

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Кошурников Андрей Викторович

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

Специальности:

1.6.7 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Работа подготовлена на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный консультант — **Брушков Анатолий Викторович,**
доктор геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты —

Железняк Михаил Николаевич,
доктор геолого-минералогических наук, член – корреспондент РАН,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского
отделения Российской академии наук, директор

Хуторской Михаил Давыдович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геологический институт Российской академии наук,
заведующий лабораторией тепломассопереноса

Сорохтин Николай Олегович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской академии
наук, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится 1 июня 2023 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

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

<https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.1/2469>

Автореферат разослан 31 марта 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

доктор геолого-минералогических наук  Н.А. Харитоновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Береговая эрозия сегодня составляет на отдельных участках побережья до нескольких метров в год, что связано прежде всего с оттаиванием многолетнемерзлых пород. Деградация многолетнемерзлых толщ наблюдается как на суше, так и на акватории. Устойчивость береговой инфраструктуры связана с сохранением грунтов побережья зоны в мерзлом состоянии.

Разведка и добыча полезных ископаемых, проектирование и строительство коммерческих терминалов, линейных и других инженерных сооружений требует знаний о распространении многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе и побережье, их свойствах и несущей способности. Зоны газонасыщения, районы деградации многолетнемерзлых пород представляют опасность для размещения разведочных и добывающих скважин.

Актуальной задачей являются исследования залежей газовых гидратов на побережье и шельфе, которые могут внести важный вклад в прирост минерально-сырьевой базы России. Однако сегодня, в связи с деградацией многолетнемерзлых пород, разложение газовых гидратов является угрозой для безопасности инженерных сооружений и людей, работающих в этих районах.

Одним из приоритетных направлений развития МГУ им. М.В. Ломоносова является решение проблемы 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 (Maskay, 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, 1989; 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 этой цели были поставлены 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).

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 простиранию 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 сквозных таликов имеют

простирается 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 простираемость 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 геокриолого-геофизических методов для изучения распространения и строения многолетнемерзлых пород на шельфе морей Российской Арктики. 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-ЕМ», разработанного по техническому заданию автора;

- подтверждение геофизических данных бурением с припайного льда и акватории, выполнении термометрии в скважинах, пройденных с припайного льда и на акватории при помощи аппаратного комплекса КЦТ с возможностью передачи данных по радиоканалу (на комплекс КЦТ получен сертификат 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 зондирований становлением поля для акватории шельфа, электромагнитные зондирования методом зондирований становлением поля и методом частотных зондирований 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 зондирований 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 «козырьков» 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-C3 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 2006–2020 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 мерзлых пород, 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 создания аппаратурного геофизического комплекса «HF-EM» для электромагнитных исследований методом частотных зондирований в переходной зоне суша-шельф, 2006 г.; разработка технического задания для создания аппаратурного геофизического комплекса «ТЕЛСС-3-Э» для электромагнитных исследований методом становления поля на шельфе, 2012 г.; разработка технического задания для создания аппаратурного геофизического комплекса «APL-02» для лабораторных измерений электрических свойств грунтов шельфа; разработка технического задания для создания аппаратурного геофизического комплекса КЦТ для термометрических исследований на шельфе, 2016 г.; построение 3D геокриологической модели на ямальском участке и 2D геокриологической модели на уральском участке Байдарацкой губы по данным бурения, термометрии, геофизических исследований, лабораторных испытаний грунтов на 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 и лабораторных испытаний, 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 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 2017–2020 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. Ивановым. 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 Н.Н. Романовским, В.В. Баулиным, 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, Е.И.Балихиным. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность темы исследований, показана степень разработанности проблемы, рассмотрены цель работы и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, приведены защищаемые положения, данные о степени достоверности и апробации результатов, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Глава 1. Современное состояние исследований криолитозоны арктического шельфа и применение геофизических методов

Существование мерзлых толщ на шельфе арктических морей подтверждено результатами бурения АМИГЭ, ИМ СО РАН, Севморгео, МГУ, Beaufort Sea Environmental Project в Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском морях и в море Бофорта. На шельфе Карского моря 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 полуострова Ямал, в том числе на Харасавейском мелководье (Григорьев, 1987; Мельников и др., 1995), в пределах Ленинградского месторождения (Заключение...Ленинградская-1, 1989), на шельфе моря Лаптевых в заливе губы Буор-Хая (Кошурников и др., 2016), в Хатангском заливе (Koshurnikov et al., 2020). 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.

Анализ автором опубликованных данных о криолитозоне арктического шельфа показал, что имеющийся материал, в основном в силу его ограниченности, не дает возможность сформировать

согласующиеся представления о глубинах залегания и мощности многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе. Существуют противоречивые представления о границах распространения и строении криолитозоны шельфа.

Согласно первой точке зрения, многолетнемерзлые породы 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 многолетнемерзлых пород, 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, 1981; Жигарев, 1997; Романовский, 1993; Гаврилов, 2008; Перлова и др., 2017; Холмянский и др., 2017). Для шельфа Карского и Лаптевых морей предполагается наличие реликтовых мерзлых пород в пределах континентального мелководья с глубинами до 50–100 м. По данным геофизических (сейсмоакустических) исследований опубликованы схемы распространения областей акустических фаций (Рокос и др., 2009), связанных с криогенными процессами. Области возможного распространения многолетнемерзлых пород, сейчас или в прошлом, по данным С. И. Рокоса, простираются на шельфе Карского моря до 100–150 км западнее береговой линии полуострова Ямал, охватывают всю Байдарацкую губу, не зафиксированы в Карских воротах и простираются на удалении до 200 км вдоль береговой линии Печорского моря от о-ва Вайгач до о-ва Колгуев. По данным сейсмоакустики (Рекант и др., 2011), субаквальные многолетнемерзлые породы распространены на шельфе вдоль полуострова Ямал и Гыдан, и далее к полуострову Таймыр на расстоянии до 300 км от береговой линии.

Эффективность геофизических методов для решения геокриологических задач на шельфе определяется контрастностью физических свойств талых и мерзлых толщ. Лабораторные исследования автором талых и мерзлых (Зыков и др., 2013), в том числе засоленных (Кошурников и др., 2019), газонасыщенных (Хименков и др., 2020) пород показали, что наиболее информативными для изучения строения криолитозоны являются электрические и акустические свойства пород шельфа. В настоящее время для решения так и не

решенных сейсморазведкой и сейсмоакустикой задач все чаще начинают применяться электроразведочные методы, в ряде случаев имеющие принципиальные преимущества перед методами сейсморазведки.

Традиционные методы сейсмоакустики успешно справляются с задачами литологического расчленения в горизонтально слоистых средах осадочных толщ на акватории. При промерзании геометрия среды нарушается криогенными преобразованиями (Хименков и др., 2019) и методы сейсмоакустики становятся менее информативными. Для изучения мерзлых пород преимущественно обладают методы электроразведки из-за чувствительности к удельному электрическому сопротивлению (УЭС) осадочной толщи. Процессы криолитогенеза приводят к увеличению УЭС толщ осадочных пород из-за образования льда. Криогенные изменения в строении осадочных пород являются фактором, обеспечивающим контраст УЭС талых и мерзлых пород, и эффективность применения электроразведки (Тюрин и др., 2019).

Для интерпретации геофизических данных автору необходимо было построить геологическую модель. Мощности осадочного чехла на шельфе Печорского, Карского и Лаптевых морей составляют от 10–15 км во впадинах, до 1–3 км на валах осадочного чехла (Богданов, 2004). Оценка мощностей осадочных отложений важна для однозначной интерпретации геофизических данных, т.к. и мерзлые осадочные, и скальные породы фундамента характеризуются повышенными сопротивлениями. Осадочный чехол на шельфе Печорского и Карского морей представлен толщей палеозойских терригенных отложений и толщей терригенных отложений юрско-мелового возраста, перекрытых кайнозойским чехлом терригенных отложений. Осадочный чехол на шельфе моря Лаптевых представлен терригенными толщами верхнемелового-кайнозойского возраста (Гусев и др., 2002).

Обзор геокриологических условий западного сектора морей Российской Арктики составлен в работе по исследованиям В.Т. Трофимова, Ю.К. Васильчука, М.Н. Григорьева, В.П. Мельникова и дополнен данными автора. Обзор геокриологических условий восточного сектора морей Российской Арктики составлен в работе по данным Н.Ф. Григорьева, Л.А. Жигарева, М.Н. Григорьева и дополнен новыми данными автора, полученными в экспедиционных исследованиях в Хатангском заливе, заливе губы Буор-Хая, Чаунской губе и др.

Мощности многолетнемерзлых толщ оценивались путем математического моделирования А.И. Фартышевым (1993), Я.В. Неизвестным (1981), В.А. Соловьевым (1982), А.Л. Чеховским (1972), в результате которого были получены различные мощности ММП для одних и тех же районов шельфа. Последние работы были выполнены А.Н. Портновым (2014) для шельфа Карского моря и Н.Н. Романовским (2006), А.В. Гавриловым (2019) для восточного сектора морей Российской Арктики. Результаты расчетов зависят от выбранных палеосценариев на арктическом шельфе и физических свойств пород шельфа.

Таким образом, сегодня нет однозначного мнения о границах распространения субмаринной криолитозоны, ее строении, сплошном или прерывистом ее распространении на шельфе арктических морей. Существуют предположения о ее мощности, глубине кровли и подошвы, и имеются лишь некоторые представления о состоянии пород, подстилающих субмаринную криолитозону. Геофизические, в основном сейсмоакустические, методы широко применяются для литологического расчленения осадочной толщи шельфа, поиска зон газонасыщения. Однако определение кровли, и тем более подошвы, многолетнемерзлых пород по данным сейсмоакустики недостаточно информативно (Боганик, Гурвич, 2006).

Глава 2. Методика геокриолого-геофизических исследований криолитозоны шельфа

Методика работ 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).

Необходимость выполнения лабораторных испытаний на образцах пород шельфа арктических морей объясняется, с одной стороны, задачей выбора геофизической технологии изучения субмаринной криолитозоны и, с другой стороны, потребностью в характеристиках гео- и теплофизических свойств талых и мерзлых пород для математического моделирования (электромагнитного и теплового). Такими характеристиками являются скорости продольных и поперечных волн талых и мерзлых пород для интерпретации данных

сейсморазведки и сейсмоакустики, УЭС и поляризуемости для интерпретации данных электроразведки талых и мерзлых пород шельфа арктических морей. Результаты лабораторного определения плотности, влажности, температур начала замерзания, теплопроводности и теплоемкости талых и мерзлых пород шельфа арктических морей применялись для решения тепловых задач. Лабораторные испытания были выполнены для талых и мерзлых пород на опорных участках арктического шельфа. Результаты показали, что при промерзании морских отложений криогенное строение определяется засоленностью осадков, а удельные электрические сопротивления увеличиваются в $1\text{--}10^5$ раз, тогда как скорости продольных волн увеличиваются в 1,5–2 раза в зависимости от литологического состава пород шельфа (Хименков и др., 2018). Поэтому для изучения субмаринной криолитозоны были выбраны именно методы электроразведки (Зыков и др., 2005; Кошурников и др., 2008).

Для выполнения морских электроразведочных исследований методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ) в летний период автором было разработано техническое задание для производства многофункционального, многоканального морского телеметрического электроразведочного комплекса «ТЕЛСС-З-Э». Опыт выполнения электроразведочных работ на шельфе арктических морей в период 2006–2020 гг. позволил усовершенствовать методику полевых измерений согласно патента № 2754364 для детальных исследований криолитозоны шельфа. Для выполнения электроразведочных исследований в транзитной зоне суша-шельф в зимний период автором был разработан способ выполнения малоглубинных частотных зондирований (ЧЗ), подтвержденный патентом № 2280269. По техническому заданию, разработанному автором, произведен аппаратный комплекс «HF-ЕМ» для работ методом ЧЗ, позволивший получить новые данные о строении уральского и ямальского участков Байдарацкой губы на шельфе Карского моря в 2006–2009 гг., залива Шарапов Шар на шельфе Карского моря в 2010 г., Чаунской губы на шельфе Чукотского моря 2015 г. (Зыков и др., 2008).

Геофизические исследования, выполненные на акватории или с припайного льда, позволяют получить модели распределения УЭС на шельфе. Интерпретация данных электромагнитных зондирований заключается в 1D инверсии кривых кажущегося сопротивления в геоэлектрические разрезы УЭС с помощью их математического

моделирования в программном обеспечении «Faraday», разработанного по техническому заданию автора. Отличие применяющейся нами методики интерпретации данных геофизики заключается в использовании для стартовых геоэлектрических моделей значений УЭС, полученных при лабораторных испытаниях грунтов на опорных участках. Такой подход к решению неустойчивой обратной задачи геофизики позволил получить ее устойчивое решение применительно к опорным участкам арктического шельфа. Апробация этого подхода была выполнена в кандидатской диссертации автора (Бердичевский и др., 1999).

Вторым условием было производство инженерно-геологического бурения с отбором образцов и их исследованием.

Третьей особенностью предлагаемой методики является измерение температурного поля в скважинах на опорных участках с регистрацией температурного поля на льду и на акватории. Для измерения температур грунтов на акватории автором было разработано техническое задание на цифровые термометрические косы, которые были изготовлены и сертифицированы. При измерениях использовались логгеры, аппаратура связи и обработки. В зимний период все работы производились непосредственно с припайного льда. Разработанная технология регистрации температуры грунтов на шельфе позволяет накапливать данные в условиях арктического шельфа в течение нескольких лет и передавать накопленные данные на расстояние до 1 км при высоте волны не более 2 м. Такой режим работы необходим при геокриологических исследованиях на арктическом шельфе в связи с растеплением скважин при бурении, особенно при выполнении буровых работ с судна. Исследования автора показали, что при бурении с припайного льда при минимальных оборотах бурового инструмента необходима выстойка скважин от 1–2 дней в суглинистых грунтах, до 3–5 дней в супесчаных грунтах. Методика применялась в Чаунской губе, шельф Чукотского моря (2015 г.), на приямальском шельфе, район о-ва Белый, шельф Карского моря (2016–2018 гг.), в Хатангском заливе, шельф моря Лаптевых (2017 г.).

Четвертым условием для выполнения инверсии геофизических данных, проведения тепловых расчетов, оценки фазового состояния пород шельфа являются лабораторные испытания грунтов. Испытания выполнялись в полевых и лабораторных условиях, определялись

физические, водно-физические и теплофизические свойства, электрические, акустические свойства талых и мерзлых пород шельфа.

Пятой составляющей комплекса исследований 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.

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

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). 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 $-24\ldots-34^{\circ}\text{C}$ (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 субэкринного в субмаринное состояние (при трансгрессии арктического бассейна) температура мерзлой толщи повышалась, по-видимому, от $-20\ldots-25^{\circ}\text{C}$ до $-1\ldots-1,8^{\circ}\text{C}$ (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 (Miller et al., 2010) и палеотемпературные данные на поверхности в позднем плейстоцене - голоцене (Васильчук, 1991, 1992, 2006).

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).

Геолого-тектонические данные были обобщены, систематизированы и приведены в работе в приложении А. В палеогеографических сценариях для теплового моделирования температуры на поверхности зависели от четырех факторов: глубины

арктического бассейна, широтной зональности, меридиональной зональности, влияния фронта положительных температур моря на глубинах 2–10 м в период трансгрессии.

Для моделирования положения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского, Карского и Лаптевых морей была построена одномерная тепловая модель промерзания-оттаивания. Было использовано программное обеспечение «Тундра» (автор Г.П. Пустовойт) и «QFrost» (автор Д.В. Песоцкий), разработанное и опробованное на кафедре геокриологии МГУ и широко используемое в других организациях. Сравнение результатов решения задачи Стефана по этим программам показало близкие результаты для опорных участков 1–7.

В Карском море 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 происходило 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 300–350 м (рис. 1).

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. 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. 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

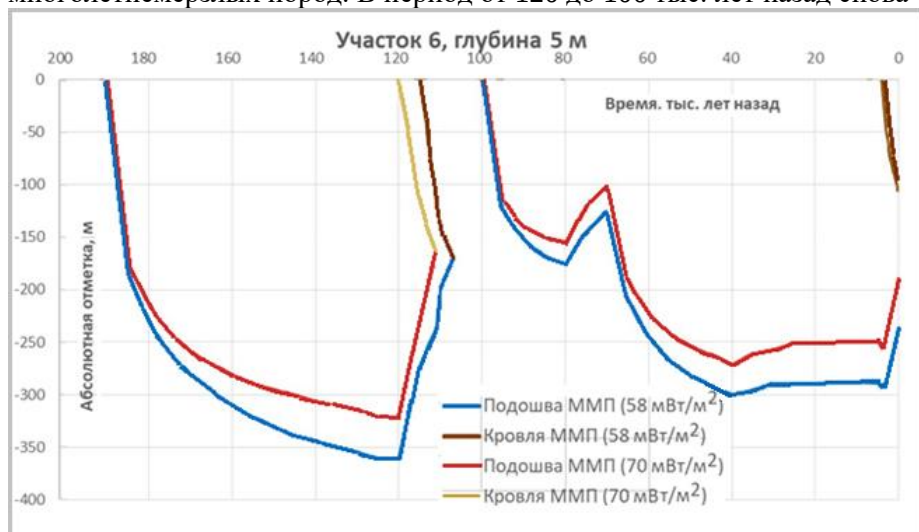


Рис. 1. Кривые положения кровли и подошвы ММП в разные моменты времени при различных тепловых потоках из недр по данным теплового моделирования для опорного участка Байдарацкая губа. Изобата 5 м.

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.

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.

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 и 600 м для восточного сектора Российской Арктики) несколько выше результатов известных ранее – 200 м для западного сектора (Portnov et al., 2014) и 540 м для восточного (Романовский и др., 2006) Результаты расчетов положения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород для зон 1–7 приведены в приложении Б к тексту диссертации.

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

Экспедиционные исследования были выполнены на геотраверсах в акватории Баренцева, Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского морей (рис.2).

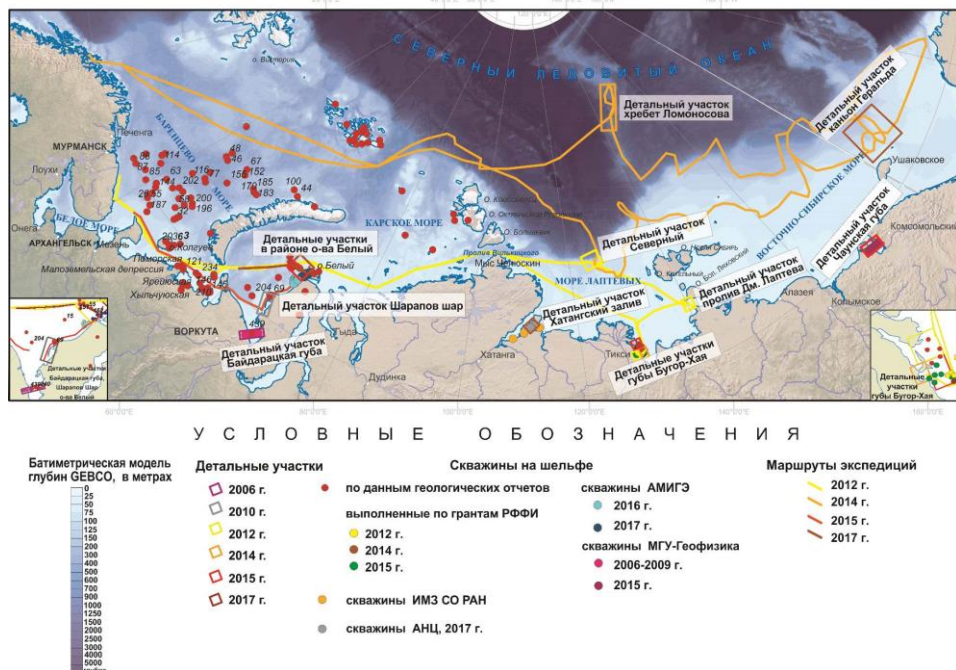


Рис. 2 Карта фактического материала. Контурами разного цвета указаны участки работ автора в разное время. Линии разного цвета — геофизические профили автора разных лет

Важнейшей особенностью геоэлектрического разреза на шельфе Печорского моря является существование трех слоев с различными удельными электрическими сопротивлениями. Первый слой имеет мощность от 10 м до 70 м с удельным электрическим сопротивлением 0,3 Ом·м. Под ним находится второй слой, имеющий мощность от 30 м до 150 м и сопротивление 0,9–1,1 Ом·м. Третий слой находится на глубине от 80 м и имеет мощность более 300 м, его сопротивление от 2,5 до 20 Ом·м. Результаты исследований позволяют оценить сплошность наиболее высокоомного третьего слоя в модели (рис. 3 а).

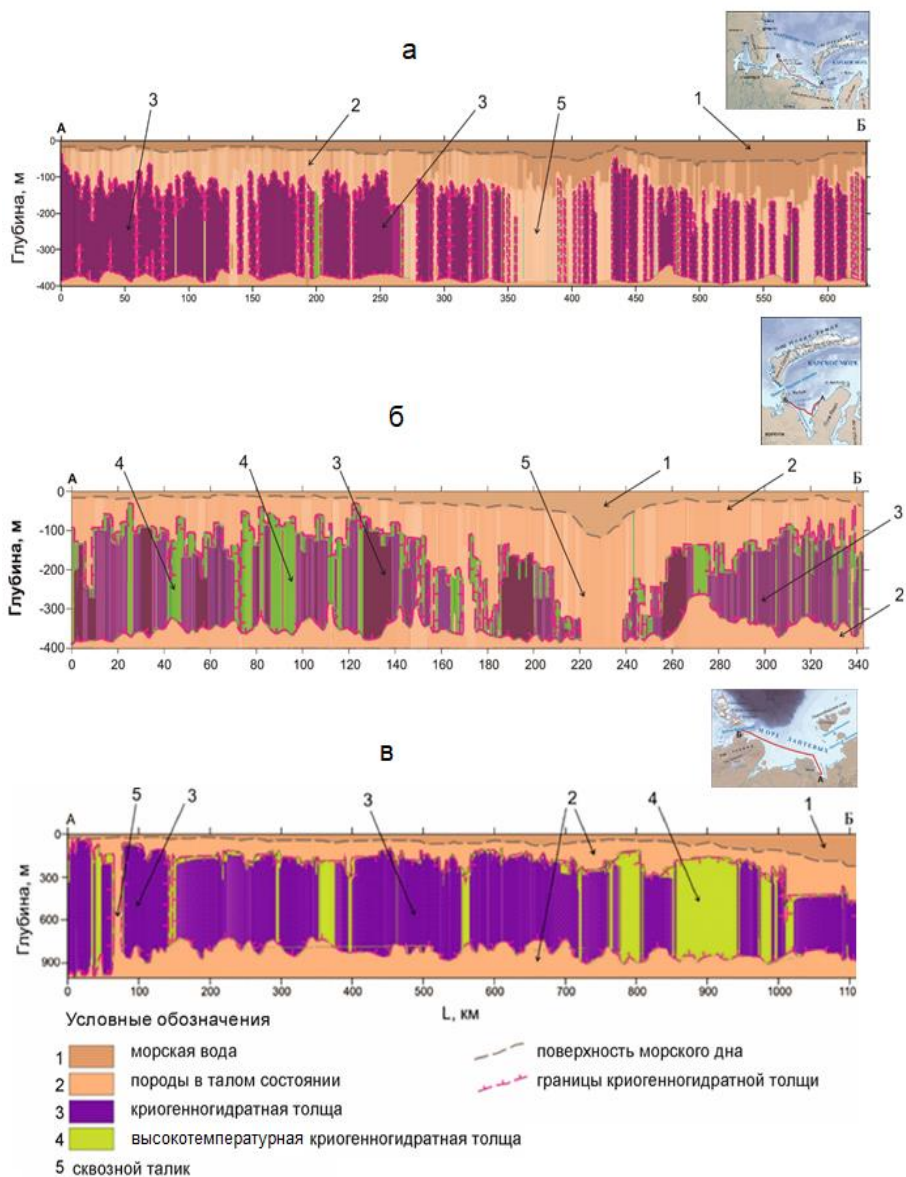


Рис. 3. 2D геокриологические модели шельфа: а – Печорского моря; б – Карского моря; в – моря Лаптевых.

Для западной части Печорского профиля характерно островное проявление третьего слоя на разрезе. Отдельные острова имеют простирание не более 1–5 км вдоль профиля, тогда как зоны отсутствия высокоомного слоя составляют 10–50 км. Для восточной части Печорского профиля характерно массивно-островное проявление третьего слоя в разрезе. Острова имеют простирание от 10 до 50 км вдоль профиля, а зоны отсутствия высокоомного слоя составляют 1–7 км (рис. 3 а).

Геoeлектрический разрез шельфа Карского моря имеет принципиально похожее строение и фиксирует слой высоких сопротивлений на глубинах от 50–100 м до 300–410 м на шельфе. Для шельфа Карского моря характерно прерывистое распространение высокоомного слоя. На протяжении 100–200 км участков профиля, где высокоомный слой непрерывен, встречаются участки профиля длиной 10–50 м, где он отсутствует.

На Карском шельфе высокоомный слой имеет более низкий уровень удельных сопротивлений, более представлен, имеет большую сплошность, отсутствует полностью в западной части и частично – в восточной части участка профиля, пересекающего Байдарацкую губу (рис. 3 б).

Детальные геофизические исследования показали еще большую изменчивость и неоднородность высокоомного слоя. К северу от Харасавейского месторождения на приямальском шельфе был детально исследован участок шельфа размером 50х50 км при глубинах акватории 10–100 м (рис. 4). На этом участке результаты геофизических исследований 2015 г. были проверены буровыми работами с судна в 2016 г. Результаты бурения и термометрические наблюдения автора дали возможность получить новые данные о природе геoeлектрических слоев в модели. В верхней части геoeлектрического разреза прослеживается слой с низкими значениями удельного электрического сопротивления ($0,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) – морская вода. Второй от поверхности слой ($1\text{--}2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) – охлажденные породы. Ниже в геoeлектрическом строении разреза наблюдается зона повышенного сопротивления (более $4\text{--}5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), природа этого слоя связана с засоленными многолетнемерзлыми породами, обладающими большим процентным содержанием незамерзшей воды, находящимися при температуре близкой к температуре начала замерзания, имеющими безградиентное распределение температурного поля по глубине.

Геофизические работы показали прерывистое распространение многолетнемерзлых пород на этом участке (рис. 4).

Сравнение геофизических данных и результатов бурения с припайного льда, выполненного в районе приамальского шельфа, залива Шарапов Шар, пролива Мутный Шар, залива Байдарацкой губы, а также анализ фондовых данных свидетельствует о связи высокоомного слоя на шельфах Печорского и Карского морей с многолетнемерзлыми породами (рис. 3). Кровля и подошва многолетнемерзлых пород имеют большое количество погруженных участков или сквозных таликов (рис. 4).

Работы, выполненные с припайного льда в заливах Байдарацкой губы, Шарапов Шар методом ЧЗ, позволили установить двухслойное строение многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суша-шельф Карского моря. Показано, что на шельфе Карского моря, помимо выступов реликтовой мерзлоты, существуют «козырьки» современных многолетнемерзлых пород на глубинах 0–10 м (рис. 5). Мощность современных «козырьков» многолетнемерзлых пород составляет не более 10 м, а их простираение до 180–220 м.

В восточном секторе Российской Арктики был исследован шельф моря Лаптевых, а также Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Анализ меридиональной геоэлектрической модели через шельф моря Лаптевых позволил установить существование на шельфе сплошного высокоомного слоя от пролива Вилькицкого до пос. Тикси с характерными сопротивлениями 5–20 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. 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 1000–1170 м (рис. 3 в).

На полигоне в заливе губы Буор-Хая была выполнена проверка результатов геофизических работ бурением, показавшая, что природа высокоомного слоя связана с многолетнемерзлыми породами. Мерзлые породы были представлены песками с массивной криогенной текстурой, и прослоями суглинков с редколинзовидной криогенной текстурой в самой верхней части многолетнемерзлой толщи и далее,

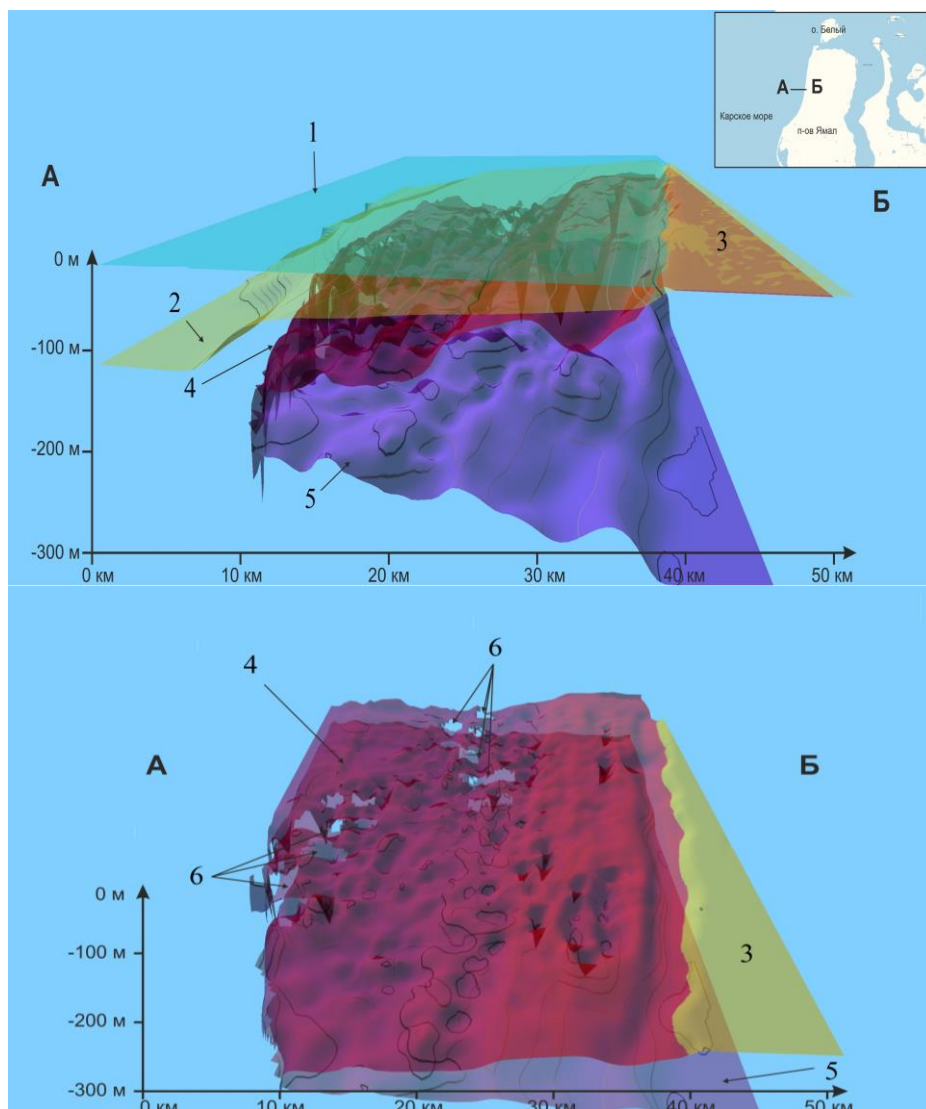


Рис. 4. 3D геокриологическая модель участка шельфа Карского моря. Цифрами и цветом показаны разные поверхности: 1 - уровень акватории (голубой), 2 - поверхность дна (песочный), 3 - поверхность суши (желтый), 4 - кровля ММП (малиновый), 5 - подошва ММП (фиолетовый), 6 - таликовые зоны.

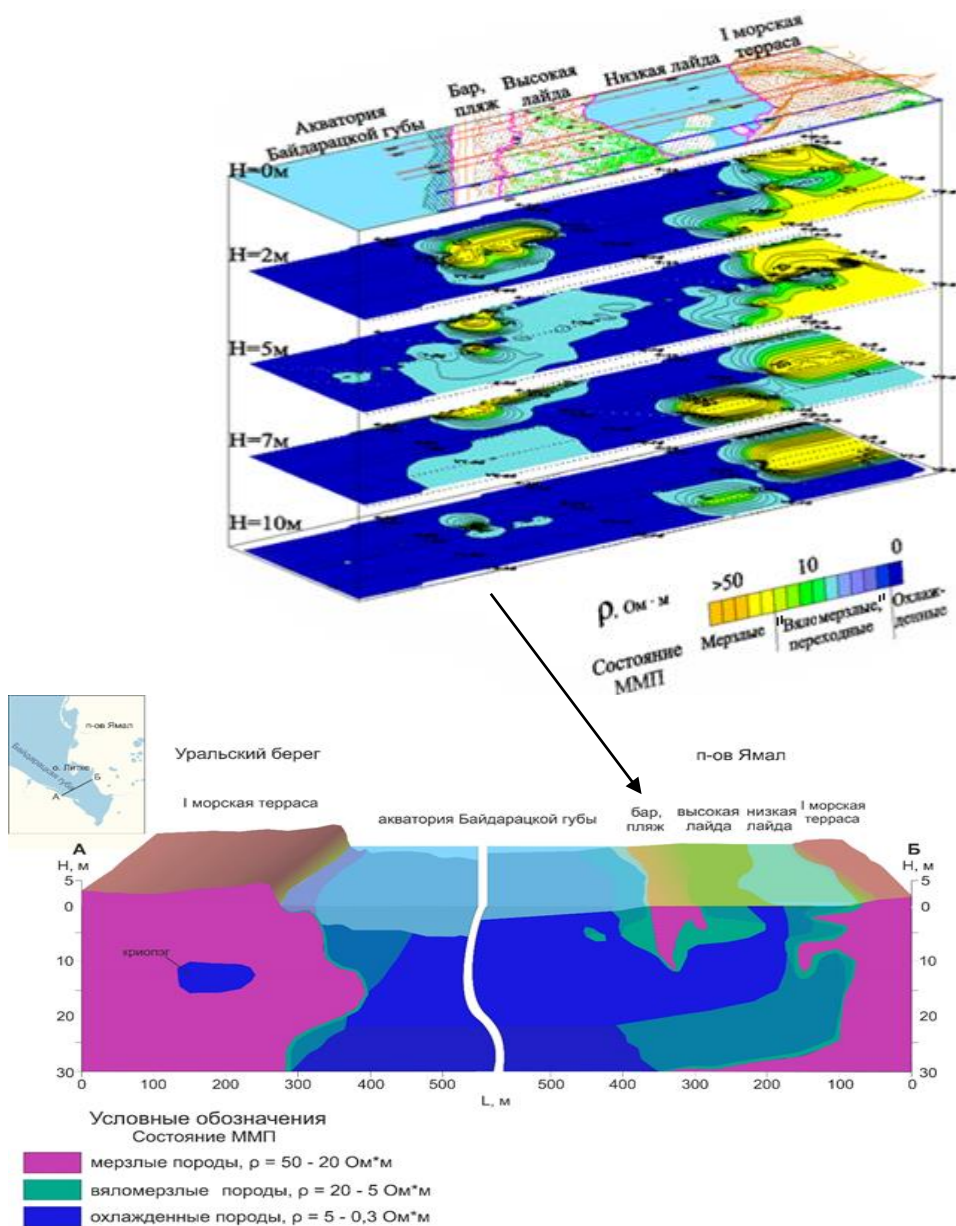


Рис. 5. 3D модель состояния многолетнемерзлых толщ участка транзитной зоны суша-шельф Карского моря.

до забоя скважины, песками с массивными криогенными текстурами. (Кошурников и др., 2016). Детальные 3D геофизические исследования 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).

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

Геокриолого-геофизический анализ тепловых моделей для шельфа морей Лаптевых, Карского и Печорского показал следующее. Мощности многолетнемерзлых пород по данным тепловых расчетов не превышают 600–700 м, тогда как мощности высокоомных слоев достигают 1000 м и более 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. 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 участках профилей, 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. Чувиллина, Г.С. Типенко, И.А. Комарова с 500 м для моря Лаптевых (Tipenko et al., 1990; Романовский и др., 1990; Комаров, 2003). Таким образом, в результате электромагнитных исследований на шельфе морей Российской Арктики можно, по-видимому, выделить 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.2). Под криогенногидратной толщей понимается толща пород, экспериментально зафиксированная на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского 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 и распространению зон стабильности газовых гидратов. 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.

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. all, 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.2). 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 сквозь многолетнемерзлые породы.

Глава 5. Районирование многолетнемерзлых толщ на арктическом шельфе

Обобщение результатов исследований позволяет предложить следующую типизацию многолетнемерзлых пород арктического шельфа, приведенную в диссертации. 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-теплового баланса с широтой; изменение атмосферных условий с долготой. 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. 6). Для построения схемы использовались региональные геокриологические 2D модели шельфа (рис. 3), 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 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 толщ от 2,5 до 15 Ом·м, в зависимости от района исследований, солености 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). Геокриолого-геофизические данные были систематизированы на актуальной геодезической основе GEBCO (The GEBCO..., 2017) (рис. 6). Новые результаты позволили уточнить и дополнить представления о состоянии многолетнемерзлых толщ, известные ранее (Романовский, 1993). 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 высокотемпературных мерзлых толщ обнаружены и на шельфе морей западной Арктики (рис. 6). 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 многолетнемерзлых и гидратных толщ на шельфе (рис. 6). В исследованиях М.А. Холмянского (Холмянский и др., 2017) показана граница 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. 6). 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. 6). 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).

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 зондирований 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 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 (прямальский 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 простираение 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 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.

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском Государственном университете им. М.В. Ломоносова, опубликованные автором по теме диссертации:

1. Кошурников А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 3. С. 116–125. Импакт фактор РИНЦ₂₀₂₀ -0,830. Объем публикации: 1,32 п.л.

2. Кошурников А.В. Применение комплексного геокриолого-геофизического анализа при исследовании многолетнемерзлых пород и газогидратов на шельфе морей Российской Арктики. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2020. №. 3. С. 36–44. Импакт фактор РИНЦ₂₀₂₀ - 0,870. Объем публикации: 1,19 п.л.

3. Кошурников А.В., Котов П.И., Агапкин И.А. Влияние засоленности на акустические и электрические свойства мерзлых грунтов. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 6. С. 99–106. Импакт фактор РИНЦ₂₀₁₉ - 0,830. Объем публикации: 0,96 п.л., объем вклада соискателя: 0,24 п.л.

4. 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. 2016. Т. 469. № 5. С. 616–620. Импакт фактор РИНЦ₂₀₁₆ -1,354. Объем публикации: 0,84 п.л., объем вклада соискателя: 0,62 п.л.

5. Кошурников А.В., Зыков Ю.Д., Пушкарев П.Ю., Хасанов И.М. Электромагнитные исследования при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне. //Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 25–27. Импакт фактор РИНЦ₂₀₀₈ – 0,195. Объем публикации: 0,34 п.л., объем вклада соискателя: 0,31 п.л.

6. Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В. Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне. //Физика Земли. 1999. № 10. С. 3–25. Импакт фактор РИНЦ₁₉₉₉ - 0,822. Объем публикации: 2,32 п.л., объем вклада соискателя: 1,87 п.л.

7. 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. 2022. № 5. С. 158-170. Импакт фактор РИНЦ₂₀₂₂ – 0,580, объем публикации: 1,16 п.л., объем вклада соискателя: 0,27 п.л.

8. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Сергеев Д.О., Соболев П.А. Газонасыщенные мерзлые породы криолитозоны // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 2. С. 3-16. Импакт фактор РИНЦ₂₀₂₁ – 0,264. Объем публикации: 1,42 п.л., объем вклада соискателя: 0,33 п.л.

9. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. Фльтрация газа в мерзлых грунтах. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 3. С. 97–103. Импакт РИНЦ₂₀₂₀ - 0,830. Объем публикации: 0,92 п.л., объем вклада соискателя: 0,35 п.л.

10. 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. 2018. Т. 22. №3. С. 40-51. Импакт фактор РИНЦ₂₀₁₉ – 1,380. Объем публикации: 1,31 п.л., объем вклада соискателя: 0,15 п.л.

11. 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. Импакт фактор РИНЦ₂₀₁₉ - 0,830. Объем публикации: 1,18 п.л., объем вклада соискателя: 0,25 п.л.

12. 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. Импакт фактор РИНЦ₂₀₂₂ - 0,830. Объем публикации: 1,1 п.л., объем вклада соискателя: 0,35 п.л.

13. 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, V. 11. No 5. P. 2305–2327. IF WoS₂₀₁₇ - 3,016. Total vol. 2.6 p. sh., author's. vol. 0.4 p. sh.

14. 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. IF SJR₂₀₁₇ - 0,166. Total vol. 1.7 p. sh., author's. vol. 0.3 p. sh.

15. 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, 2019. V. 30, N 1, P. 35-47, IF WoS₂₀₁₉ - 3,091. Total vol. 1.2 p. sh., author's vol. 0.8 p. sh.

16. 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., Rezwani Mohammad R., Semiletov I. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the

penultimate glaciation. //Nature communications. 2016. V. 7. P. 10365. IF WoS₂₀₁₆ - 13,811. Total vol. 1.2 p. sh., author's. vol. 0.3 p. sh.

17. 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. March 2020. Vol. 30. N. 1. P. 86–93, IF SJR₂₀₂₁ - 0,367. Total vol. 0.8 p.s, author's vol. 0.7 p.sh.

18. 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. 2017. V. 14. No 12. P. 2929–2953. IF SJR₂₀₂₁ - 1,548. Total vol. 2.6 p. sh., author's. vol. 0.4 p. sh.

19. 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. 2016. V. 17. No 5, P. 1608–1622. IF SJR₂₀₂₁ – 1,881. Total vol. 1.4 p. sh., author's. vol. 0.3 p. sh.

20. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovskiy L., Dudarev O., Tumskoy 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.. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. // Nature communications. V. 8. P. 15872. IF WoS₂₀₁₇ - 13,811. Total vol. 1.3 p. sh., author's. vol. 0.4 p. sh..

Иные публикации

21. 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. 2020.07.23.

22. 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.