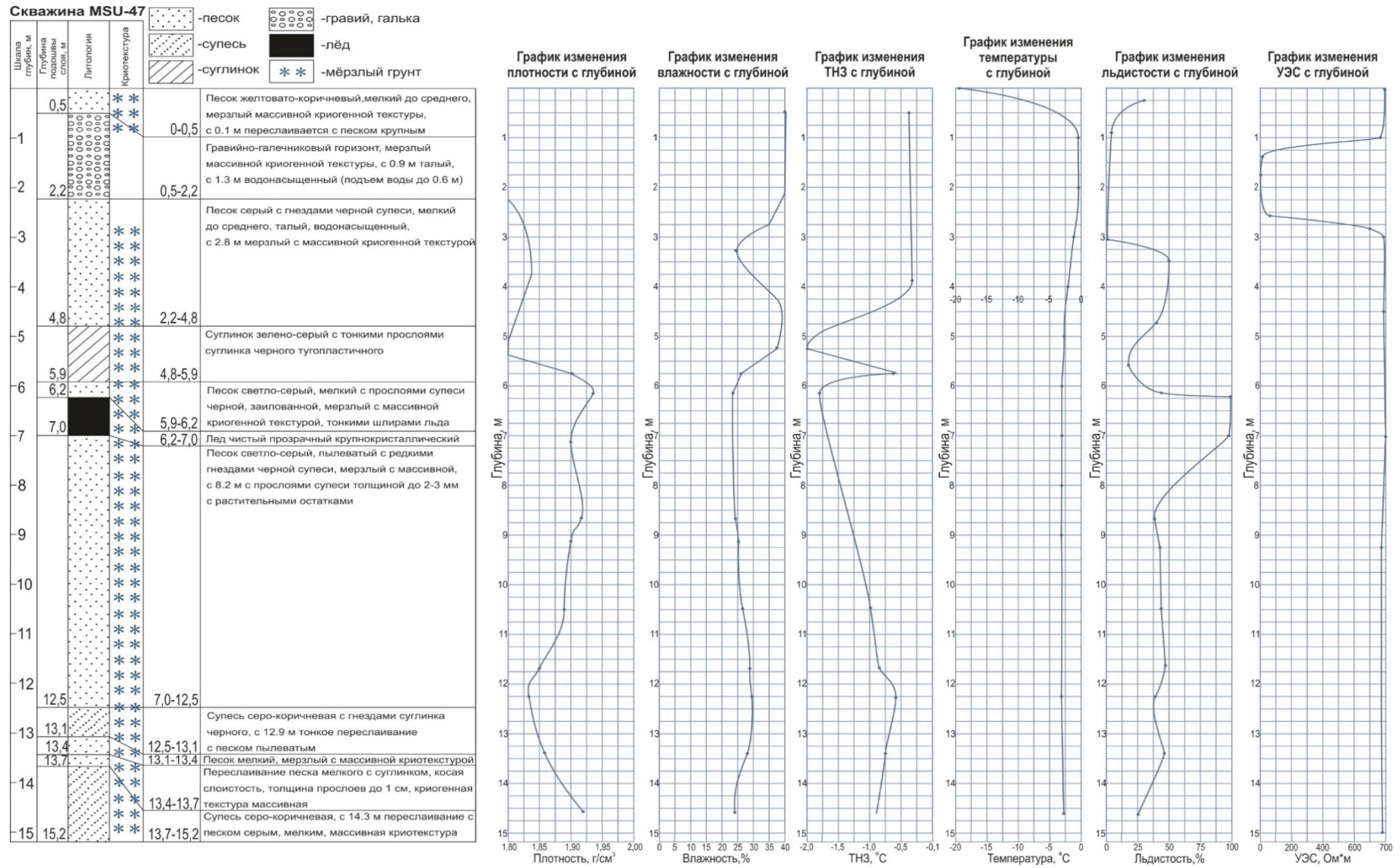


График изменения температуры с глубиной



А 6. Опорный разрез 6 (Байдарацкая губа)



А 7. Опорный разрез 7 (Печорское море)

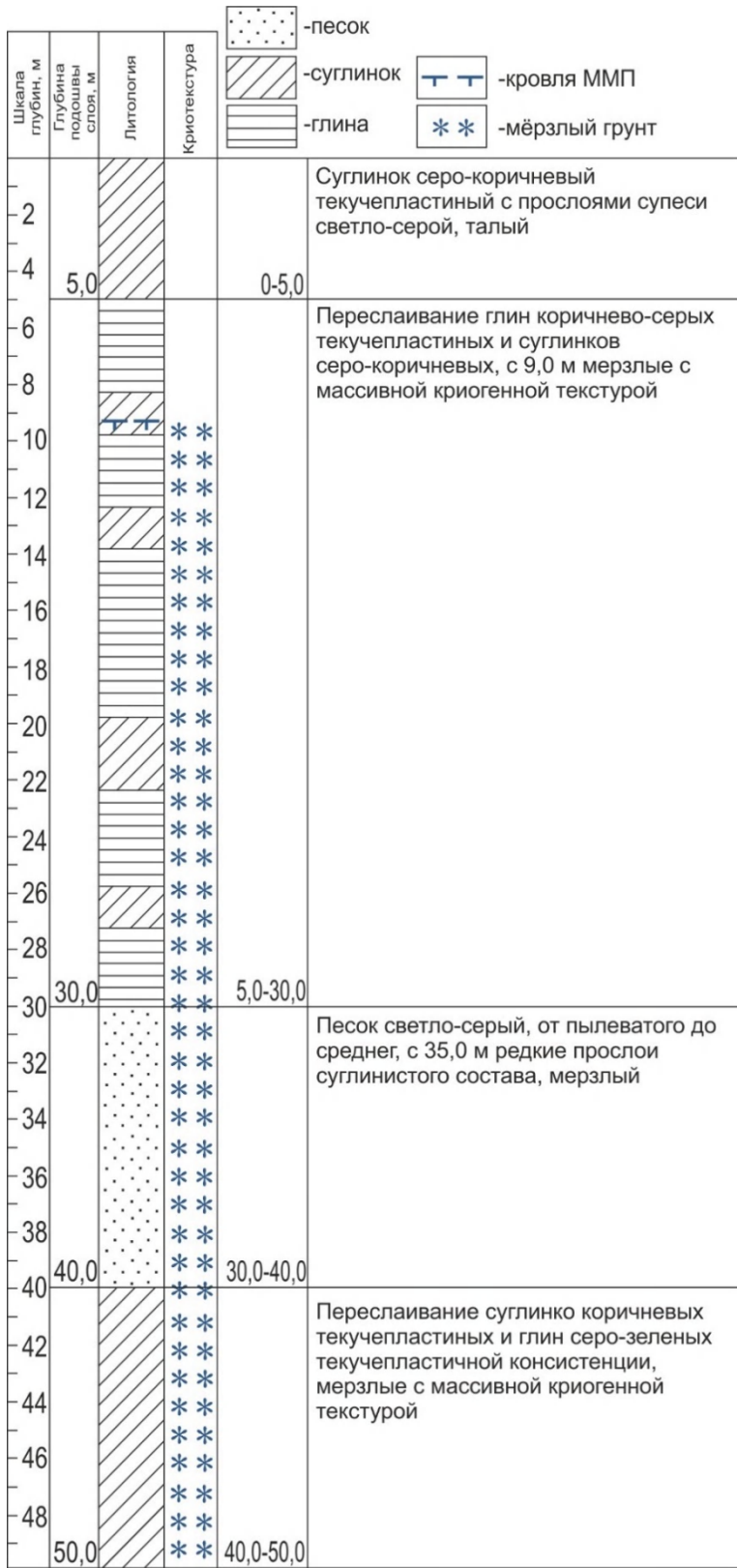


График изменения плотности с глубиной

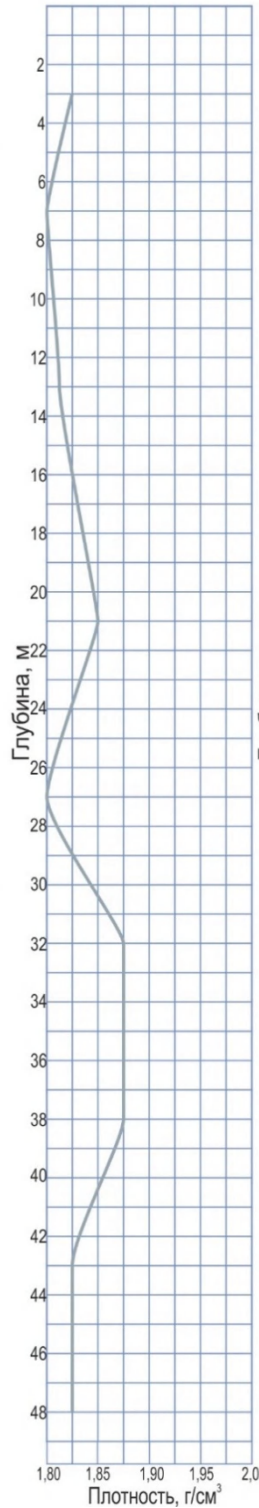
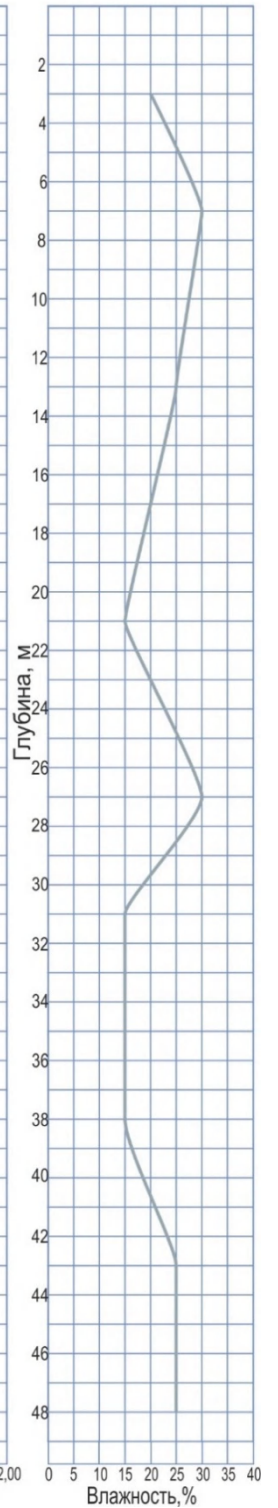


График изменения влажности с глубиной



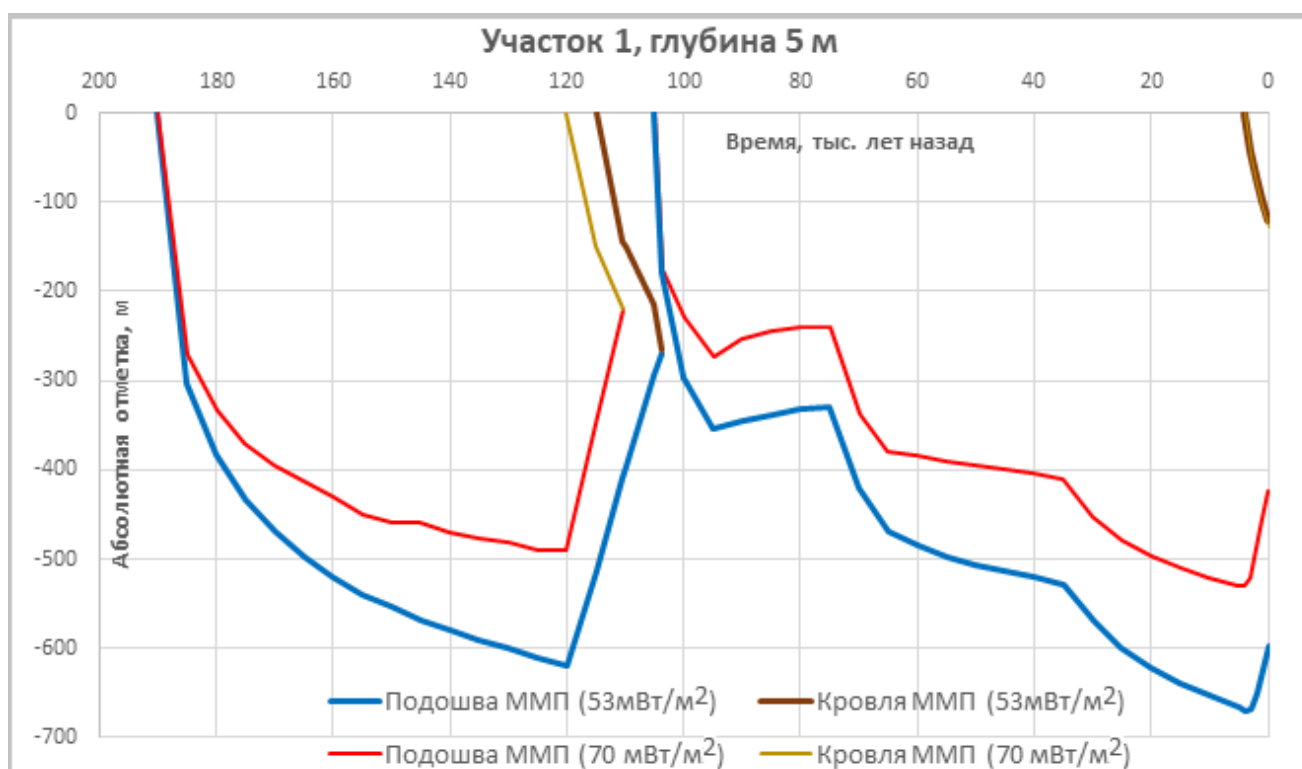
Приложение Б. Тепловые модели опорных участков арктического шельфа

Тепловые модели рассчитаны автором для верификации геофизических данных, оценки глубины кровли и подошвы ММП для ключевых участков (1 – Тикси, 2 – Хатангский залив, 3 – прол. Вилькицкого, 4 – о. Диксон, 5 – о. Белый, 6 – Байдарацкая губа, 7 – Печорское море). На основании этих данных был сделан вывод о невозможности определения глубин подошвы ММП по данным ЗСБ.

Б 1.

Опорный участок 1, изобата 5 м

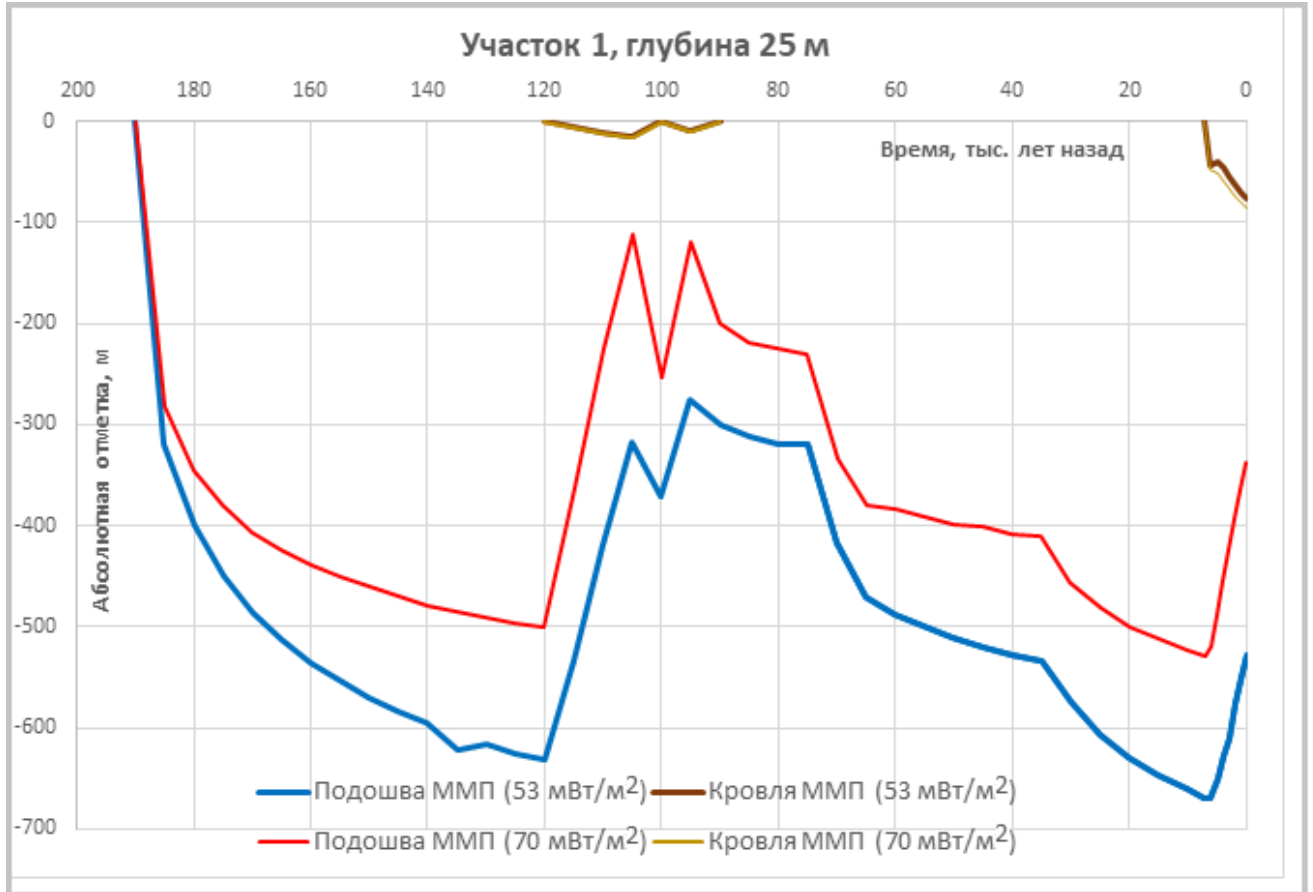
Глубины кровли и подошвы ММП



Б 2.

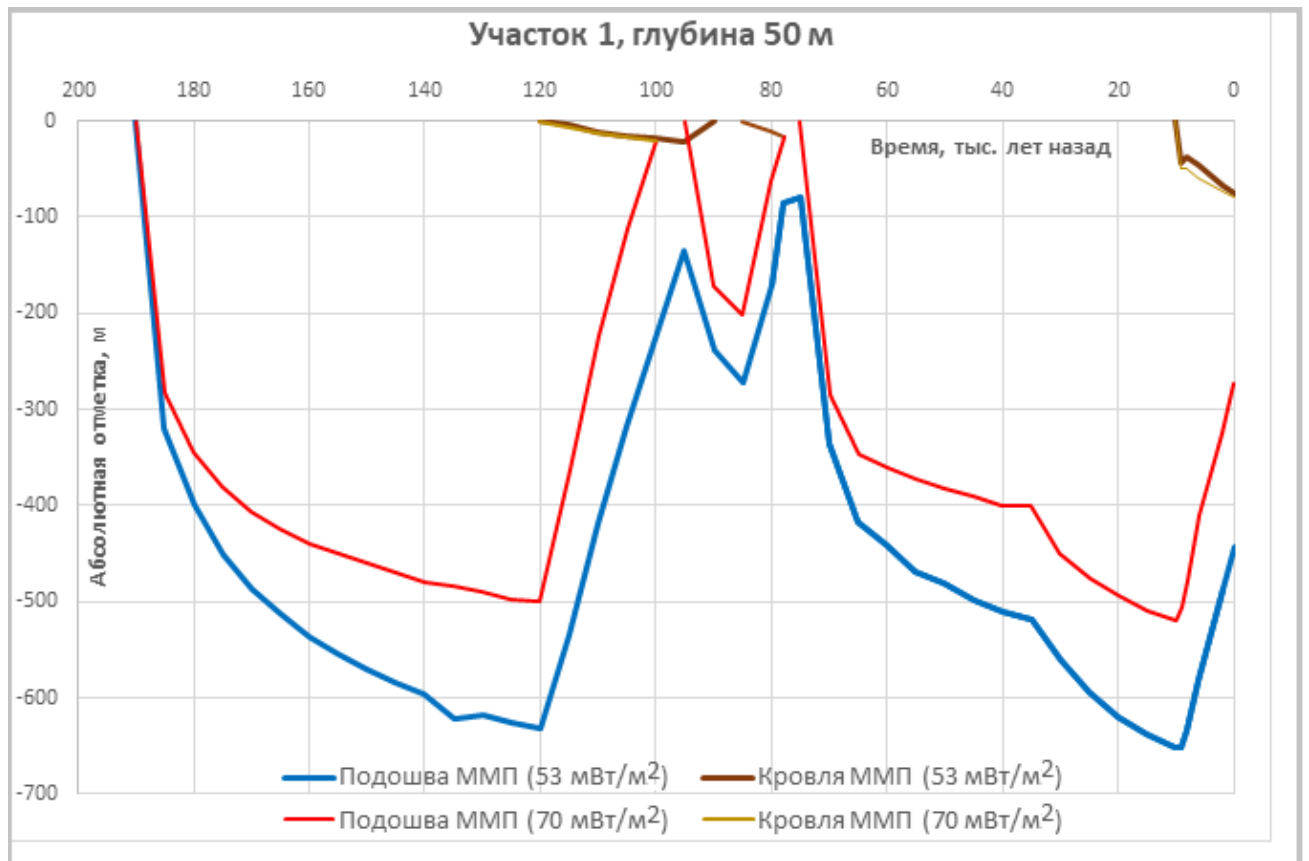
Опорный участок 1, изобата 25 м

Глубины кровли и подошвы ММП



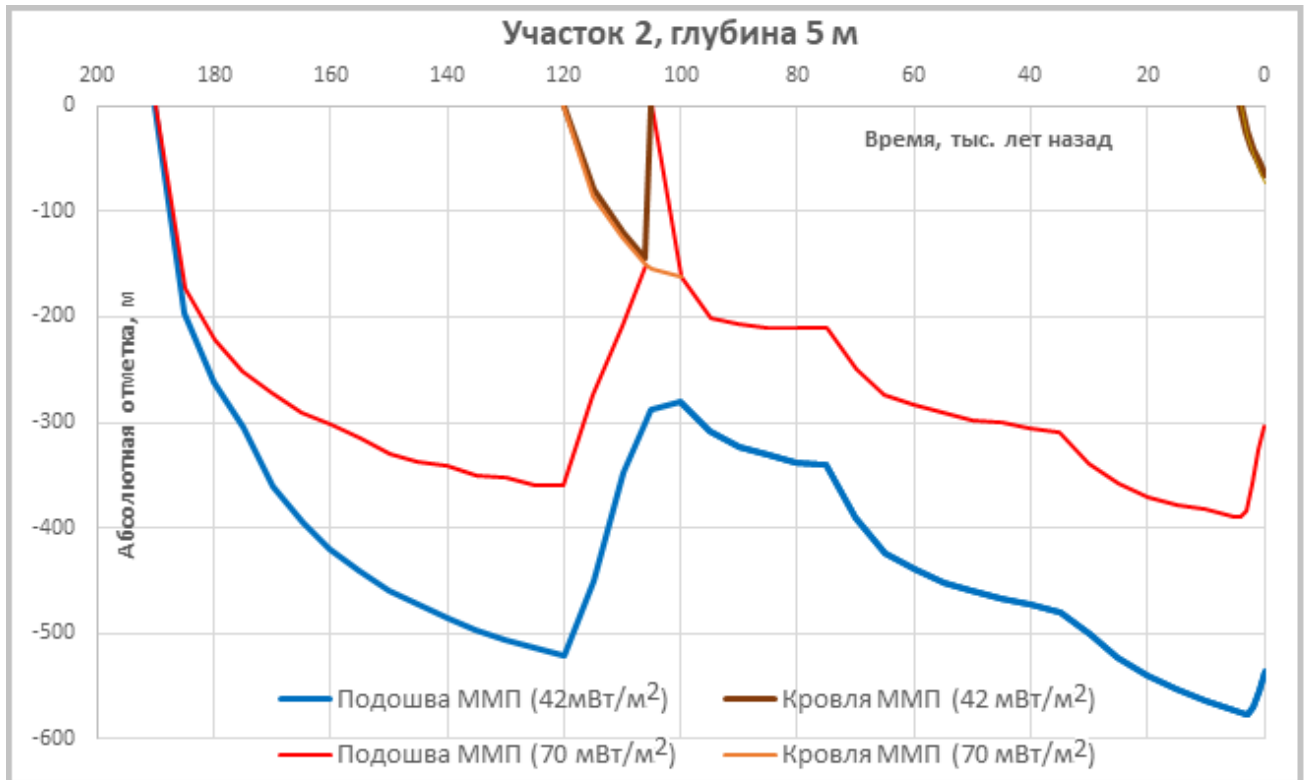
Опорный участок 1, изобата 50 м

Глубины кровли и подошвы ММП



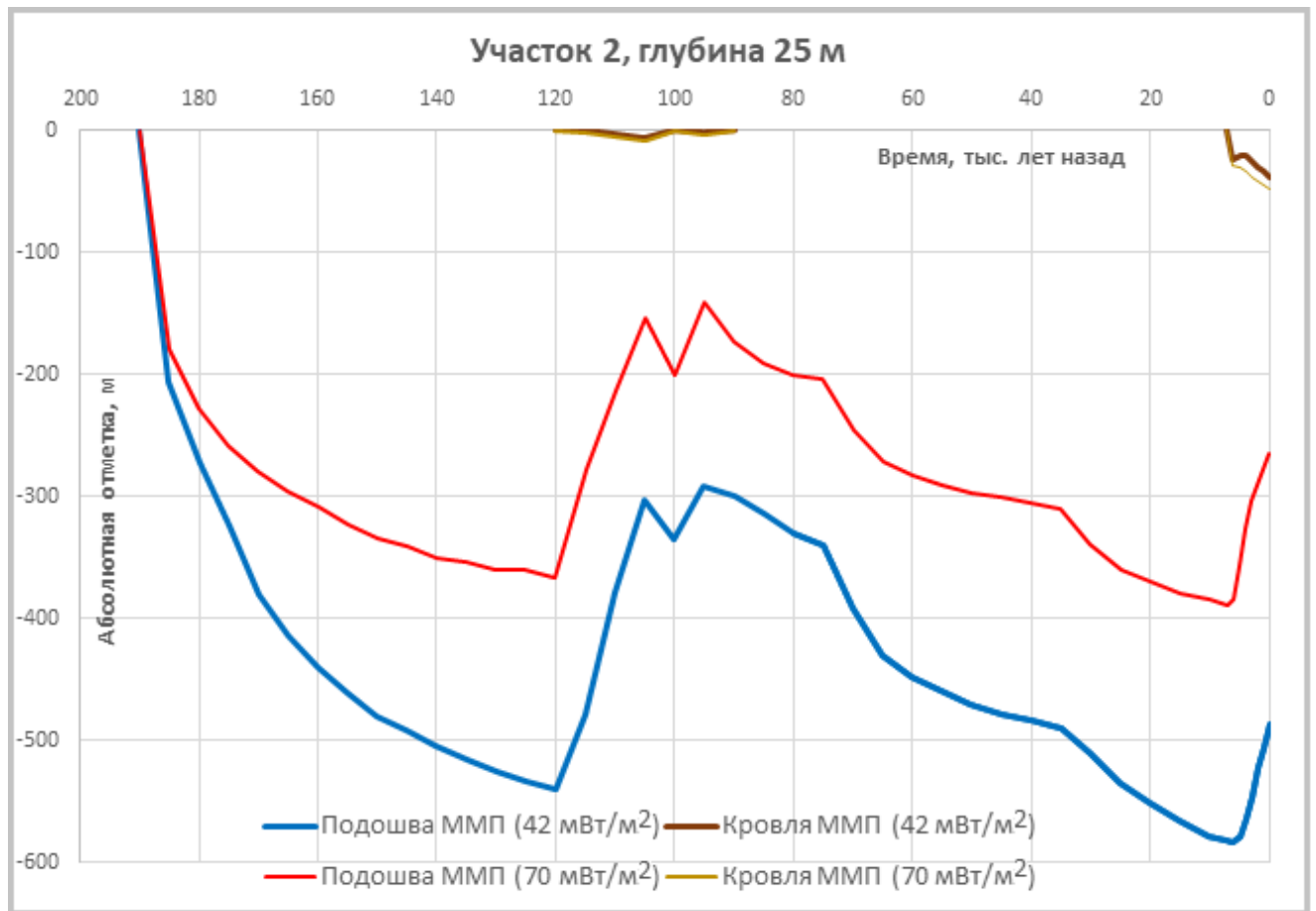
Опорный участок 2, изобата 5 м

Глубина подошвы ММП



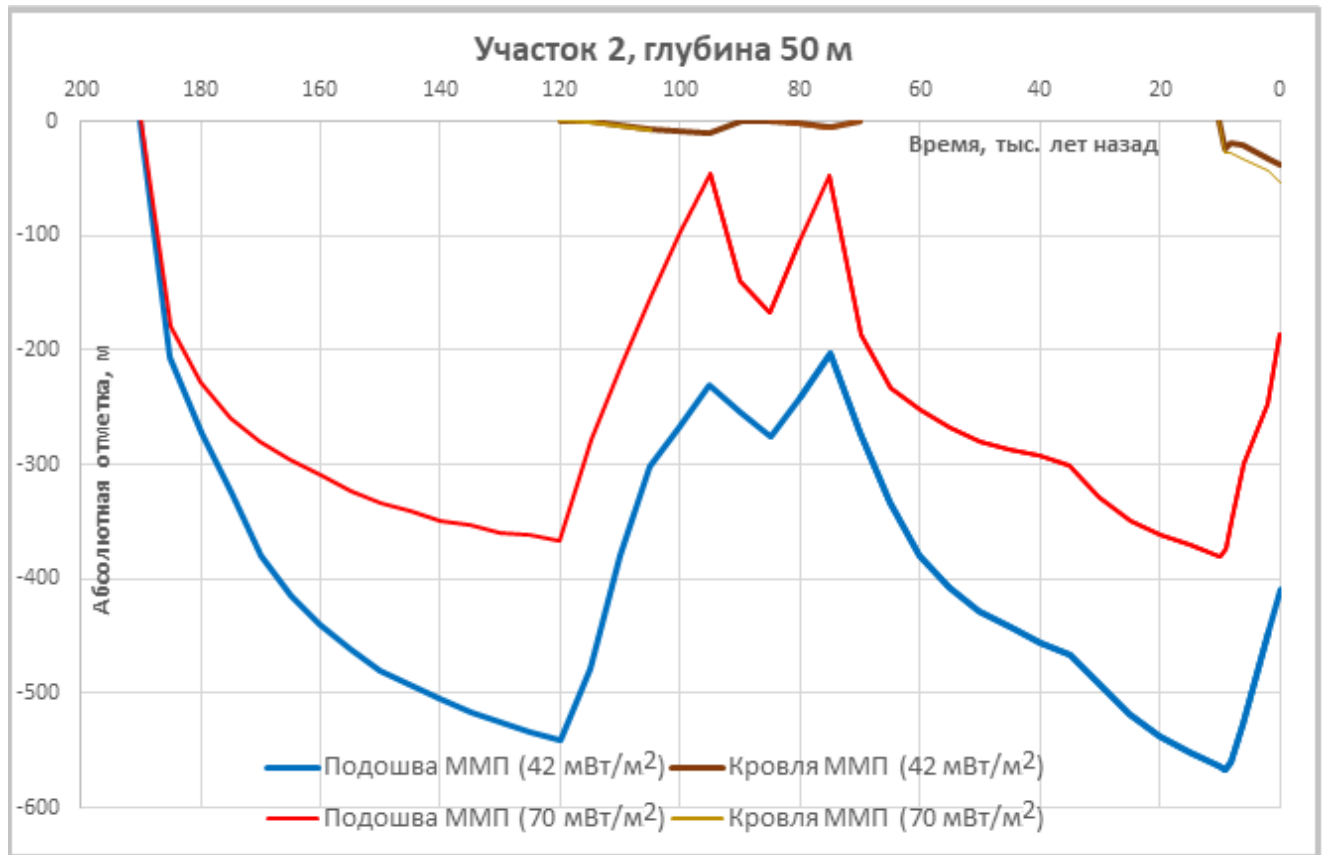
Опорный участок 2, изобата 25 м

Глубина подошвы ММП



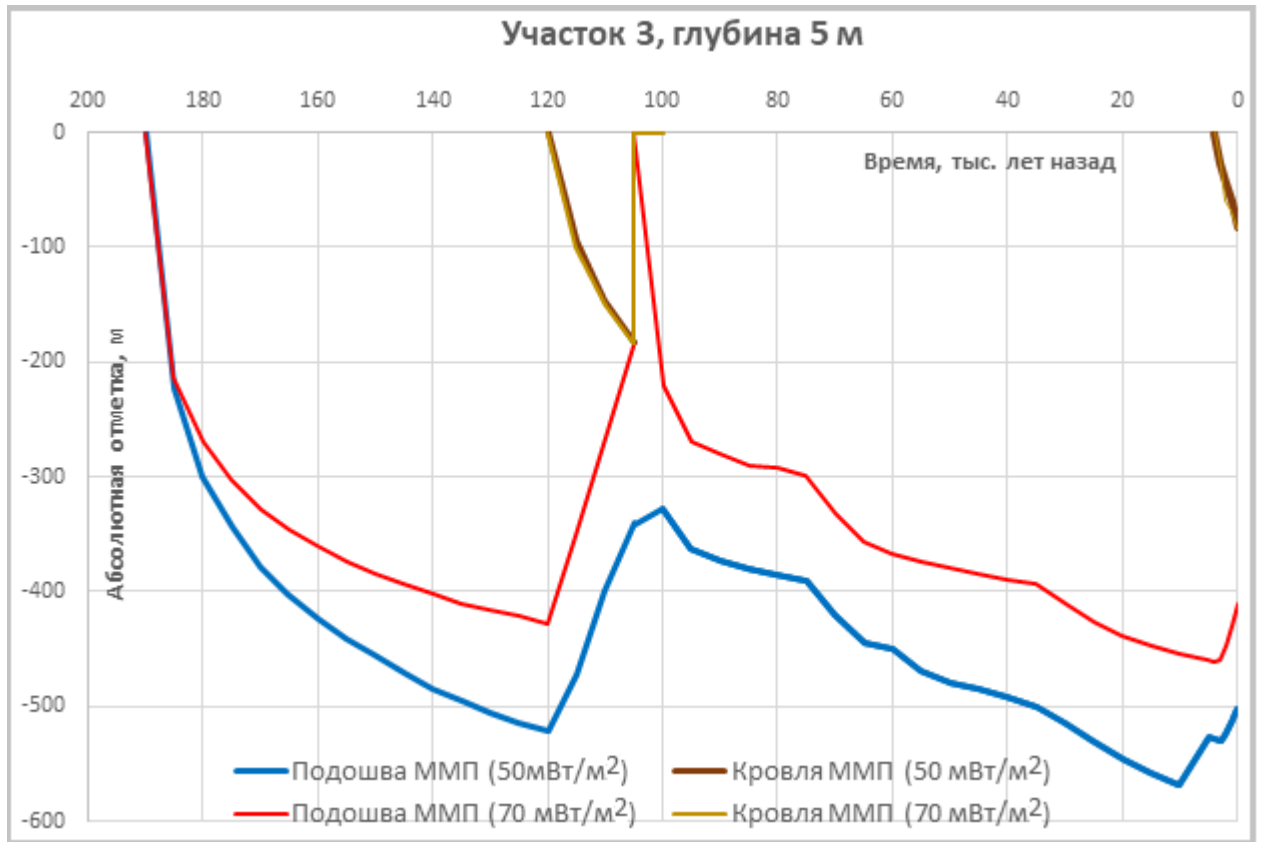
Опорный участок 2, изобата 50 м

Глубина кровли и подошвы ММП



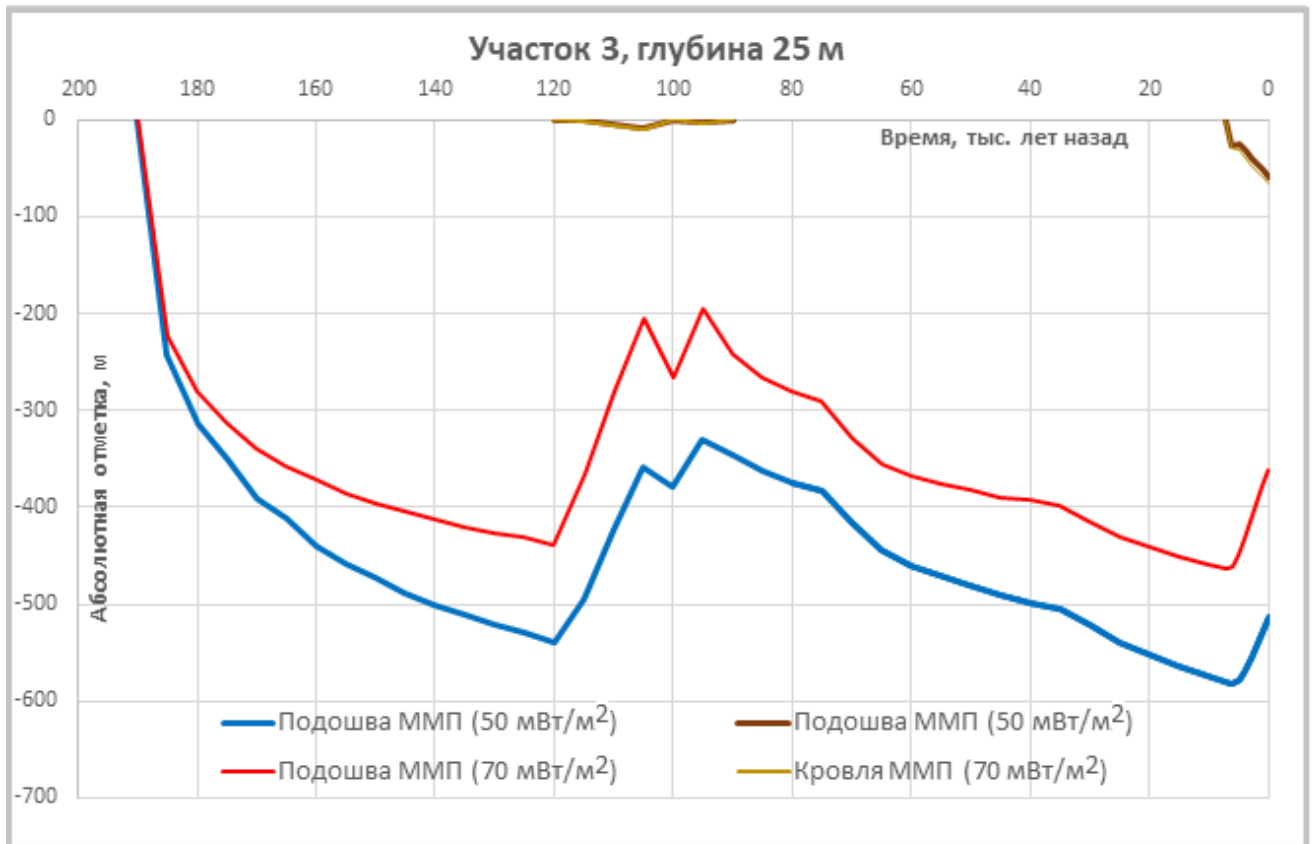
Опорный участок 3, изобата 5 м

Глубина кровли и подошвы ММП



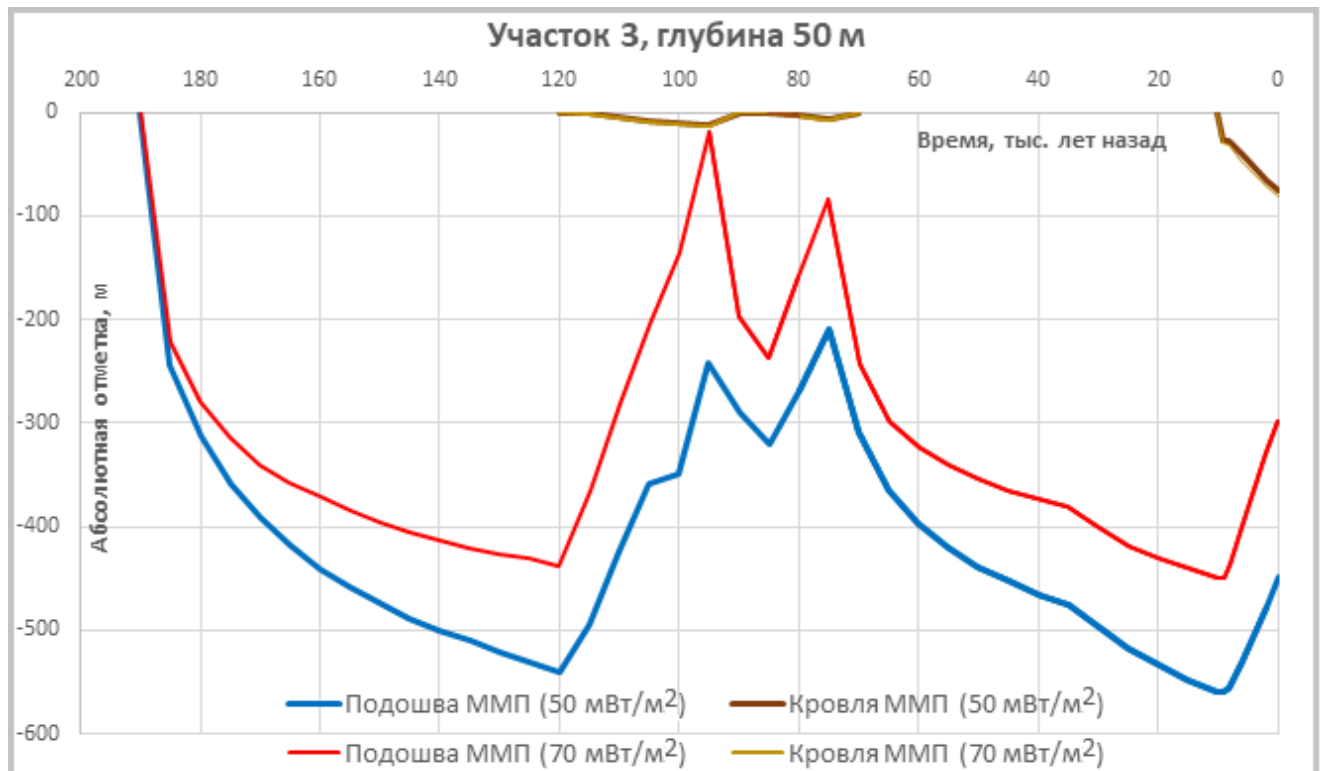
Опорный часток 3, изобата 25 м

Глубина кровли и подошвы ММП



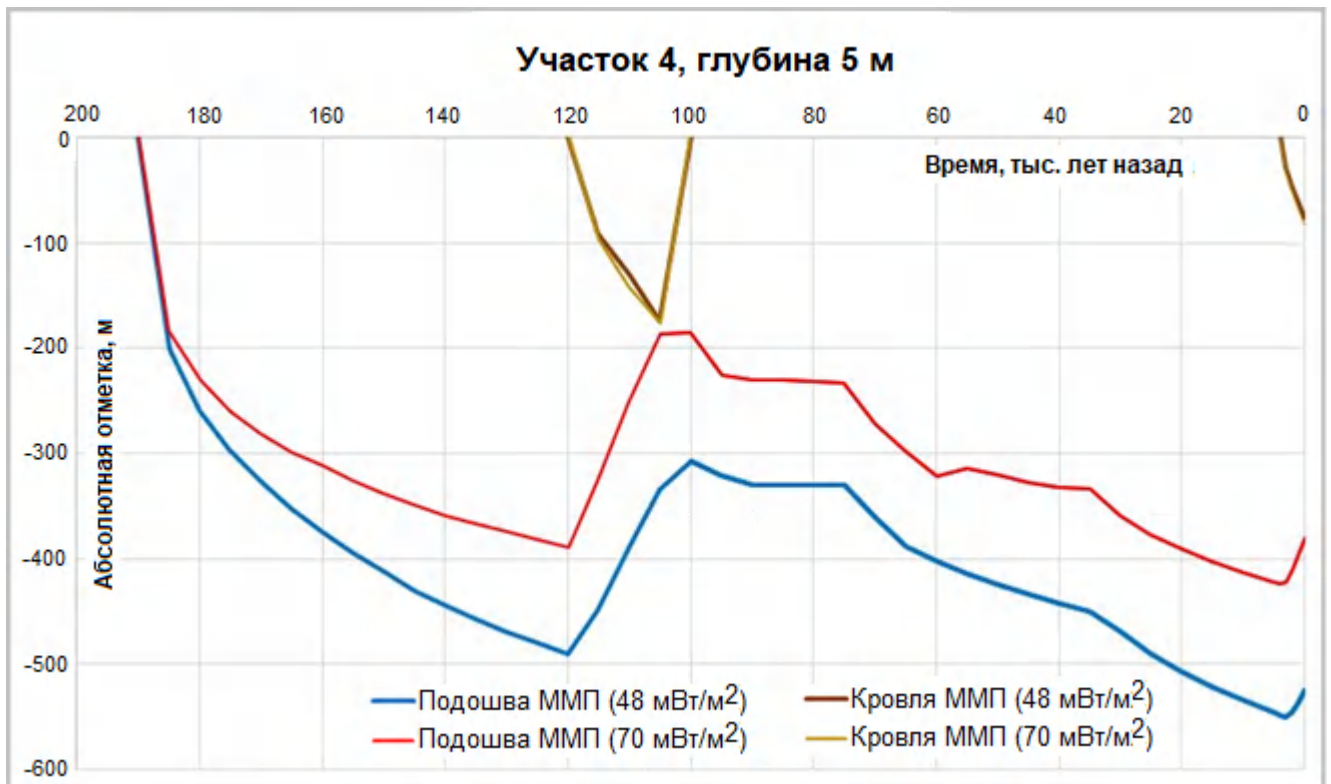
Опорный участок 3, изобата 50 м

Глубина кровли и подошвы ММП



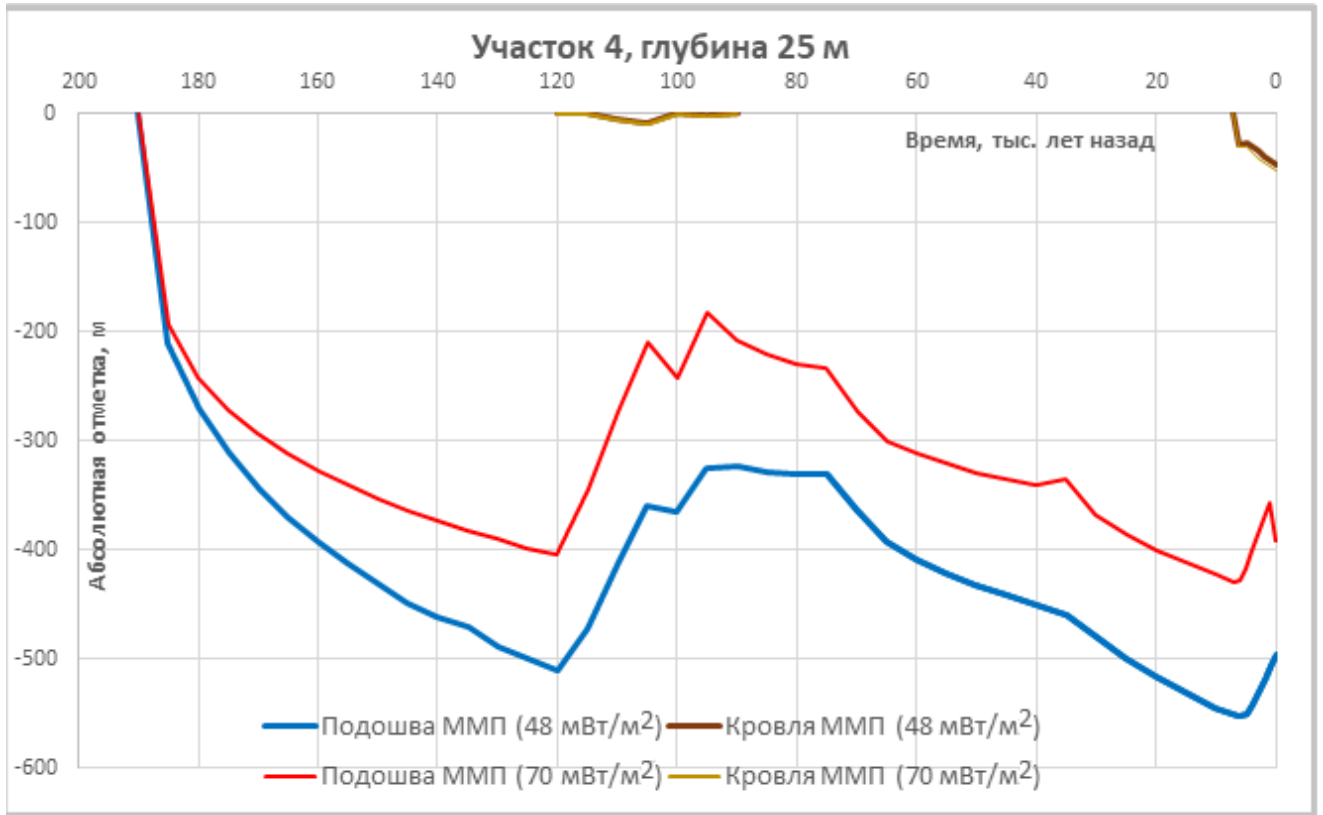
Опорный участок 4, изобата 5 м

Глубины кровли и подошвы ММП



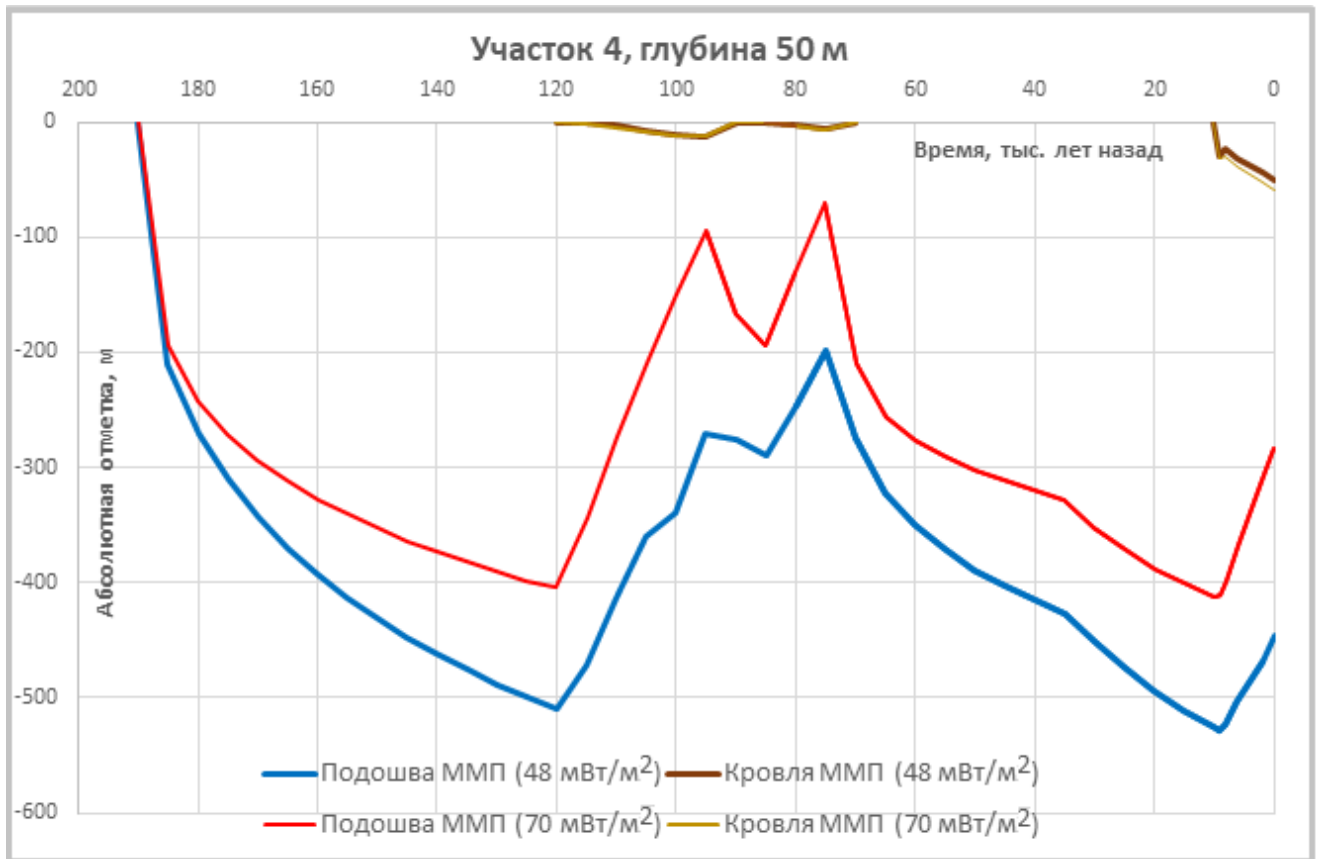
Опорный участок 4, изобата 25 м

Глубины кровли и подошвы ММП

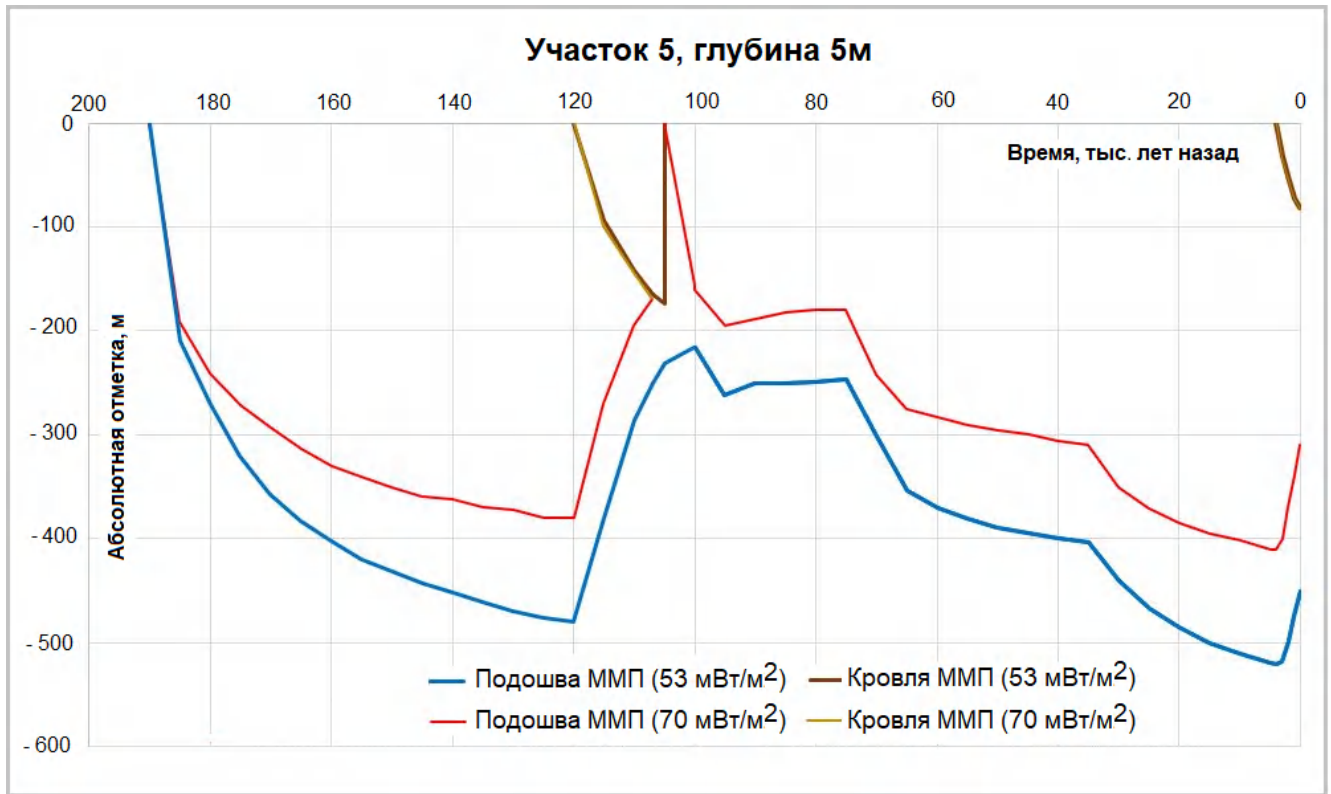


Опорный участок 4, изобата 50 м

Глубины кровли и подошвы ММП

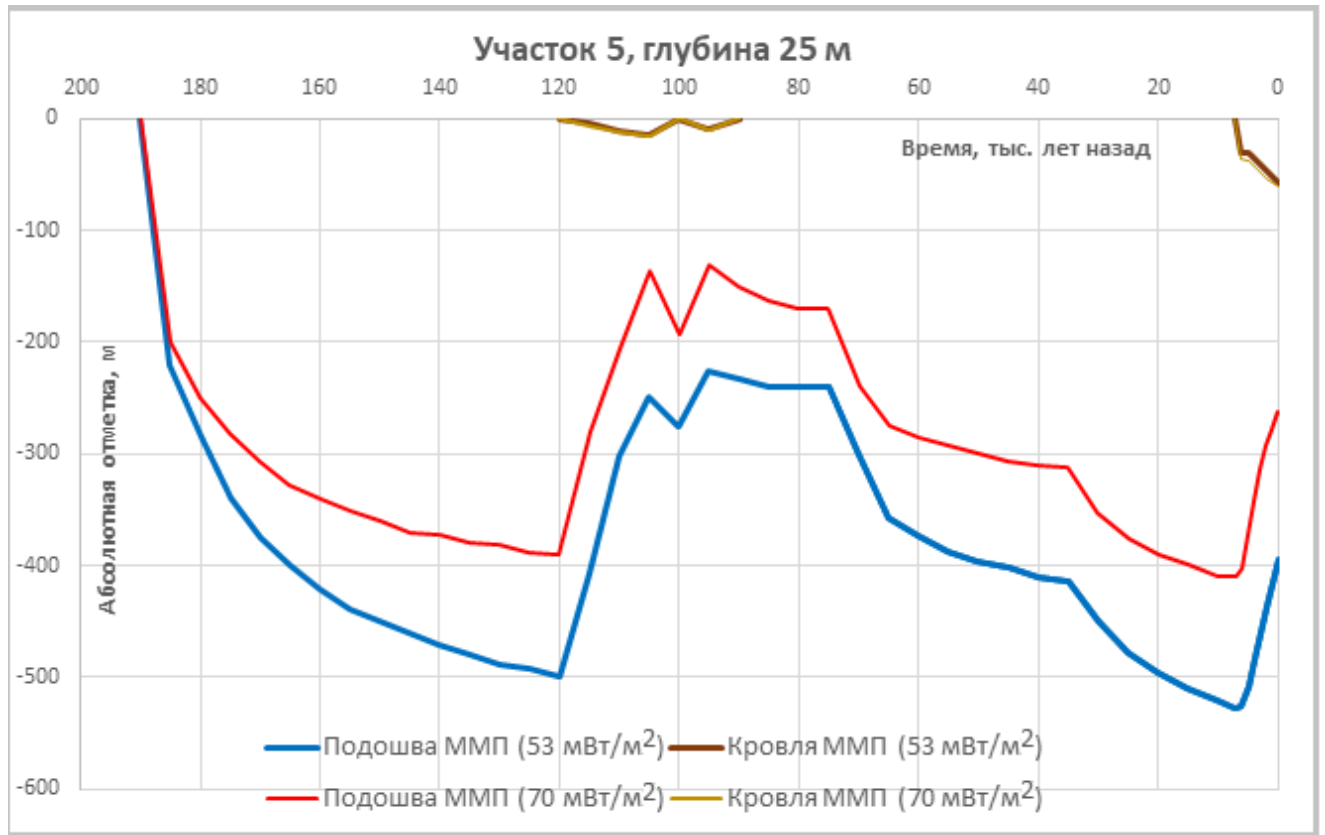


Опорный участок 5, изобата 5 м
Глубины кровли и подошвы ММП



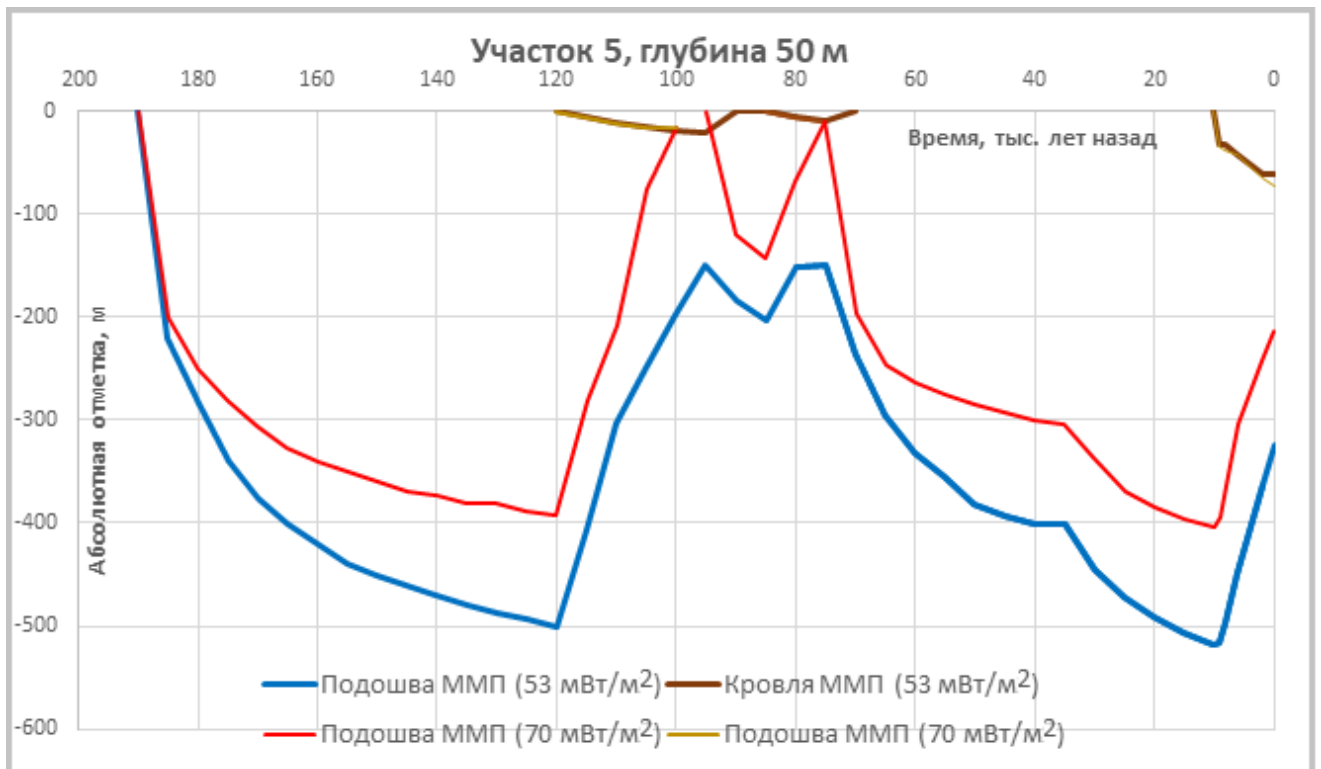
Опорный участок 5, изобата 25 м

Глубины подошвы ММП



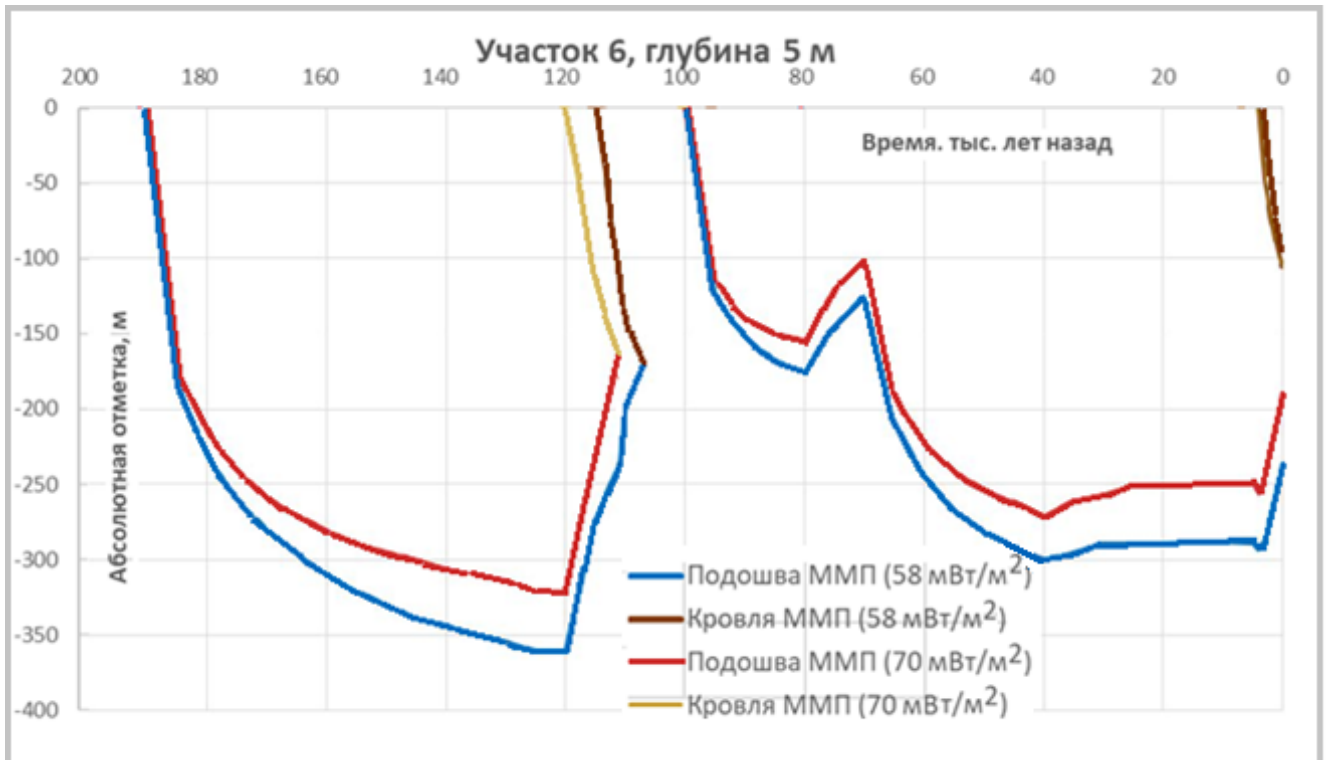
Опорный участок 5, изобата 50 м

Глубины подошвы ММП



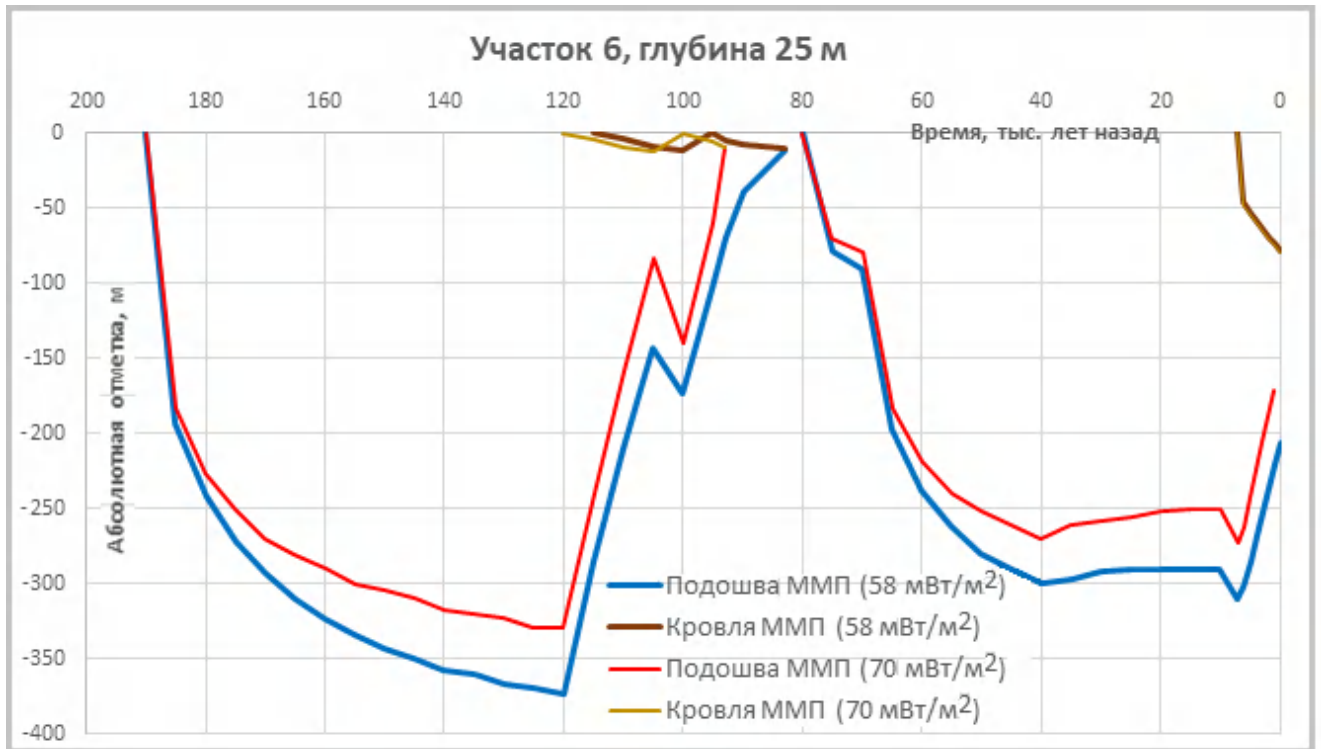
Опорный участок 6, изобата 5 м

Глубины кровли и подошвы ММП



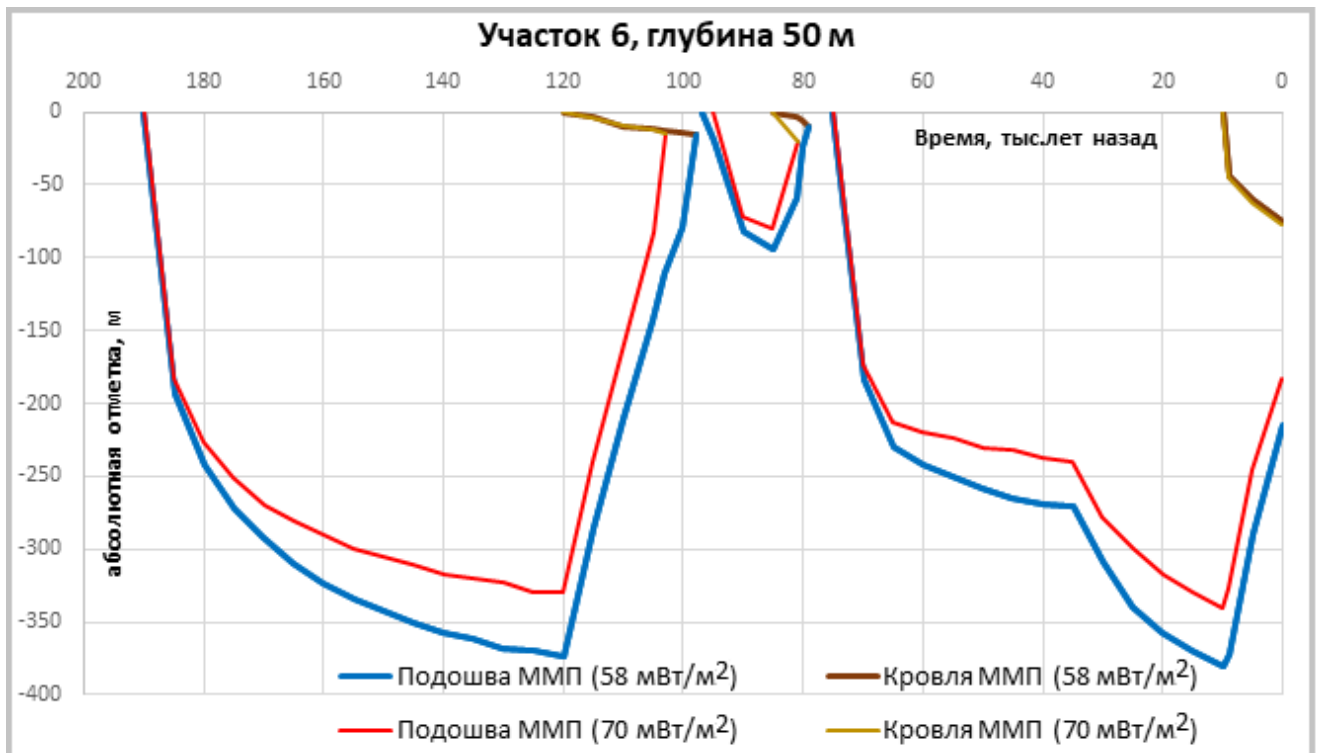
Опорный участок 6, изобата 25 м

Глубины кровли и подошвы ММП



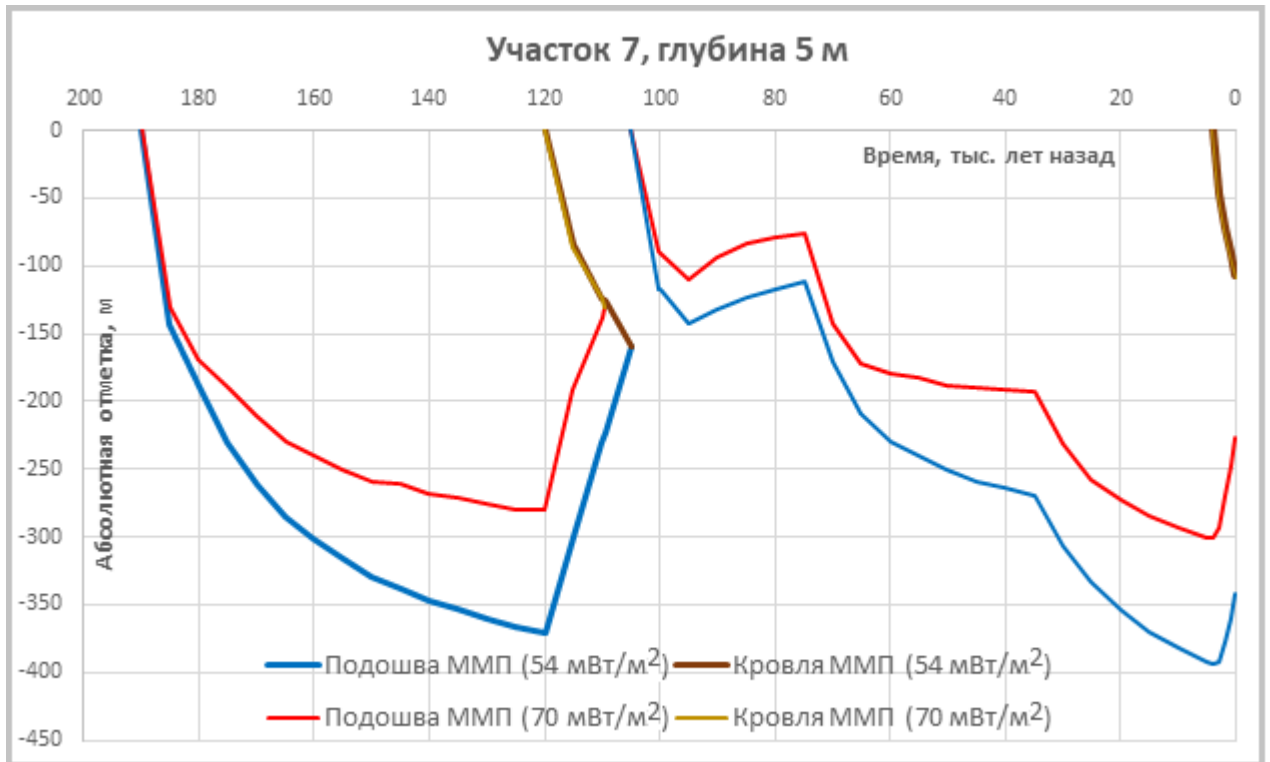
Опорный участок 6, изобата 50 м

Глубины кровли и подошвы ММП



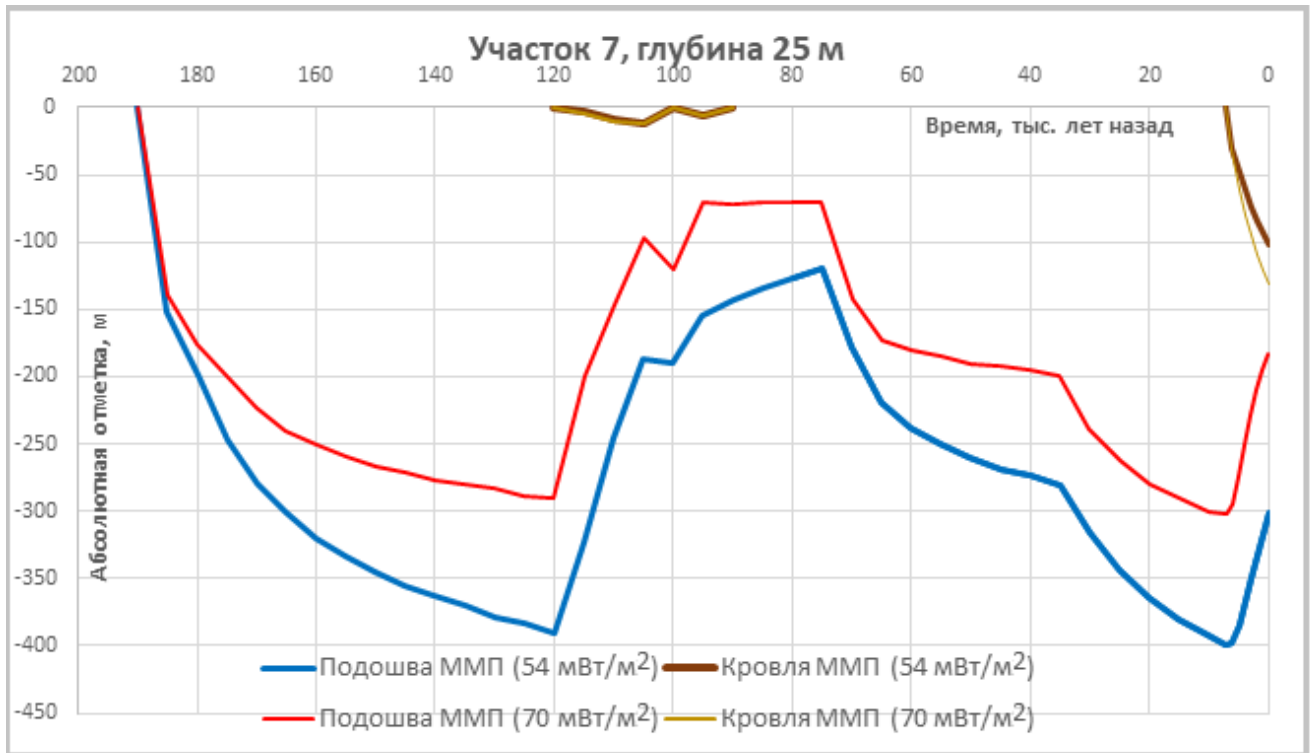
Опорный участок 7, изобата 5 м

Глубины кровли и подошвы ММП



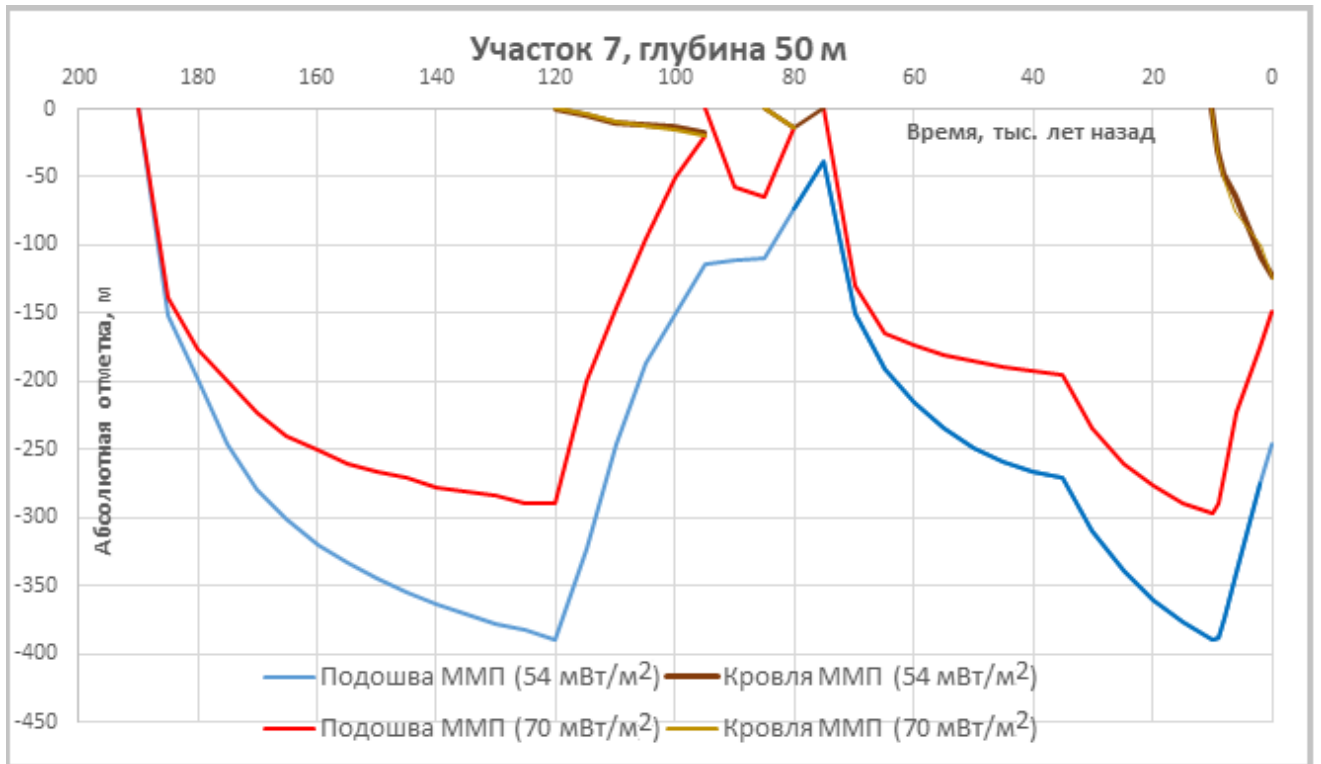
Опорный участок 7, изобата 25 м

Глубины кровли и подошвы ММП



Опорный участок 7, изобата 50 м

Глубины кровли и подошвы ММП



Приложение В. Комплект документации по сертификации средства измерения
косы цифровые термометрические

Сертификация кос цифровых термометрических выполнена автором для получения достоверных данных по температуре пород на шельфе. Определение температуры пород на шельфе является неотъемлемой частью методики изучения многолетнемерзлых пород автора. Измерения температуры пород с помощью кос цифровых термометрических были использованы автором при выполнении работ по разработанной методике на объектах: Чаунская губа шельф Чукотского моря (2015), Приямальский шельф район о. Белый шельф Карского моря (20162017 гг.), Хатангский залив шельф моря Лаптевых (2017).

В 1.

Сертификат Средства Измерения СИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО
об утверждении типа средств измерений

RU.C.32.002.A № 66600

Срок действия до 20 июля 2022 г.

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
Косы цифровые термометрические КЦТ

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
Общество с ограниченной ответственностью "МГУ-геофизика" (ООО "МГУ-геофизика"), г. Москва

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 68028-17

ДОКУМЕНТ НА ПОВЕРКУ
651-16-32

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ 3 года

Тип средств измерений утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2017 г. № 1584

Описание типа средств измерений является обязательным приложением к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства

С.С.Голубев

" 31 " 07 2017 г.

Серия СИ

№ 030133

ОПИСАНИЕ ТИПА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Косы цифровые термометрические КЦТ

Назначение средства измерений

Косы цифровые термометрические КЦТ (в дальнейшем – косы или КЦТ) предназначены для измерений, регистрации, длительного хранения и передачи в цифровой форме распределения температуры в скважине.

Описание средства измерений

Косы являются программно-техническими комплексами. В состав входят регистрирующее устройство (логгер) и гирлянда термометрических датчиков (термогирлянда). Термогирлянда подключается к логгеру с помощью быстросъемного разъема.

Логгер представляет собой герметичное устройство, содержащее батареи питания и электронный модуль. На боковые стороны логгера выведены разъемы для подключения термогирлянды и кабеля связи.

Термогирлянда выполнена на основе кабеля (соединительный контрольный кабель для особо тяжелых условий, в частности, для кабельных буксируемых цепей), в который герметично вмонтированы датчики измерения температуры.

В логгере реализованы часы реального времени, по показаниям которых в соответствии с проведенными установками (дата/время начала, дата/время окончания и период проведения) автоматически организуется запрос на проведение измерений. Результаты измерений фиксируются в microSD. Программирование логгера, а также передача данных с microSD осуществляются через USB. Датчики измерения температуры подключаются к логгеру по стандарту I2C с последовательной нумерацией. Первый датчик располагается самым ближним к разъему. Емкость памяти данных не менее 4 Гбайт. Тип памяти данных - Industrial microSD. Скорость передачи данных - USB 2.0 Full speed.

Логгер защищен пломбами. Термогирлянда является неразборным и неремонтируемым изделием.

Степень защиты логгера – IP65, термогирлянды - IP67.

Типоисполнения КЦТ приведены в таблице 1.

Таблица 1

п/п	Комплектующие	Типоисполнение		
		КЦТ-01	КЦТ-02	КЦТ-03
1	Термогирлянда	В наличии	В наличии	В наличии
2	Логгер для автоматизированного сбора и хранения данных, в т.ч. в автономном режиме	Отсутствует	В наличии	В наличии
3	Радиомодем для удаленной отправки данных на блок сбора	Отсутствует	Отсутствует	В наличии

Внешний вид КЦТ с указанием мест пломбирования приведен на рисунке 1.

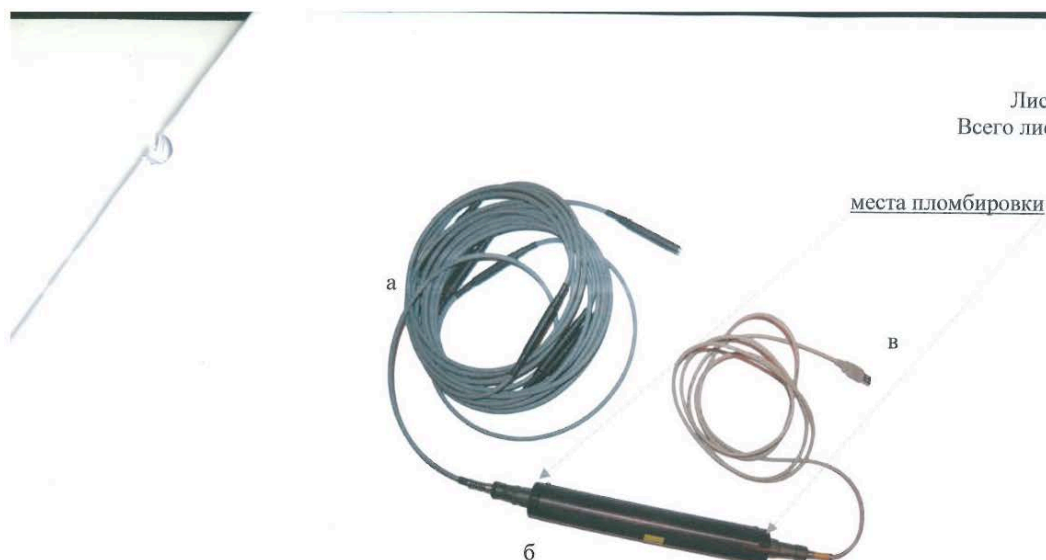


Рисунок 1 – Внешний вид косы цифровой термометрической КЦТ
(а – термогирлянда, б – логгер, в – кабель для связи с ПК)

Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) является специализированным ПО управления режимами работы логгера, воспроизведения измеренных значений температуры в режиме реального времени или из памяти логгера, контроля работоспособности оборудования логгера, и проверки качества полученных данных.

ПО КЦТ предназначено для установки параметров логгера, в том числе дистанционно, включает в себя средства управления процессами записи, обеспечивает выполнение всех функций логгера и контроль параметров функционирования логгера, в том числе визуальных данных. ПО обеспечивает поддержку стандартных протоколов передачи данных, имеет конвертеры формата данных в ряд широко используемых форматов представления данных.

Влияние метрологически значимой части ПО КЦТ на метрологические характеристики комплекса не выходит за пределы согласованного допуска. Идентификационные данные (признаки) метрологически значимой части ПО приведены в таблице 2.

Таблица 2

Идентификационные данные (признаки)	Значение
Идентификационное наименование ПО	TL_Controller.exe
Номер версии (идентификационный номер) ПО	5.1
Цифровой идентификатор ПО	7af9d57d66667693145cf06e9e1a32f4

Уровень защиты ПО КЦТ соответствует уровню «Низкий» в соответствии с Р 50.2.077-2014.

Метрологические и технические характеристики

Метрологические и технические характеристики КЦТ приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Метрологические характеристики КЦТ

Наименование	Значение характеристики
Диапазон измерений температуры, °С	от -40 до +85

Продолжение таблицы 3

Наименование	Значение характеристики
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры в диапазоне температур, °С: св. -3 до +3 включ. °С св. -10 до -3 включ. °С; св. +3 до +10 включ. °С св. -40 до -10 включ. °С; св. +10 до +85 °С	±0,1 ±0,2 ±0,3
Дискретность измерений, °С	0,01

Таблица 4 – Технические характеристики КЦТ

Наименование	Значение характеристики
Количество датчиков измерения температуры, шт	от 1 до 250
Расстояние между датчиками измерения температуры, м	от 0,2
Питание КЦТ: Тип батарей Количество батарей Напряжение одной батареи, В, номинальное значение Емкость одной батареи, А·час, номинальное значение	Li-SOCI2 2 3,6 17
Потребляемый ток: в режиме энергосбережения, мА, типовое значение в режиме измерения (microSD включена), мА, пиковое значение	12 25
Рабочие условия эксплуатации: температурный диапазон, °С	от -40 до +85

Знак утверждения типа

наносится на титульный лист паспорта типографским способом.

Комплектность средства измерений

Типовой комплект поставки КЦТ * приведен в таблице 5.

Таблица 5

Наименование	Количество	Обозначение
1 Коса цифровая термометрическая КЦТ	1	КЦТ 43 1132.001
2 Кабель для связи с ПК	1	КЦТ 43 1132.001
3 Источник питания	2	КЦТ 43 1132.001
4 Технические условия	1	ТУ 431132-001-17396396-2013
5 Руководство по эксплуатации	1	КЦТ 43 1132.001 РЭ
6 Методика поверки	1	651-16-32

Продолжение таблицы 5

Наименование	Количество	Обозначение
7 Упаковочный лист и комплектующая ведомость с полным перечнем упаковочных единиц	1	
8 Радиомодем КЦТ (опционально)	1	
9 Тросик КЦТ (опционально)	1	
10 Утяжелитель КЦТ (опционально)	1	

*Комплект поставки КЦТ определяется при заказе индивидуально для конкретного применения.

Поверка

осуществляется по документу 651-16-32 «Косы цифровые термометрические КЦТ. Методика поверки», утвержденному ФГУП «ВНИИФТРИ» 14 ноября 2016 г.

Основные средства поверки:

- Термометр сопротивления эталонный ЭТС-25, тип А, рег. №19484-09, диапазон измерений температуры: от 0 до 660 °С, 1-го разряда по ГОСТ Р 521233-98;
- Термометр сопротивления эталонный ЭТС-25, тип В, рег. №19484-09, диапазон измерений температуры: от минус 196 до плюс 0,01 °С, 1-го разряда по ГОСТ Р 521233-98;
- термостат переливной прецизионный ТПП-1-3, рег. № 33744-07, температурный диапазон от минус 75 до 100°С, нестабильность $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$;
- измеритель-регулятор температуры многоканальный прецизионный МИТ 8.15, рег. № 19736-11, диапазон измерения температуры от минус 200 до плюс 962°С, предел допускаемой основной абсолютной погрешности $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$.

Допускается применение аналогичных средств поверки, обеспечивающих определение метрологических характеристик поверяемых СИ с требуемой точностью.

Знак поверки наносится в свидетельство о поверке.

Сведения о методиках (методах) измерений
приведены в эксплуатационной документации.

Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к косам цифровым термометрическим КЦТ

ГОСТ Р 8.596-2002 Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения

ГОСТ Р 52931-2008 Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия

ТУ 431132-001-17396396-2013 Коса цифровая термометрическая КЦТ. Технические условия

Изготовитель

Общество с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика»
(ООО «МГУ-геофизика»)
ИНН 7729736680
Адрес: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 77, Научный парк
МГУ им. М.В.Ломоносова
Тел./факс: (495) 921-60-39
E-mail: mail@msu-geophysics.ru

Испытательный центр

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»
(ФГУП «ВНИИФТРИ»)
Юридический адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский р-н, рабочий поселок Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корпус 11
Почтовый адрес: 141570, Московская область Солнечногорский р-н, п/о Менделеево
Тел./факс: (495) 526-63-00
E-mail: office@vniiftri
Аттестат аккредитации ФГУП «ВНИИФТРИ» по проведению испытаний средств измерений в целях утверждения типа № 30002-13 от 07.10.2013 г.

Заместитель
Руководителя Федерального
агентства по техническому
регулированию и метрологии



С.С. Голубев

М.п.

« 31 » 07 2017 г.

ПРОШНУРОВАНС,
ПРОНУМЕРАВАНО
И СКРЕПЛЕНО ПЕЧАТЮ
5 (пед) ЛИСТОВ(А)



Акт испытаний кос цифровых термометрических

Лист 1
всего листов 2

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений»
(ФГУП «ВНИИФТРИ»)

р.п. Менделеево, Солнечногорский район, Московская область, 141570, тел./факс:(495)526-63-00

А К Т
испытаний в целях утверждения типа
кос цифровых термометрических КЦТ, представленных обществом с ограниченной
ответственностью «МГУ-геофизика», г. Москва

1 Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») (регистрационный номер 30002-13 от 07.10.2013 г., действительный до 07.10.2018 г.) провело испытания в целях утверждения типа кос цифровых термометрических КЦТ, изготавливаемых обществом с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика» (ООО «МГУ-геофизика»), г. Москва.

Испытания проведены с 15.03.2016 г. по 29.07.2016 г. на основании заявки ООО «МГУ-геофизика», г. Москва (исх. № 08/02-16 от 15.02.2016 г.).

Испытания проводились на испытательной базе ФГУП «ВНИИФТРИ», р.п. Менделеево Солнечногорского р-на Московской области.

2 ФГУП «ВНИИФТРИ» был представлен образец косы цифровой термометрической КЦТ: КЦТ №1500 с логгером TL Controller №86.1; и комплект эксплуатационной документации.

3 ФГУП «ВНИИФТРИ» провело испытания кос цифровых термометрических КЦТ в соответствии с документом «Косы цифровые термометрические КЦТ. Программа испытаний в целях утверждения типа», утверждённым первым заместителем генерального директора – заместителем по научной работе ФГУП «ВНИИФТРИ» и согласованным генеральным директором ООО «МГУ-геофизика» в установленном порядке.

4 Результаты испытаний положительные.

5 В результате проведенных испытаний для кос цифровых термометрических КЦТ установлены следующие метрологические и технические характеристики.

Метрологические характеристики КЦТ

Наименование	Значение характеристики
Диапазон измерений температуры, °С	от -40 до +85
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры в диапазоне температур, °С:	
от -3°С до +3°С	±0,1
от -10°С до -3°С; от +3°С до +10°С	±0,2
от -40°С до -10°С; от +10°С до +85°С	±0,3
Дискретность измерений, °С	0,01

Технические характеристики КЦТ

Наименование	Значение характеристики
Количество датчиков измерения температуры, шт	от 1 до 250
Расстояние между датчиками измерения температуры, м	от 0,2
Питание КЦТ:	
Тип батарей	Li-SOCl2
Количество батарей	2
Напряжение одной батареи, В, номинальное значение	3,6
Емкость одной батарей, А*час, номинальное значение	17
Потребляемый ток:	
в режиме энергосбережения, мА, типовое значение	12
в режиме измерения (microSD включена), мА, пиковое значение	25
Рабочие условия эксплуатации:	
температурный диапазон, °С	от -40 до +85

Опробована методика поверки «Косы цифровые термометрические КЦТ. Методика поверки. 651-16-32».

Рекомендованный интервал между поверками - 3 года.

Разработан проект описания типа косы цифровой термометрической КЦТ.

6 Сведения о результатах проверки обязательных метрологических и технических требований к средствам измерений. Требования отсутствуют.

7 Защита ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений соответствует уровню «низкий» в соответствии с Р50.2.077-2014.

Приложения к акту:

- 1 Отчет об испытаниях на 12 л.
- 2 Описание типа средства измерений (проект) на 5 л.
- 3 Методика поверки на 6 л.

Первый заместитель генерального директора –
заместитель по научной работе
ФГУП «ВНИИФТРИ»

А.Н. Щипунов
« 29 » 12 2016 г.

Начальник НИО-3
ФГУП «ВНИИФТРИ»

Э.Г. Асланян
« 29 » 12 2016 г.

Начальник лаборатории 310
ФГУП «ВНИИФТРИ»

С.М. Осадчий
« 29 » 12 2016 г.

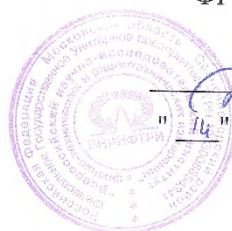
С актом ознакомлен:
Генеральный директор
ООО «МГУ-геофизика»

М.п. А.В. Кошурников
« 29 » 12 2016 г.

Методика поверки

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
генерального директора –
заместитель по научной работе
ФГУП «ВНИИФТРИ»



(Handwritten signature)

А.Н. Щипунов

" 14 "

//

2016 г.

Косы цифровые термометрические КЦТ

Методика поверки

651-16-32

2016 г.

1 Введение

1.1 Настоящая методика поверки устанавливает методы и средства первичной и периодических поверок цифровых термометрических кос КЦТ (далее – КЦТ), изготавливаемых ООО «МГУ-геофизика».

Диапазон измерения температуры составляет от минус 40 до плюс 85 °С.

1.2 Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры
От минус 3 до плюс 3 °С	±0,1 °С
От минус 10 до минус 3 °С	±0,2 °С
От минус 40 до минус 10 °С	±0,3 °С
От плюс 3 до плюс 10 °С	±0,2 °С
От плюс 10 до плюс 80 °С	±0,3 °С

1.3 Интервал между поверками – три года.

2 Операции поверки

2.1 При проведении поверки КЦТ должны быть выполнены операции, указанные в таблице 2.

Таблица 2

Наименование операции	Номер пункта методики поверки	Обязательность проведения операций при	
		первичной поверке	периодической поверке
1 Внешний осмотр	8.1	да	да
2 Определение метрологических характеристик КЦТ	8.2	да	да
2.1 Определение рабочего диапазона КЦТ	8.2.1	да	да
2.2 Определение основной погрешности измерений температуры	8.2.2	да	да
3 Проверка ПО	8.3	да	да

3 Средства поверки

3.1 При проведении поверки должны применяться средства измерения и оборудование, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Номер пункта методики поверки	Наименование и тип (условное обозначение) основного или вспомогательного средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего технические требования, и (или) метрологические и основные технические характеристики средства поверки
8.2.1, 8.2.2	Термометр сопротивления эталонный ЭТС-25, тип А, рег. №19484-09, диапазон измерений температуры: от 0 до 660 °С, 1-го разряда
8.2.1, 8.2.2	Термометр сопротивления эталонный ЭТС-25, тип В, рег. №19484-09, диапазон измерений температуры: от минус 196 до плюс 0,01 °С, 1-го разряда
8.2.1, 8.2.2	Термостат переливной прецизионный ТПП-1.0 с блоком сравнения ТУ 4381-151-56835627-06, диапазон температур от 35 до 300 °С, нестабильность температуры, не более 0,005 °С
8.2.1, 8.2.2	Термостат переливной прецизионный ТПП-1.3 с блоком сравнения ТУ 4381-151-56835627-06, диапазон температур от минус 70 до плюс 30 °С, нестабильность температуры, не более 0,005 °С
8.2.1, 8.2.2	Измеритель температуры многоканальный прецизионный МИТ8.15 ТУ 4211-102-56835627-10, диапазон измерений температуры от минус 200 до плюс 962 °С, пределы погрешности не более $\pm 0,014$ °С
8.2.1, 8.2.2	Измеритель температуры и влажности ИТВ 1522D ТУ 4227-004-34913634-00, диапазон измерений температур: от минус 50 до плюс 100 °С, пределы абсолютной погрешности, не более $\pm 0,5$ °С; диапазон измерений относительной влажности: от 0 до 100 %, пределы абсолютной погрешности, не более ± 2 %
8.2.1, 8.2.2	Персональный компьютер IBM/PC с программным обеспечением, стандартная конфигурация с ОС Windows XP/7/8

- 3.2 При поверке допускается применять другие средства измерений, обеспечивающие определение метрологических характеристик КЦТ с требуемой точностью. Все средства и оборудование, используемые при поверке, должны иметь действующие свидетельства о поверке и быть аттестованы.

4 Требования к квалификации поверителей

- 4.1 К проведению поверки допускаются лица, имеющие квалификацию инженера, ознакомленные с эксплуатационными документами на КЦТ и средства измерений, руководствующиеся «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок» и аттестованы в качестве поверителей.

5 Требования безопасности

- 5.1 При подготовке и проведении поверки необходимо соблюдать требования ГОСТ 12.3.019-80, «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденных Ростехнадзором.

6 Условия поверки

- 6.1 При проведении поверки должны быть соблюдены следующие условия:
- | | |
|--|----------------|
| температура окружающего воздуха, °С | от 15 до 25; |
| относительная влажность окружающего воздуха, % | от 20 до 80; |
| атмосферное давление, кПа; | от 84 до 106,7 |

номинальное напряжение питания, В 220 ± 5 .

- 6.2 Операции, производимые со средствами поверки и с поверяемыми КЦТ должны соответствовать указаниям, приведенным в эксплуатационной документации.

7 Подготовка к поверке

- 7.1 Средства поверки и вспомогательное оборудование, применяемые при поверке, должны быть подготовлены к работе в соответствии с эксплуатационной документацией.
- 7.2 Проверить соответствие условий поверки требованиям раздела 6.

8 Проведение поверки

8.1 Внешний осмотр

- 8.1.1 Комплектность, упаковка и маркировка КЦТ должны соответствовать требованиям РЭ.
Корпус логгера, кабель и термометрические датчики не должны иметь механических повреждений и дефектов.
- 8.1.2 В комплект эксплуатационной документации должны входить РЭ КЦТ с отметкой ОТК и свидетельство о предыдущей поверке (при периодической поверке).
- 8.1.3 КЦТ, не удовлетворяющие требованиям, изложенным выше, дальнейшим операциям поверки не подвергаются.

8.2 Определение метрологических характеристик КЦТ

- 8.2.1 Определение рабочего диапазона измерений температуры проводить одновременно с определением значений основной погрешности.
Проверку нижнего значения рабочего диапазона измерений температуры проводить при температуре $T_{\text{мин}}$. Допускаемый диапазон значений контрольной температуры $T_{\text{мин}}$ от минус 40 до минус 35 °С.
Проверку верхнего значения рабочего диапазона измерений температуры проводить при температуре $T_{\text{макс}}$. Допускаемый диапазон значений контрольной температуры $T_{\text{макс}}$ от 80 до 85 °С.
Результаты поверки считать положительными, если значения основной погрешности в контрольных точках не превышают 0,3 °С.
Определение рабочего диапазона измерений температуры совместить с определением основной погрешности измерений температуры.
- 8.2.2 Определение значений основной погрешности измерений температуры
- 8.2.2.1 Основная погрешность КЦТ (Δ) определяется абсолютной величиной разности значений температуры, измеряемой поверяемым КЦТ ($T_{\text{изм}}$), и контрольных значений температуры ($T_{\text{к}}$), измеряемой эталонным средством измерения.
Определение проводить при значениях контрольных температур из таблицы 4.

Таблица 4

№ измерений	Температура, °С	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры, °С
1	-40	±0,3
2	-9,5	±0,2
3	-2,7	±0,1
4	0	±0,1
5	2,7	±0,1
6	9,5	±0,2
7	85	±0,3

Значения контрольных температур в термостатах от указанных выше должны отличаться не более, чем на ± 1 °С и не выходить за пределы рабочего диапазона.

Измерения температуры с помощью КЦТ и эталонных средств производить при достижении в термостатах (калибраторах) стационарного состояния и в момент минимального дрейфа температуры, не превышающего $0,1 \cdot \Delta / \text{мин}$, где Δ – выраженное в градусах допускаемое значение основной погрешности измерений температуры из таблицы 4.

При проведении поверки необходимо обеспечить минимально необходимую величину погружения $L_{\text{мин}}$ эталонного средства и проверяемых датчиков КЦТ. Под $L_{\text{мин}}$ понимается глубина погружения такая, что при дальнейшем погружении показания эталонного средства и КЦТ изменяются не более чем на $0,02$ °С.

Результаты поверки считать положительными, если значения основной погрешности в контрольных точках находятся в пределах, указанных в таблице 4.

8.2.2.2 Определение значений основной погрешности измерений температуры КЦТ

Измерения проводить при значениях контрольных температур из таблицы 4.

Измерения проводить для всех датчиков КЦТ.

При невозможности провести измерения всех датчиков КЦТ за один цикл, последовательно перемещать датчики.

Задать в термостате первое значение контрольной температуры T_1 и включить КЦТ, подключить логгер к компьютеру и запустить программу считывания данных.

После установления стационарного температурного режима произвести измерение температуры T_1 с помощью эталонного средства ($T_{э1}$) и значения температуры по показаниям КЦТ ($T_{изм1}$)

Для пяти последовательно индицируемых на дисплее компьютера значений температуры $T_{изм i}$, соответствующих $T_{э1}$, вычислить модули разности $\Delta T_{п i} = |T_{изм i} - T_{э1}|$ ($n=1, \dots, 5$; i – номер датчика в КЦТ) и выбрать из них максимальное $\Delta T_{макс1}$ при температуре контрольной точки T_1 .

Последовательно проводить измерения с другими значениями контрольных температур T_k ($k=2, \dots, 7$), и для каждой из них определить значение $\Delta T_{макс}$ при температуре контрольной точки T_k .

Результаты поверки считать положительными, если все полученные значения $\Delta T_{макс}$ находятся в пределах $\pm \Delta$, указанных в таблице 4.

8.3 Проверка программного обеспечения

8.3.1 Проверку соответствия заявленных идентификационных данных программного обеспечения (ПО) КЦТ проводить в следующей последовательности:

- проверить идентификационное наименование ПО в соответствии с п.4.2 РЭ
- проверить номер версии (идентификационный номер) ПО в соответствии с п.4.2 РЭ.

8.3.2 Результаты поверки считать положительными, если идентификационные данные ПО соответствуют идентификационным данным, приведенным в таблице 5.

Таблица 5


Идентификационные данные (признаки)	Значение
Идентификационное наименование ПО	TL_Controller.exe
Номер версии (идентификационный номер) ПО	5.1

9 Оформление результатов поверки

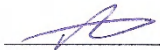
9.1 Положительные результаты первичной и периодической поверок КЦТ оформляются выдачей свидетельства о поверке установленной формы.

9.2 В случае отрицательных результатов поверки КЦТ не допускается к применению, оттиск поверительного клейма гасится, «Свидетельство о поверке» аннулируется, владельцу выписывается «Извещение о непригодности» или делается соответствующая запись в эксплуатационной документации.

Начальник лаборатории 310
ФГУП «ВНИИФТРИ»

 Осадчий С.М.

Научный сотрудник НИО-3
ФГУП «ВНИИФТРИ»

 Петухов А.А.

Приказ об утверждении типов Средств Измерения



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
(Росстандарт)

П Р И К А З

20 июля 2017 г.

№ 1584

Москва

Об утверждении типов средств измерений

Во исполнение Административного регламента по предоставлению Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии государственной услуги по утверждению типа стандартных образцов или типа средств измерений, утверждённого приказом Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 25 июня 2013 г. № 970 (зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 12 сентября 2013 г. № 29940) (далее — Административный регламент), п р и к а з ы в а ю:

1. Утвердить типы средств измерений согласно прилагаемому перечню типов средств измерений.

2. Управлению метрологии (Р.А.Родин), ФГУП «ВНИИМС» (А.Ю.Кузин) обеспечить в соответствии с Административным регламентом оформление свидетельств на утвержденные типы средств измерений с описанием типов средств измерений и выдачу их юридическому лицу или индивидуальному предпринимателю.

3. Контроль за исполнением настоящего приказа оставляю за собой.

Заместитель Руководителя

С.С. Голубев

Подлинник электронного документа, подписанного ЭП,
хранится в системе электронного документооборота
Федеральное агентство по техническому регулированию и
метрологии.

СВЕДЕНИЯ О СЕРТИФИКАТЕ ЭП

Сертификат: 61DA1E000300E901C1ED
Кому выдан: Голубев Сергей Сергеевич
Действителен: с 17.11.2016 до 17.11.2017

УТВЕРЖДЕН
 приказом Федерального агентства
 по техническому регулированию
 и метрологии
 от «20» июля 2017 г. № 1584

Перечень
 типов средств измерений

№ п/п	Типы средств измерений	Изготовитель средства измерения	Регистрационный номер в Государственном реестре средств измерений	Методика поверки средств измерений	Интервал между поверками средств измерений
1	2	3	4	5	6
1.	Косы цифровые термометрические КЦТ	Общество с ограниченной ответственностью "МГУ-геофизика" (ООО "МГУ-геофизика"), г. Москва	68028-17	651-16-32	3 года
2.	Комплексы измерительные ультразвуковые "Вымпел-500" исполнений "01", "02"	Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное объединение "Вымпел" (ООО "НПО "Вымпел"), г. Дедовск, Московская обл.	68029-17	МП 0568-13-2017	4 года
3.	Хроматографы жидкостные "МАЭСТРО"	Общество с ограниченной ответственностью "ИНТЕРЛАБ" (ООО "ИНТЕРЛАБ"), г. Москва	68030-17	ФАУН.414538.001 ДЛ	1 год

В 5.

Программа испытаний

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «МГУ-геофизика»

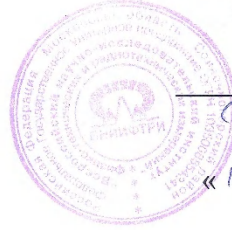


А.В. Кошурников

« 11 » 03 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
генерального директора –
заместитель по научной работе
ФГУП «ВНИИФТРИ»



А.Н. Щипунов

« 11 » 03 2016 г.

Косы цифровые термометрические КЦТ

Программа испытаний в целях утверждения типа

р. п. Менделеево
2016 г.

1 Объект испытаний

- 1.1 Наименование: Косы цифровые термометрические КЦТ.
- 1.2 Назначение: Косы цифровые термометрические КЦТ (в дальнейшем – КЦТ) предназначены для измерений, регистрации, длительного хранения и передачи в цифровой форме распределения температуры в скважине. КЦТ используются для автономных периодичных измерений в течение нескольких лет.
- 1.3 Изготовитель: ООО «МГУ-геофизика».
Юридический адрес: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1, стр. 77, Научный парк МГУ им. М.В. Ломоносова
- 1.4 Характер производства: серийный.
- 1.5 На испытания представлен один образец КЦТ.

2 Содержание и объем испытаний

- 2.1 Испытания проводить в объеме, приведенном в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Наименование этапа испытаний	Ссылка на пункт методики испытаний	Сведения об эталонах и испытательном оборудовании для проведения испытаний по пунктам таблицы 2.2.
1 Проверка комплектности, маркировки, упаковки	4.1	Эталоны и испытательное оборудование не применяются
2 Проверка расстояния между датчиками измерения температуры	4.2	10, 11
3 Определение значений метрологических характеристик		
3.1 Определение диапазона измерений температуры	4.3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9
3.2 Определение пределов допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры	4.4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9
3.3 Определение прочности логгера КЦТ к пониженной и повышенной температуре окружающей среды	4.5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9
3.4 Определение устойчивости логгера КЦТ к пониженной и повышенной температуре окружающей среды	4.6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9

Наименование этапа испытаний	Ссылка на пункт методики испытаний	Сведения об эталонах и испытательном оборудовании для проведения испытаний по пунктам таблицы 2.2.
3.5 Проверка устойчивости логгера к воздействию воды	4.7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9
3.6 Проверка устойчивости термогирлянды к воздействию воды	4.8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9
4 Опробование методики поверки	4.9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9
5 Оценка полноты, правильности и способов выражения МХ и ТХ, нормированных в ТД и их соответствие требованиям нормативных документов Государственной системы обеспечения единства измерений	4.10	Эталоны и испытательное оборудование не применяются
5 Оценка защиты и идентификация программного обеспечения	5	Эталоны и испытательное оборудование не применяются
7 Определение интервала между поверками	6	Расчетным путем, руководствуясь положениями РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений»
8 Анализ конструкции	7	Эталоны и испытательное оборудование не применяются

2.2 Сведения об эталонах, испытательном и вспомогательном оборудовании, используемых при проведении испытаний, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Наименование средства испытаний и обозначение НТД	Основные метрологические и технические характеристики средства испытаний
1 Термометр сопротивления эталонный ЭТС-25, тип А ТУ 4211-001-02566450-99	Диапазон измерений температуры: от 0 до 660 °С, 1-го разряда
2 Термометр сопротивления эталонный ЭТС-25, тип В ТУ 4211-001-02566450-99	Диапазон измерений температуры: от минус 196 до плюс 0,01 °С, 1-го разряда

Наименование средства испытаний и обозначение НТД	Основные метрологические и технические характеристики средства испытаний
3 Сосуд Дьюара с водоледающей смесью и блоком сравнения	Воспроизведение температуры плавления льда (0 °С) с погрешностью не более $\pm 0,005$ °С
4 Термостат переливной прецизионный ТПП-1.0 с блоком сравнения ТУ 4381-151-56835627-06	Диапазон температур: от 35 до 300 °С, нестабильность температуры, не более 0,005 °С
5 Термостат переливной прецизионный ТПП-1.3 с блоком сравнения ТУ 4381-151-56835627-06	Диапазон температур: от минус 70 до плюс 30 °С, нестабильность температуры, не более 0,005 °С
6 Многоканальный прецизионный измеритель температуры МИТ8 ТУ 4211-102-17113168-00	Диапазон измерений температуры: от минус 200 до плюс 962 °С, пределы погрешности не более $\pm 0,014$ °С
7 Измеритель температуры и влажности ИТВ 1522D температурный диапазон от минус 50 до плюс 100 °С	Диапазон измерений температур: от минус 50 до плюс 100 °С, пределы абсолютной погрешности, не более $\pm 0,5$ °С; диапазон измерений относительной влажности: от 0 до 100 %, пределы абсолютной погрешности, не более ± 2 %
8 Персональный компьютер IBM/PC с программным обеспечением	Стандартная конфигурация с ОС Windows 7/8
9 Калибратор температуры эталонный КТ-650Н с внешним эталонным термометром ТУ 4381-056-13282996-2010	Диапазон температур: от 50 до 650 °С, нестабильность поддержания температуры за 30 мин. не более $\pm [0,007+0,006 \cdot (t/100)]$ °С
10 Штангенциркуль ШЦ-И-250-0,1 ГОСТ 166-89	Диапазон 0-250 мм, цена деления 0,1 мм
11 Линейка металлическая ГОСТ 427-75	Длина 500 мм, цена деления 1 мм

3 Условия проведения испытаний

3.1 Все испытания, если их режим не оговаривается при описании отдельных методов испытаний, проводить в следующих условиях:

- температура окружающего воздуха, °С от 15 до 25;
- относительная влажность окружающего воздуха, % от 30 до 80;
- атмосферное давление, кПа от 84 до 106,7;
- отсутствие внешних электрических и магнитных полей;
- отсутствие вибрации;
- рабочее положение – произвольное.

- 3.2 Средства измерений (СИ), применяемые при испытаниях, должны иметь эксплуатационные документы и действующие свидетельства о поверке.
Испытательное оборудование и устройства, применяемые при испытаниях, должны иметь паспорт и быть аттестованы в соответствии с ГОСТ Р 8.568-97.
- 3.3 Все операции с испытательным оборудованием, устройствами и СИ, применяемыми при испытаниях, а также с испытуемыми изделиями должны проводиться в соответствии с эксплуатационной документацией на них.
- 3.4 Требования по безопасности
- 3.4.1 При проведении испытаний необходимо соблюдать требования безопасности по ГОСТ 12.3.019-80, ГОСТ 22261-94.
- 3.4.2 При извлечении термопреобразователей во время измерений при температуре выше 50 °С и ниже минус 30 °С запрещается трогать руками их погружаемые части во избежание получения ожогов и обморожений.
- 3.4.3 Запрещается помещать нагретые термопреобразователи на легковоспламеняющуюся поверхность во избежание возгораний.
- 3.4.4 При проведении испытаний необходимо также соблюдать меры безопасности, изложенные в эксплуатационной документации на используемые средства испытаний.
- 3.4.5 К проведению испытаний допускается персонал, обученный правилам техники безопасности, изучивший эксплуатационную документацию на КЦТ, используемые СИ и оборудование, прошедший инструктаж по технике безопасности при работе с КЦТ.
- 3.5 Требования к квалификации испытателей
К проведению испытаний допускается персонал, имеющий высшее техническое образование и стаж работы с приборами, используемыми при испытаниях, не менее трех лет, или имеющий квалификацию поверителя в области температурных измерений.

4 Методы (методики испытаний)

- 4.1 Проверку соответствия КЦТ комплектности, маркировки и упаковки проводить визуально путем сравнения с требованиями разделов 1.3, 5 руководства по эксплуатации (РЭ).
Результаты испытаний считать положительными, если отсутствуют коррозия и видимые повреждения механических частей, все надписи четко читаются, комплектность соответствует разделу 1.3 РЭ.
- 4.2 Определение расстояния между датчиками измерения температуры проводить путем измерения с помощью линейки металлической с ценой деления 1 мм.
Результаты испытаний считать положительными, если расстояние между датчиками измерения температуры не менее 200 мм.

- 4.3 Определение диапазона измерений температуры проводить одновременно с определением абсолютной погрешности измерений температуры.

В качестве эталонного средства измерений использовать термометры сопротивления платиновые: ЭТС-25, ТСПН, ПТС, ВТС. Эталонные термометры (здесь и далее) использовать в соответствии с их рабочим диапазоном. В качестве средств, воспроизводящих температурные состояния, использовать:

- термостаты, обеспечивающие диапазоны воспроизводимых температур от минус 70 до плюс 200 °С,
- калибратор температуры КТ-650Н обеспечивающий диапазоны воспроизводимых температур от 50 до 650 °С.

Проверку нижнего значения рабочего диапазона измерений температуры проводить при температуре $T_{\text{мин}}$. Допускаемый диапазон значений контрольной температуры $T_{\text{мин}}$ от минус 40 до минус 35 °С.

Проверку верхнего значения рабочего диапазона измерений температуры проводить при температуре $T_{\text{макс}}$. Допускаемый диапазон значений контрольной температуры $T_{\text{макс}}$ от 80 до 85 °С.

Результаты испытаний считать положительными, если значения основной погрешности в контрольных точках не превышают 0,3 °С.

Определение рабочего диапазона измерений температуры совместить с определением основной погрешности измерений температуры.

- 4.4 Определение абсолютной погрешности измерений температуры

- 4.4.1 Значение абсолютной погрешности КЦТ (Δ) определяется величиной разности значений температуры, измеряемой проверяемым КЦТ ($T_{\text{изм}}$), и контрольных значений температуры ($T_{\text{к}}$), измеряемой эталонным средством измерения.

Определение проводить при значениях контрольных температур из таблицы 4.1.

Таблица 4.1

№ пп	Температура, °С	Допустимое значение погрешности, °С
1	минус 40	±0,3
2	минус 25	±0,3
3	минус 10,5	±0,3
4	минус 9,5	±0,2
5	минус 6,5	±0,2
6	минус 3,5	±0,2
7	минус 2,7	±0,1
8	0	±0,1
9	2,7	±0,1
10	3,5	±0,2
11	6,5	±0,2
12	9,5	±0,2
13	10,5	±0,3
14	47,5	±0,3
15	85	±0,3

Значения контрольных температур в термостатах от указанных выше должны отличаться не более, чем на ± 1 °С и не выходить за пределы рабочего диапазона.

Температуру плавления льда воспроизводить в сосуде Дьюара с водо-ледяной смесью и металлическим блоком сравнения для размещения датчиков испытуемой КЦТ и эталонного СИ. Сосуд Дьюара заполнить смесью мелкодробленого льда и охлажденной воды. Лед уплотняют во всей массе так, чтобы в смеси льда и воды не было пузырей воздуха. Избыток воды следует слить.

Измерения температуры с помощью КЦТ и эталонных средств производить при достижении в термостатах (калибраторах) стационарного состояния и в момент минимального дрейфа температуры, не превышающего $0,1 \cdot \Delta / \text{мин}$, где Δ – выраженное в градусах допустимое значение основной погрешности измерений температуры из таблицы 4.1.

При проведении испытаний необходимо обеспечить минимально необходимую величину погружения $L_{\text{мин}}$ эталонного средства и проверяемых датчиков КЦТ. Под $L_{\text{мин}}$ понимается глубина погружения такая, что при дальнейшем погружении показания эталонного средства и КЦТ изменяются не более чем на $0,02$ °С.

Результаты испытаний считать положительными, если значения абсолютной погрешности в контрольных точках находятся в пределах, указанных в таблице 4.1.

4.4.2 Определение абсолютной погрешности измерений температуры КЦТ

Измерения проводить при значениях контрольных температур из таблицы 4.1.

Измерения проводить для всех датчиков КЦТ.

При невозможности провести измерения всех датчиков КЦТ за один цикл, последовательно перемещать датчики.

Задать в термостате первое значение контрольной температуры T_1 и включить КЦТ, подключить логгер к компьютеру и запустить программу считывания данных.

После установления стационарного температурного режима произвести измерение температуры T_1 с помощью эталонного средства ($T_{\text{э1}}$) и значения температуры по показаниям КЦТ ($T_{\text{изм}}$)

Для пяти последовательно индицируемых на дисплее компьютера значений температуры $T_{\text{изм } i}$, соответствующих $T_{\text{э1}}$, вычислить модули разности $\Delta T_{n \ i} = |T_{\text{изм } i} - T_{\text{э1}}|$ ($n=1, \dots, 5$; i – номер датчика в КЦТ) и выбрать из них максимальное $\Delta T_{\text{макс } 1}$ при температуре контрольной точки T_1 .

Последовательно проводить измерения с другими значениями контрольных температур T_k ($k=2, \dots, 15$), и для каждой из них определить значение $\Delta T_{\text{макс}}$ при температуре контрольной точки T_k .

Результаты испытаний считать положительными, если все полученные значения $\Delta T_{\text{макс}}$ находятся в пределах $\pm \Delta$, указанных в таблице 4.1.

4.5 Определение прочности логгера КЦТ к пониженной и повышенной температуре окружающей среды проводить в следующей последовательности.

Определение производить в климатической камере (или термостате) при температурах минус 40 °С и 85 °С. Время выдержки - не менее 3 часов.

После извлечения из камеры логгер КЦТ выдержать при нормальных условиях в течение 2 часов и выполнить операции в соответствии с 4.4 по определению основной погрешности Δ в контрольных точках 0 °С, -40. °С, 85 °С.

Результаты испытаний считать положительными, если полученные значения Δ находятся в пределах, указанных в таблице 4.1.

- 4.6 Определение устойчивости логгера КЦТ к пониженной и повышенной температуре окружающей среды проводить в следующей последовательности.
Определение производить в климатической камере (или термостате) при температурах минус 40 °С и 85 °С. Время выдержки - не менее 2 часов.
Не извлекая логгер из камеры, выполнить операции в соответствии с 4.4 по определению основной погрешности Δ в контрольных точках 0 °С, -40. °С, 85 °С.
Результаты испытаний считать положительными, если полученные значения Δ находятся в пределах, указанных в таблице 4.1.
- 4.7 Проверку прочности корпуса логгера к воздействию воды проводить испытанием разбрызгиваемой водой длительностью 3 минуты.
Результаты испытания считать положительными, если при внешнем осмотре не обнаружено нарушений лакокрасочных покрытий и логгер выполняет свое функциональное назначение.
- 4.8 Проверку прочности термогирлянды к воздействию воды проводить путем погружения гирлянды в воду на время 30 минут.
После извлечения из воды выполнить операции в соответствии с п. 4.4 по определению основной погрешности Δ в контрольных точках 0 °С, -40. °С, 85 °С.
Результаты испытаний считать положительными, если полученные значения Δ находятся в пределах, указанных в таблице 4.1.
- 4.9 Опробование методики поверки
- 4.9.1 Провести опробование проекта методики поверки с использованием рекомендованных методов и средств.
Опробование методов поверки проводить согласно проекта методики поверки.
- 4.9.2 Результаты опробования считать положительными, если по результатам опробования методики поверки, полученные значения МХ находятся в установленном допуске.
- 4.10 Оценка полноты, правильности и способов выражения МХ и ТХ, нормированных в ТД и их соответствие требованиям нормативных документов Государственной системы обеспечения единства измерений
- 4.10.1 Провести анализ МХ, полноты и способа их выражения в ТД, а также их соответствия требованиям ГОСТ 8.009-84.
- 4.10.2 Провести оценку необходимости изменения способа выражения МХ и разработки методов их определения.

- 4.10.3 Результаты испытаний считать положительными, если полнота и способ выражения МХ соответствует ГОСТ 8.009-84.

5 Оценка защиты и идентификация программного обеспечения

5.1 Проверка документации

Проверить наличие, достаточность и правильность документов, сопровождающих ПО, требованиям рекомендаций по метрологии Р 50.2.077 – 2014.

В представленной документации проверить наличие следующей информации:

- обозначение ПО;
- описание назначения ПО, его структуры и выполняемых функций;
- описание методов и способов идентификации ПО, а также его метрологически значимых частей, функций и параметров;
- описание интерфейсов пользователя, меню и диалогов;
- описание реализованных методов защиты ПО и данных;
- описание способа передачи измеренных данных;
- описание требуемых системных и аппаратных средств.

5.2 Осуществить проверку соответствия следующих заявленных идентификационных данных ПО:

- наименование ПО;
- идентификационное наименование ПО;
- номер версии (идентификационный номер) ПО;
- цифровой идентификатор метрологически значимой части ПО (контрольная сумма исполняемого кода);
- алгоритм вычисления цифрового идентификатора ПО;
- проверка уровня защиты ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений в соответствии с Р 50.2.077 – 2014 (уровни низкий, средний или высокий).

5.3 Результаты оформить отдельным протоколом.

6 Определение интервала между поверками

- 6.1 Интервал между поверками рассчитывают в соответствии с РМГ 74-2004 «Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».
- 6.2 Результаты определения интервала между поверками оформить отдельным протоколом. Рекомендованный интервал между поверками указать в акте испытаний.

7 Анализ конструкции средства измерений.

- 7.1 Проверить обеспеченность конструкции КЦТ средствами ограничения доступа в целях предотвращения несанкционированной настройки и вмешательства, которые могут привести к искажению результатов измерений.
- 7.2 Результаты испытаний считать положительными, если доступ к частям КЦТ, отвечающим за его настройки, физически ограничен с целью предотвращения несанкционированной настройки и вмешательства, которые могут привести к искажению результатов измерений.
- 7.3 Результаты анализа конструкции оформить отдельным протоколом.

Начальник лаборатории 310
ФГУП «ВНИИФТРИ»


Осадчий С.М.

Научный сотрудник НИО-3
ФГУП «ВНИИФТРИ»


Петухов А.А.

Паспорт

Руководство по эксплуатации

Утверждаю
 Генеральный директор
 ООО «МГУ-геофизика»



/А.В. Кошурников/

Коса цифровая термометрическая КЦТ
 ПАСПОРТ
 Руководство по эксплуатации
 КЦТ.ПС-РЭ

Изм.№ подл.	Подп. и дата
Взам. инв.№	Изм.№ дубл.
Подп. и дата	

г. Москва
 2016 г.

Содержание

1	ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДЕЛИИ	3
2	ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ	3
2.1	Основные технические данные.....	3
3	КОМПЛЕКТНОСТЬ	5
4	УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ	5
4.1	Подключение логгера к компьютеру	6
4.2	Подготовка косы к работе.....	7
4.3	Регистрация данных на microSD	8
4.4	Передача данных в компьютер.....	8
4.5	Замена батарей и доступ к microSD.....	9
5	РЕСУРСЫ, СРОК СЛУЖБЫ И ХРАНЕНИЯ ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ (ПОСТАВЩИКА)	10
5.1	Ресурсы, срок службы и хранения	10
5.2	Гарантии изготовителя (поставщика)	10
6	СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ	11
7	ПОВЕРКА	11
7	ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ	11

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	КЦТ.РЭ			
Разраб.		Кириаков	<i>AKL</i>	15.01.16	ИЗДЕЛИЕ	Лит.	Лист	Листов
					«Коса цифровая термометрическая		2	11
					КЦТ»			
Н.контр.		Погорелов	<i>Погорелов</i>	15.01.16	Руководство по эксплуатации	ООО «МГУ-геофизика»		
Утв.		Фирсов	<i>А.Фирсов</i>	15.01.16				

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДЕЛИИ

Коса цифровая термометрическая КЦТ (в дальнейшем – коса) предназначена для измерения, регистрации, длительного хранения и передачи в цифровой форме распределения температуры в скважине. Коса используется для автономных периодичных измерений в течение нескольких лет.

Тестирование, управление и настройка косы производится с помощью персонального компьютера, через USB.

Комплектность поставки оборудования определяется договором поставки.

2 ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

2.1 Основные технические данные

Основные технические данные приведены в таблице 1

Таблица 1

Характеристика		Технические данные
Диапазон измерений, °С		-40 ... +85
Пределы допускаемой абсолютной погрешности, °С, ±	от -3 °С до +3 °С	0,1
	от -10 °С до -3 °С; от +3 °С до +10 °С	0,2
	от -40 °С до -10 °С; от +10 °С до +85 °С	0,3
Дискретность измерений, °С		0,01
Количество датчиков измерения температуры		от 1 до 250
Расстояние между датчиками измерения температуры, м		от 0,2 м
Время проведения единичного измерения (одновременно по всем датчикам), мс, не более		800
Емкость памяти данных, Гбайт, не менее		4
Тип памяти данных		Industrial microSD
Стандарт канала передачи данных		USB
Скорость передачи данных		USB 2.0 Full speed
Питание комплекса		
<ul style="list-style-type: none"> • Тип батарей • Количество батарей • Напряжение одной батареи, В, номинальное значение • Емкость одной батарей, А*час, номинальное значение 		Li-SOC12 2 3,6 17

Изм.	Лист	№ докум.	Подл.	Дата
------	------	----------	-------	------

КЦТ.РЭ

Лист

3

Копировал

Формат А4

Для логгера определяется дата/время начала измерений, дата/время окончания измерений и период проведения измерений. В логгере реализованы часы реального времени, по показаниям которых в соответствии с проведенными установками автоматически организуется запрос на проведение измерения. Результаты измерения фиксируются в microSD. Программирование логгера, а также передача данных с microSD осуществляются через USB.

Датчики измерения температуры подключаются к логгеру по стандарту I²C с последовательной нумерацией. Первый датчик располагается самым ближним к разъему.

Логгер и гирлянда имеют уникальные номера, которые распознаются программным обеспечением.

Логгер находится преимущественно в режиме энергосбережения, покидая его для проведения измерений, а также в случае подключения к компьютеру.

4.1 Подключение логгера к компьютеру

Для подключения логгера к компьютеру следует использовать специальный кабель связи (поставляется в комплекте). Распайка кабеля приведена в Таблице 2. Логгер распознается средой Windows автоматически в качестве HID-устройства (установка драйвера не требуется). При использовании кабеля связи рекомендуется вначале производить подключение кабеля к логгеру (через быстросъемный разъем), а затем подключать кабель к порту USB на компьютере. Отключение кабеля рекомендуется производить в обратной последовательности.

Таблица 2

Номер контакта быстросъемного разъема	Назначение	Цвет проводника (в кабеле USB)
1	Data+	Зеленый
2	Data-	Белый

Изм. № подл.	Изм. № докл.	Изм. или №	Подп. и дата	Подп. и дата	КЦТ.РЭ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

3	Питание	Красный
4	Земля	Черный+экран

4.2 Подготовка комплекса к работе

Подготовка комплекса к работе сводится к программированию режима работы логгера и подключению косы к логгеру. Логгер снабжен батареями, а заводские установки для организации измерений обеспечивают состояние энергосбережения. Программирование режима работы логгера осуществляется с помощью программы TL_Controller.exe (функционирует в среде Windows). Для установки программы переименуйте файл TL_Controller.exe в какую-либо папку (организованную самостоятельно). При первом запуске программа создаст папку Data, в которой в дальнейшем будут записываться данные с microSD.

После запуска программы (при подключенном к компьютеру логгере) происходит запрос времени логгера. В том случае, если часы реального времени не были ранее установлены, происходит автоматическая синхронизация часов с текущей временем/ датой компьютера. (В этом случае показания времени/даты выводятся красным цветом). Далее, программа запрашивает установки, необходимые для организации измерений, а также получает информацию о наличии данных измерений.

Для организации измерений необходимо в окне Измерение провести установки времени/даты начала и окончания измерений, а также установить интервал измерений. Непосредственно установка новых значений происходит после нажатия на кнопку Установка. В случае, если время начала измерений оказывается «в прошлом» по сравнению с текущим временем, запрос на проведение очередного (первого) измерения

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Подп. и дата

Изм. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

КЦТ.РЭ

Лист

7

Копировал

Формат А4

производится логгером сразу после установки параметров для организации измерений. Однако, обслуживание этого запроса (собственно измерение) произойдет после прекращения связи по USB. В случае, если время окончания измерений оказывается «в прошлом» по сравнению с текущим временем, процесс измерений не инициализируется.

4.3 Регистрация данных на microSD

Логгер поставляется с microSD без данных. Программное обеспечение логгера поддерживает работу с microSD с поддержанием файловой структуры (FAT32). При первой регистрации данных логгер на основе своего заводского номера создает корневую папку, в которую в дальнейшем записывает файлы данных. Каждый файл данных соответствует месяцу проведения измерения. Название файла данных имеет следующую форму "20xx_i.dat", где xx – две последние цифры года, а i – номер месяца (от 1 до 12). Все формируемые файлы – текстовые. В начале файла дается строка, содержащая заводские номера логгера и косы. Далее располагаются результаты измерений. Каждое измерение занимает четыре строки. Первая строка – время и дата измерения. Вторая строка – значения температур 1 – 5 датчиков, третья строка для значений 6 – 10 датчиком и четвертая соответствует 11 – 15 датчикам. В случае использования 10-датчиковой косы значения в четвертой строке заменяются на дефисы. Последующие данные измерения, соответствующие тому же месяцу, записываются в конец файла.

4.4 Передача данных в компьютер

Передача данных в компьютер происходит под управлением программы TL_Controller.exe. При запуске программы происходит запрос о наличии данных на microSD. В случае их отсутствия кратковременно выводится сообщение «Данных нет». Если на карте есть данные, но появляется окно Данные.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	КЦТ.РЭ	Лист
						8

5 РЕСУРСЫ, СРОК СЛУЖБЫ И ХРАНЕНИЯ ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ (ПОСТАВЩИКА)

5.1 Ресурсы, срок службы и хранения

Срок службы изделия – 15 лет с даты ввода в эксплуатацию.

5.2 Гарантии изготовителя (поставщика)

Гарантийный срок эксплуатации изделия – 24 месяцев с даты ввода в эксплуатацию.

Гарантийные сроки эксплуатации изделий импортного производства, приведенные в разделе комплектность настоящего формуляра определяются в соответствии с эксплуатационной документацией на них.

Производитель – ООО «МГУ-геофизика» гарантирует соответствие качества изделий, приведенных в разделе комплектность настоящего формуляра, требованиям документации при соблюдении потребителем установленных условий эксплуатации.

Инв. № постл.	Подп. и дата	Взам. инв №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	КЦТ.РЭ	Лист
	Подп. и дата	Взам. инв №	Инв. № дубл.	Подп. и дата		10
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

6 СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ

Изделие – «Коса цифровая термометрическая КЦТ» № 6, соответствует паспортным данным и признана годной для эксплуатации.

Продукция изготовлена в соответствие со стандартом IP65, IP67.

Рыськов Д.М.
«15» января 2016г.

А.Павлов

7 ПОВЕРКА

- 7.1 Поверка осуществляется в соответствии с документом
- 7.2 Проведение периодической поверки косы требуется не реже 1 раза в 3 года.

8 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ


8.1 Замена батарей питания.

Замена батарей питания производится при достижении значения рабочего напряжения ниже 5,6 В. Текущее значение напряжения приводится в файле данных при каждом производимом измерении. Для замены батарей следует снять торцевой фланец логгера (крепится двумя боковыми винтами). Рекомендуется использовать фланец, расположенный на стороне логгера, противоположной расположению разъема для гирлянды термодатчиков.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	КЦТ.РЭ	Лист
						11
Копировал						Формат А4

Технические Условия

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «МГУ-геофизика»
/А.В.Кошурников/

М.П.

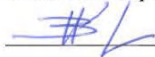


Коса цифровая термометрическая КЦТ

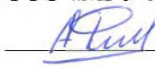
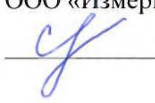
ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ТУ 431132-001-17396396-2013

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «Измерительные системы»
/В.Х.Кириаков/

РАЗРАБОТАНО

Главный геолог
ООО «МГУ-геофизика»
/Фирсов А.М./Главный инженер
ООО «Измерительные системы»
/Зотов С.А./

Инь.№ подл.	Подп. и дата
Взам. инв.№	Инь.№ дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Общие положения

Настоящие технические условия (в дальнейшем – ТУ) распространяются на Косу цифровую термометрическую КЦТ (в дальнейшем – коса), представляющую из себя комплекс устройств для измерения распределения температуры по длине косы, а также автоматизации процессов сбора, хранения и передачи термометрических данных. Для обеспечения удобства монтажа и обслуживания термометрическая коса может быть дополнительно оснащена вспомогательными устройствами. Состав косы представлен в п.1.3.2 настоящих ТУ. Спецификация каждой текущей поставки определяется опросным листом.

Согласно ОК 005-93 коса относится к «Приборы метеорологические для измерения и регистрации / физических параметров почвы, снежного и растительного покрова», код 43 1130; «температуры почвы, снежного и растительного покрова, тепловых потоков в почве и снежном покрове», код 43 1132, по товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности, код ТН ВЭД 9015801100.

Коса предназначена для проведения автономных периодических измерений, а также регистрации, длительного хранения и передачи в цифровой форме распределения температуры в скважине.

Режим работы косы - периодический, непрерывный и круглосуточный.

В настоящих технических условиях используются следующие обозначения и сокращения:

ТУ	- Технические условия
КД	- Конструкторская документация
РД	- Руководящий документ
ПМ	- Программа и методика испытаний
НТД	- Нормативно – технический документ
ЭД	- Эксплуатационная документация

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
						3

3) «Коса цифровая термометрическая КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013, длиной 15 метров с 18 датчиками, с тросиком: КЦТ-01-15/18.

Допускается использовать сокращение наименования «Коса цифровая термометрическая КЦТ», в виде «Цифровая термокоса КЦТ» или «Термокоса КЦТ».

При отсутствии необходимости комплектной поставки, допускается поставка отдельных комплектующих Термокосы КЦТ.

В этом случае запись обозначения комплектующего при заказе и в документации другой продукции должна соответствовать следующим примерам:

- 1) «Логгер косы цифровой термометрической КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013: Логгер КЦТ;
- 2) «Радиомодем косы цифровой термометрической КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013: Радиомодем КЦТ;
- 3) «Утяжелитель косы цифровой термометрической КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013: Утяжелитель КЦТ;
- 4) «Тросик косы цифровой термометрической КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013: Тросик КЦТ;
- 5) «Блок сбора данных косы цифровой термометрической КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013: Блок сбора данных КЦТ;
- 6) «Переносной Блок сбора данных косы цифровой термометрической КЦТ» по ТУ 431132-001-17396396-2013: Переносной блок сбора данных КЦТ.

Коса в целом и её составные части не подлежат ни обязательной, ни добровольной сертификации. В соответствии с пунктом 1 статьи 23 Федерального закона от 27 декабря 2002 г. №184 – ФЗ «О техническом регулировании», подтверждение соответствия товара проводится только в случаях, установленных соответствующим техническим регламентом и исключительно на соответствие требований технического регламента.

Изн. № подл.	Подп. и дата				Изн. № дубл.	Подп. и дата				Изн. № инв. №	Подп. и дата				Изн. № инв. №	Подп. и дата			
ТУ 431132-001-17396396-2013																Лист			
																6			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата															

Согласно Приказу Минпроэнерго РФ №54 от 22 марта 2006 г. Декларация о соответствии оформляется на продукцию согласно классификаторам ОК 005 (ОКП) или ТН ВЭД. В соответствии с классификатором ОК 005-93 «Приборы метеорологические для измерения и регистрации / физических параметров почвы, снежного и растительного покрова», код 43 1130; «температуры почвы, снежного и растительного покрова, тепловых потоков в почве и снежном покрове», код 43 1132 – не включены в список подлежащих обязательной сертификации. В соответствии с Классификатором «Товарная номенклатура внешнеэкономической деятельности» (ТН ВЭД) оборудование регистратора и его составные части относятся к группе 9015 и не подлежат сертификации при выпуске на таможенную территорию РФ в соответствии с Письмом ФТС РФ от 20 февраля 2009 года N 01-11/7403г. «Список товаров, для которых требуется подтверждение проведения обязательной сертификации при выпуске на таможенную территорию Российской Федерации».

«Положение о рассмотрении документации на технические устройства для нефтегазодобывающих и газоперерабатывающих производств, объектов геологоразведочных работ и магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов, проведении приемочных испытаний технических устройств и выдаче разрешений на их применение» РД 08-425-01 НЕПРЕМЕНИМО ни к косе цифровой термометрической КЦТ, ни к ее составным частям. Так как статья 7 Федерального закона от 21 июля 1997 г. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменением, включая 18 декабря 2006 г.) предусматривают сертификацию «Технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте..., в том числе иностранного производства... , применяемых на опасном производственном объекте, в установленном законодательством Российской Федерации порядке. Перечень технических устройств, применяемых на опасных производственных объектах и подлежащих сертификации, разрабатывается и утверждается в порядке,

Ивв. № полл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ивв. № дубл.	Подп. и дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

1.1.6. Кабельный интерфейс логгера обеспечивается сетевым выходным протоколом USB 2.0 Full speed. Радиотелеметрический интерфейс поддерживает специализированный протокол, на выходе преобразуемый в стандартный протокол обмена. Bluetooth-соединение основывается на профиле SSP.

1.1.7. Логгер обеспечивает возможность удаленного конфигурирования.

1.1.8. Логгер обеспечивает возможность проведения периодического дистанционного тестирования и контроля работоспособности, диагностирования составных частей логгера (термогирлянды) по каналу связи с компьютера. Процесс тестирования не приводит к потере информации.

1.1.9. Состав оборудования косы указан в п.1.3.

1.1.10. Логгер соответствуют требованиям ТУ 4311323-001-17396396-2013 и имеет параметры позволяющие регистрировать сигналы датчиков в непрерывном режиме и передачу их по каналам связи.

1.1.11. Каждый логгер рассчитан на подключение одной термогирлянды.

1.1.12. Логгер обеспечивает формирование следующих выходных данных:

- файлов данных во внутренней памяти;
- потока непрерывных данных.

1.1.13. Измеряемый температурный диапазон – в пределах от минус 40 до плюс 85 °С.

1.1.14. Объем памяти Логгера –1 модуль на 8 ГБ.

1.1.15. Логгер обеспечивает регистрацию температурных данных и передачу их по выделенным и радиотелеметрическим каналам связи на ПК.

1.1.16. Программное обеспечение Логгера должно предусматривать выполнение следующих тестов:

- проверку аналоговой части;

Инв. № подл.	Полп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Полп. и дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

1.3. Комплектность

1.3.1. Комплект поставки косы определяется индивидуально для конкретного применения.

1.3.2. Типовой комплект поставки косы приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Наименование	Кол-во	Обозначение	Примечание
1 Коса цифровая термометрическая КЦТ	1	КЦТ 43 1132.001	
2 Кабель для связи с ПК	1	КЦТ 43 1132.001	
3 Источник питания	2	КЦТ 43 1132.001	
4 Технические условия	1	ТУ 431132-001-17396396-2013	
5 Руководство по эксплуатации	1	КЦТ 43 1132.001 РЭ	
6 Методика поверки	1		
7 Упаковочный лист и комплектовочная ведомость с полным перечнем упаковочных единиц	1		
8 Радиомодем КЦТ (опционально)	1		
9 Тросик КЦТ (опционально)	1		
10 Утяжелитель КЦТ (опционально)	1		

1.4. Маркировка

1.4.1. Маркировка косы соответствует ГОСТ Р 50775-95 и ГОСТ 14254.

1.4.2. На корпусе указаны:

- товарный знак или наименования предприятия – изготовителя;
- обозначение термокосы КЦТ;
- заводские номера термокосы КЦТ.

1.4.3. Способ и качество маркировки обеспечивают четкость и сохранность ее в течение всего срока службы косы.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
						12

1.5.2. Для хранения и транспортировки оборудования используется внутренняя упаковка, и транспортная тара, для внутренней упаковки используются холщовые мешки. Пустоты внутри упаковочных ящиков транспортной тары заполняются картоном по ГОСТ 7376 для исключения перемещения прибора внутри ящика и тары.

1.5.3. Порядок упаковки косы следующий:

Каждая коса и кабель помещается в отдельную тару:

- Холщовый мешок.
- Эксплуатационная документация, паспорт, упаковываются во влагозащитный пакет из полиэтиленовой пленки, вкладывается вместе с изделием под крышку упаковочного ящика
- Упаковка соответствует техническим условиям предприятия-изготовителя.

1.5.4. Внутри транспортной тары при упаковывании на верхний слой амортизационного материала помещается упаковочный лист, содержащий следующие данные:

- наименование и обозначение кос;
- количество кос;
- дату упаковывания;
- подпись или штамп ответственного за упаковывание.

1.5.5. Сопроводительная документация (паспорт, руководство по эксплуатации, инструкция по монтажу) помещается в пакет из пленки полиэтиленовой ГОСТ 10354 – 82 (края пакета завариваются).

1.5.6. Упаковка косы обеспечивает сохранность всех составных блоков на весь период транспортирования, а также его хранения в таре в течение установленного срока.

2. Требования безопасности

2.1. Электрическая прочность изоляции и сопротивление изоляции устройств косы отвечают требованиям ГОСТ Р 52931-2008.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
						14

2.2. Конструктивное исполнение косы обеспечивает его пожарную безопасность по ГОСТ Р МЭК 60065-2002 в аварийном режиме работы и при нарушении правил эксплуатации.

3. Требования охраны окружающей среды

3.1. Коса и ее составные части не вызывают загрязнения окружающей среды, не производят выбросов загрязняющих веществ и энергии. Коса не оказывает химического, механического, радиационного, электромагнитного, термического и биологического воздействия на окружающую среду; не выделяет загрязняющих и ядовитых веществ. При использовании автономных источников питания – батарей требуется их утилизация в соответствии с рекомендациями завода изготовителя.

3.2. Коса не создает экологического риска, не вызывает наступления событий, имеющих неблагоприятные последствия для окружающей среды и здоровья населения, не оказывает негативного воздействия на хозяйственную и иную деятельность, которые создают угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера.

3.3. Коса не содержит драгметаллов.

3.4. Утилизация включает в себя демонтаж, разборку технических узлов, разделение и сортировку конструкционных материалов, сбор и сортировку электронного лома согласно действующей нормативно-технической документации по переработке материалов и изделий. После разделения и сортировки все компоненты используются для переработки в качестве вторсырья. Опасные продукты и отходы при утилизации не возникают.

4. Правила приемки.

4.1. Общие положения

Инв. № по сл.	Подп. и дата	Взв. и вв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № по сл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 431132-001-17396396-2013	Лист
												15

9.1. Проведение периодической метрологической проверки косы требуется не реже 1 раза в 3 года.

9.2. Технические параметры косы, обеспечивающие метрологическую совместимость и влияющие на точность определения значения температур, форматы представления данных результатов обработки должны обеспечивать возможность:

- взаимного обмена данными и результатами обработки с национальной и мировой сетью;
- использования проверенных программ и методов обработки, используемых в мировой практике.

9.3. Программы сбора данных, реализуемые вычислительным компонентом косы согласно ГОСТ Р 8.596-2002 не подлежат метрологической аттестации в соответствии с МИ 2174—91, так как они не влияют на результаты и погрешности измерений.

Ивв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв №	Ивв. № дубл.	Подп. и дата	ТУ 431132-001-17396396-2013					Лист
										20
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Приложение А (обязательное) Ссылочные нормативные документы

Перечень документов, на которые даны ссылки в настоящих ТУ, приведены в таблице А.1.

Таблица А. 1

ГОСТ 10354 – 84	Пленка полиэтиленовая. Технические условия	1.5.5.
ГОСТ Р 52931-2008	Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия	2, 2.1.
ГОСТ Р МЭК 60065 – 2002	Аудио-, видео- и аналоговая электронная аппаратура. Требования безопасности	2.2
ОСТ 25 1240 – 86	Приборы и средства автоматизации. Надежность. Методы контрольных испытаний	4.2.6.
ГОСТ 28198 – 89	Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов	5.1.1.
РД 50 – 690 – 89	Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным	4.2.6.
ГОСТ 26828 – 86	Изделия машиностроения и приборостроения. Маркировка	5.2.5.
ГОСТ 25861 – 83	Машины вычислительные и системы обработки данных. Требования по электрической и механической безопасности и методы испытаний	5.2.5.
ГОСТ 28200 – 89	Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов Часть 2. Испытания. Испытание В: Сухое тепло	5.2.13
ГОСТ 28236 -89	Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 3. Дополнительная информация. Раздел 1. Испытания на холод и сухое тепло	5.2.13
ГОСТ 15150 – 69	Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды	Вводная часть, 6.1.1.,6.2.1.
ГОСТ Р 8. 596 – 2002	Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения	
МИ 2174 – 91	Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях	
ТУ 431132-001-17396396-2013		Лист
Изм.	Лист	№ докум.
Подп.	Дата	
		21

Приложение Г. Сертификат соответствия геофизической продукции
«ТЕЛСС-3-Э».

Геофизический комплекс «ТЕЛСС-3-Э» разработан по техническому заданию автора для выполнения электроразведочных работ методом ЗСБ на шельфе. Работы методом ЗСБ на акватории являются неотъемлемой частью авторской методики для изучения ММП на акватории шельфа арктических морей. Автор выполнил работы разработанным комплексом на следующих объектах арктического шельфа:

1. Детальные работы в заливе губы Буор-Хая, прол. Дмитрия Лаптева, северном полигоне на шельфе моря Лаптевых (2012 г.);
2. Региональные работы по геотравесу о. Колгуев – Тикси на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых морей (2012-2020 гг.);
3. Детальные работы в каньоне Геральда на шельфе Чукотского моря (2014 г.);
4. Детальные работы на приамальском шельфе в районе о. Белый на шельфе Карского моря (2015, 2017);
5. Региональные работы по геотравесу о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.);
6. Региональные работы по геотравесу о. Белый – Карские Ворота на шельфе Карского моря (2017-2020 гг.);
7. Детальные работы в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых (2017 г.);
8. Региональные работы по геотравесу о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.);



Приложение Д. Заключение соответствия заводским характеристикам геофизической продукции «APL-02»

Геофизический комплекс «APL-02» использовался для лабораторных исследований электрических свойств пород. Лабораторные испытания электрических свойств пород являются неотъемлемой частью авторской методики для изучения ММП на акватории шельфа арктических морей. Автор выполнил работы аппаратурным комплексом на следующих объектах арктического шельфа:

1. Лабораторные испытания пород на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.);
2. Лабораторные испытания пород в заливе губы Буор-Хая на шельфе моря Лаптевых (2012г.);
3. Лабораторные испытания пород в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015г.);
4. Лабораторные испытания пород на приямальском шельфе в районе о. Белый на шельфе Карского моря (2015г., 2017г.);
5. Лабораторные испытания пород в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых (2017г.);

Общество с ограниченной ответственностью Измерительные системы

142190, РФ, Московская область, г.Троицк,
ул.Лесная, д.4Б, пом.1

Тел./факс: (496)751-02-85
Тел.: (916)266-60-80

Заключение предприятия-изготовителя

Оборудование «Измеритель «APL-02»» соответствует техническим характеристикам, приведенным в ТЗ и признано годным для эксплуатации.

Дата выпуска _____ Проверено 25 ОКТ 2013

Зав.номер _____ 07

Генеральный директор _____ Кириаков В.Х.



Приложение Е. Патенты на изобретение

Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления

Разработана методика малоглубинных частотных зондирований и геофизический комплекс «HF-EM» разработан по техническому заданию автора для геофизических исследований методом ЧЗ. Геофизические исследования методом ЧЗ являются неотъемлемой частью авторской методики для изучения ММП на акватории шельфа арктических морей в транзитной зоне суша-шельф. Автор выполнил работы разработанным комплексом на следующих объектах арктического шельфа в зоне суша-шельф:

1. Детальные геофизические исследования на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.);
2. Детальные геофизические исследования в районе залива Шарапов Шар на шельфе Карского моря (2010 г.);
3. Детальные геофизические исследования в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015 г.);



Способ многокомпонентной электромагнитной съемки на акватории и система для его осуществления

Разработана методика измерения электрического и магнитного поля при регистрации в методе ЗСБ. Методика является неотъемлемой частью авторской методики для детальных исследований ММП на акватории шельфа арктических морей. Автор выполнил работы разработанным комплексом при детальных исследованиях ММП на приямальском шельфе в 2020г.



Приложение Ж. Заключение соответствия заводским характеристикам геофизической продукции «HF-EM»

Геофизический комплекс «HF-EM» разработан по техническому заданию автора для геофизических исследований методом ЧЗ. Геофизические исследования методом ЧЗ являются неотъемлемой частью авторской методики для изучения ММП на акватории шельфа арктических морей в транзитной зоне суша–шельф. Автор выполнил работы разработанным комплексом на следующих объектах арктического шельфа в зоне суша-шельф:

1. Детальные геофизические исследования на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.);
2. Детальные геофизические исследования в районе залива Шарапов Шар на шельфе Карского моря (2010 г.);
3. Детальные геофизические исследования в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015 г.);

Общество с ограниченной ответственностью Измерительные системы

142190, РФ, Московская область, г.Троицк,
ул.Лесная, д.4Б, пом.1

Тел./факс: (496)751-02-85
Тел.: (916)266-60-80

Заключение предприятия-изготовителя

Комплект оборудования (генератор, приемник) «HF-EM» соответствует техническим характеристикам, приведенным в ТЗ и признан годным для эксплуатации.

Проверено 15 МАР 2016

Дата выпуска _____

Зав.номер 04 _____

Генеральный директор _____ Кириаков В.Х.

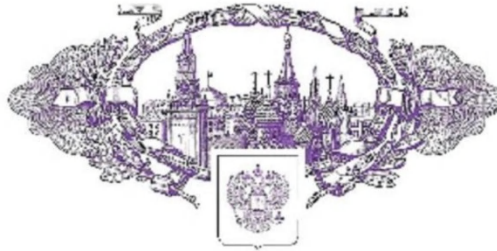


Приложение И. Свидетельство о государственной регистрации программы
«Faraday»

Программное обеспечение «Faraday» применялось автором для математического моделирования геоэлектрических разрезов по геофизическим данным методов ЗСБ и ЧЗ. Программное обеспечение разработано по техническому заданию автора для интерпретации электроразведочных данных методов ЗСБ, ЧЗ на шельфе. Интерпретация данных методов ЗСБ, ЧЗ на акватории являются неотъемлемой частью авторской методики для изучения ММП на акватории шельфа арктических морей и транзитной зоне суша-шельф. Автор выполнил интерпретацию данных на разработанном программном обеспечении на следующих объектах арктического шельфа:

1. Детальные геофизические исследования методом ЧЗ на Уральском и Ямальском участках Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009 гг.);
2. Детальные геофизические исследования методом ЧЗ в районе залива Шарапов Шар на шельфе Карского моря (2010 г.);
3. Детальные работы методом ЗСБ в заливе губы Буор-Хая, прол. Дмитрия Лаптева, северном полигоне на шельфе моря Лаптевых (2012 г.);
4. Региональные работы методом ЗСБ по геотравесу о. Колгуев – Тикси на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых морей (2012 г.);
5. Детальные работы методом ЗСБ в каньоне Геральда на шельфе Чукотского моря (2014 г.);
6. Детальные геофизические исследования методом ЧЗ в Чаунской губе на шельфе Чукотского моря (2015 г.);
7. Региональные работы методом ЗСБ по геотраверсу о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.);
8. Детальные работы методом ЗСБ на приямальском шельфе в районе о. Белый на шельфе Карского моря (2015 г., 2017 г.);
9. Региональные работы методом ЗСБ по геотраверсу о. Белый – о. Колгуев на шельфе Печорского и Карского морей (2015 г.);
10. Региональные работы методом ЗСБ по геотраверсу о. Белый – Карские Ворота на шельфе Карского моря (2017 г.);
11. Детальные работы методом ЗСБ в Хатангском заливе на шельфе моря Лаптевых (2017 г.);

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2010610763

Faraday

Правообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью
«Спектр-Геофизика» (RU)*

Автор(ы): *Пушкарев Павел Юрьевич,
Курьянов Иван Станиславович (RU)*

Заявка № 2009616591

Дата поступления 24 ноября 2009 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

22 января 2010 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б. П. Силигин

Приложение К. Акты выполненных работ автора по предлагаемой методике

В приложении приводятся акты выполненных работ, которые были выполнены автором по предлагаемой методике изучения ММП на арктическом шельфе. Работы были выполнены на шельфе Карского и Чукотского морей, приняты различными производственными организациями.

К 1.

ЗАКАЗЧИК:

ОАО «Союзморнипроект»
Юридический и почтовый адрес:
125319, г. Москва, Большой Коптевский проезд,
дом 3,
ИНН 7714654080, КПП 771401001,
р/с 40702810277000092460
в Ф-Л ОАО «БАНК «САНКТ-ПЕТЕРБУРГ» В
Г.МОСКВЕ,
к/с 30101810600000000113
ОТДЕЛЕНИЕ 2 МОСКОВСКОГО ГТУ БАНКА
РОССИИ г. Москва
БИК 044585113

ИСПОЛНИТЕЛЬ:

ООО «МГУ-геофизика»
Юридический адрес:
119192, г. Москва, Ломоносовский проспект,
д.41, корп. 1.
ИНН 7729736680, КПП 772901001,
Р/с 40702810638110020967
Московский банк ОАО «Сбербанк России»
3811/01592 г. Москва
БИК 044525225,
К/с 30101810400000000225

АКТ №1

Сдачи – приемки работ по договору № 42-1302-15/01 от 20.01.2015г.

г. Москва

« 10 » апреля 2015 г.

Открытое акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт морского транспорта «Союзморнипроект» (ОАО «Союзморнипроект»), именуемое в дальнейшем «ЗАКАЗЧИК», в лице Генерального директора М.В. Труфанова, действующего на основании Устава, с одной стороны, и Общество с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика», именуемое в дальнейшем «ИСПОЛНИТЕЛЬ», в лице Генерального директора Кошурникова Андрея Викторовича, действующего на основании Устава, с другой стороны, заключили настоящий акт о нижеследующем:

1. ИСПОЛНИТЕЛЬ сдал, а ЗАКАЗЧИК принял инженерные изыскания и геокриологические исследования под альтернативный вариант строительства гидротехнических сооружений для плавучей атомной теплоэлектростанции (на базе плавучего энергоблока проекта 20870 с реакторными установками КЛТ-40С) в г. _____ округа.

ОТ ЗАКАЗЧИКА:

Генеральный директор
ОАО «Союзморнипроект»


М.В. Труфанов
« _____ » _____ 2015 г.

ОТ ИСПОЛНИТЕЛЯ:

Генеральный директор
ООО «МГУ-геофизика»


А.В. Кошурников
« _____ » _____ 2015 г.

Подрядчик:

ООО «МГУ-геофизика»
 Юридический адрес: 119234,
 г.Москва, Ленинские Горы, д.1, стр.77
 «Научный парк МГУ им. М.В.Ломоносова»
 Почтовый адрес: 119192,
 г.Москва, Ломоносовский пр-кт, 37 «А»
 ИНН/КПП 7729736680/772901001
 р/с 40702810638110020967
 Московский банк ОАО «Сбербанк России»
 г.Москва
 БИК 044525225

Заказчик:

ОАО «МАГЭ»
 Юридический адрес: 183038,
 Российская Федерация,
 Мурманская область,
 г.Мурманск, ул. С.Перовской, 26
 ИНН/КПП 5190100088/519001001
 р/с 40702810641020002531
 к/с 30101810300000000615
 Отделение № 8627
 Сбербанка России г. Мурманск
 БИК 044705615

АКТ №3
 сдачи-приемки выполненных работ
 по договору подряда от «7» авг. 2015г.

«21» сентября 2015г.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Заказчика Генеральный директор Открытого акционерного общества "Морская арктическая геологоразведочная экспедиция" (ОАО «МАГЭ») Казанин Геннадий Семенович, действующий на основании Устава, с одной стороны и представитель Исполнителя Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика» (ООО «МГУ-геофизика») Кошуриков Андрей Викторович, действующий на основании Устава, с другой стороны, составили настоящий Акт о следующем:

1. ИСПОЛНИТЕЛЬ сдал, а ЗАКАЗЧИК принял выполненные полевые работы по инженерно-геофизическим изысканиям электроразведочным методом ЗСБ при площадных инженерно-геологических изысканиях для определения опасностей, связанных с поверхностным газом и многолетнемерзлыми породами на участке.

ИСПОЛНИТЕЛЬ:
 Генеральный директор
 ООО «МГУ-геофизика»



А.В.Кошуриков

ЗАКАЗЧИК
 Генеральный директор ОАО «МАГЭ»



Г.С. Казанин

Подрядчик:

ООО «МГУ-геофизика»
 Юридический адрес: 119234,
 г.Москва, Ленинские Горы, д.1, стр.77
 «Научный парк МГУ им. М.В.Ломоносова»
 Почтовый адрес: 119192,
 г.Москва, Ломоносовский пр-кт, 37 «А»
 ИНН/КПП 7729736680/772901001
 р/с 40702810638110020967
 Московский банк ОАО «Сбербанк России»
 г.Москва
 БИК 044525225

Заказчик:

ОАО «МАГЭ»
 Юридический адрес: 183038,
 Российская Федерация,
 Мурманская область,
 г.Мурманск, ул. С.Перовской, 26
 ИНН/КПП 5190100088/519950001
 р/с 40702810641020002531
 к/с 30101810300000000615
 Отделение № 8627
 Сбербанка России г. Мурманск
 БИК 044705615

АКТ №5

сдачи-приемки выполненных работ
 по Дополнительному соглашению №1 от 05.10.2015 г.

«14» сентября 2016 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Заказчика - Заместитель генерального директора Открытого акционерного общества "Морская арктическая геологоразведочная экспедиция" (ОАО «МАГЭ») Казанин Алексей Геннадьевич, действующий на основании Доверенности № 55АА0692239 от 12.11.2015г., с одной стороны, и представитель Исполнителя - Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика» (ООО «МГУ-геофизика») Кошуриков Андрей Викторович, действующий на основании Устава, с другой стороны, составили настоящий Акт о следующем:

ИСПОЛНИТЕЛЬ сдал, а ЗАКАЗЧИК принял камеральные работы при инженерно-геофизических изысканиях электроразведочным методом ЗСБ при площадных инженерно-геологических изысканиях для определения опасностей, связанных с поверхностным газом и многолетнемерзлыми породами на участке. Подготовка заключительного отчета.

ИСПОЛНИТЕЛЬ:
 Генеральный директор
 ООО «МГУ-геофизика»

 м.п. А.В.Кошуриков

ЗАКАЗЧИК
 Заместитель генерального директора
 ОАО «МАГЭ»

 А.Г. Казанин

ЗАКАЗЧИК:
ОАО «МАГЭ»

ИНН/КПП 5190100088/519950001
Юридический адрес: 183038, Российская Федерация,
Мурманская область, г. Мурманск, ул. С. Перовской, 26.
Т. (8152) 45-07-09, ф. (8152) 45-89-97
Банковские реквизиты в РФ:
Мурманское отделение № 8627 ПАО Сбербанк
г. Мурманск
р/с 40702810641020002531
к/с 30101810300000000615
БИК 044705615
E-mail: info@mage.ru

ИСПОЛНИТЕЛЬ:
ООО «МГУ-геофизика»

ИНН/КПП 7729736680/772901001
Юридический адрес: 119234, г. Москва,
ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 75 Д, пом. II, ком. 1
Р/с 40702810638110020967
в ПАО «Сбербанк России» г. Москва
К/с 30101810400000000225
БИК 044525225
Тел./факс: +7(495)921-60-39

АКТ № 7
Сдачи-приемки работ по договору № 124 от 01.03.2017 г.

г. Москва

« 02 » октября 2017 г.

Открытое акционерное общество «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», именуемое в дальнейшем «ЗАКАЗЧИК», в лице Заместителя генерального директора – директора филиала Казанина Алексея Геннадьевича, действующего на основании Доверенности № 51 АА 0692239 от 12 ноября 2015 г., с одной стороны, и Общество с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика», именуемое в дальнейшем «ИСПОЛНИТЕЛЬ», в лице Генерального директора Кошурникова Андрея Викторовича, действующего на основании Устава, с другой стороны, заключили настоящий Акт о нижеследующем:

ИСПОЛНИТЕЛЬ сдал, а ЗАКАЗЧИК принял выполненные работы согласно Этапу 5 Календарного плана № 1 к договору № 124 от 01.03.2017 г. Полевые работы (этап 5.4 генерального договора с ООО «МГУ-геофизика»). Выполнение полевых работ по инженерно-геофизическим изысканиям электроразведочным методом ЗСБ по объекту «_____ участок».

ОТ ЗАКАЗЧИКА:
Заместитель генерального директора-
директор филиала ОАО «МАГЭ»

ОТ ИСПОЛНИТЕЛЯ:
Генеральный директор
ООО «МГУ-геофизика»



А.Г. Казанин

М.П.



А.В. Кошурников

М.П.

ЗАКАЗЧИК:
ОАО «МАГЭ»

ИНН/КПП 5190100088/519950001
Юридический адрес: 183038, Российская Федерация,
Мурманская область, г. Мурманск, ул. С. Перовской, 26.
Т. (8152) 45-07-09, ф. (8152) 45-89-97
Банковские реквизиты в РФ:
Мурманское отделение № 8627 ПАО Сбербанк
г. Мурманск
р/с 40702810641020002531
к/с 30101810300000000615
БИК 044705615
E-mail: info@mage.ru

ИСПОЛНИТЕЛЬ:
ООО «МГУ-геофизика»

ИНН/КПП 7729736680/772901001
Юридический адрес: 119234, г. Москва,
ул. Ленинские Горы, д.1. стр.75 Д, пом. II, ком.1
Р/с 40702810638110020967
в ПАО «Сбербанк России» г. Москва
К/с 30101810400000000225
БИК 044525225
Тел./факс: +7(495)921-60-39

АКТ № 11

Сдачи-приемки работ по договору № 124 от 01.03.2017 г.

г.Москва

« 01 » ноября 2017 г.

Открытое акционерное общество «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», именуемое в дальнейшем «ЗАКАЗЧИК», в лице Заместителя генерального директора – директора филиала Казанина Алексея Геннадьевича, действующего на основании Доверенности № 51 АА 0692239 от 12 ноября 2015 г., с одной стороны, и Общество с ограниченной ответственностью «МГУ-геофизика», именуемое в дальнейшем «ИСПОЛНИТЕЛЬ», в лице Генерального директора Кошурникова Андрея Викторовича, действующего на основании Устава, с другой стороны, заключили настоящий Акт о нижеследующем:

ИСПОЛНИТЕЛЬ сдал, а ЗАКАЗЧИК принял выполненные работы согласно Этапу 7 Календарного плана № 1 к договору № 124 от 01.03.2017 г. Полевые работы. (этап 5.5 – 5.6 генерального договора с ООО «МГУ-геофизика»). Геокриология и термометрия в 5 скважинах по 50 м на объектах «Площадные инженерно-геологические изыскания на участке» и «...».

ОТ ЗАКАЗЧИКА:
Заместитель генерального директора-
директор филиала ОАО «МАГЭ»



А.Г. Казанин

ОТ ИСПОЛНИТЕЛЯ:
Генеральный директор
ООО «МГУ-геофизика»



М.П.

А.В. Кошурников