

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 550.837:550.836:550.8.05:551.34

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОКРИОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
И ГАЗОГИДРАТОВ НА ШЕЛЬФЕ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2020 г. А. В. Кошурников*

МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, 1, Москва, 119234 Россия

**E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2019 г.

После доработки 11.01.2020 г.

Принята к публикации 25.01.2020 г.

Активное освоение Российской Арктики в последнее 10 лет требует актуальных данных о несущей способности пород на арктическом шельфе РФ. Для оценки несущей способности грунтов необходимы современные знания о распространении и состоянии многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе. В статье рассматриваются результаты применения комплексного геокриолого-геофизического анализа, включающего электроразведку методом зондирования становлением поля для изучения многолетнемерзлых пород на шельфе, электроразведку методом малоуглубинных частотных зондирования для изучения многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суша–шельф, инверсию геофизических данных в режиме фиксированных модельных удельных электрических сопротивлений по лабораторным испытаниям грунтов, буровые работы, моделирование тепловых полей, лабораторные испытания грунтов и термометрию с учетом “выстойки” скважин. В результате многолетних исследований на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых, Чукотского морей получены новые представления о распространении, сплошности и состоянии многолетнемерзлых пород и развитии газогидратов на шельфе морей Российской Арктики.

Ключевые слова: *геокриолого-геофизический анализ, геоэлектрическая модель, тепловая модель, арктический шельф, многолетнемерзлые породы, газогидраты*

DOI: 10.31857/S0869780920030042

ВВЕДЕНИЕ

Возобновление активной работы северного морского пути, проектирование и строительство новых терминалов по отгрузке сжиженного газа, новых линейных сооружений, добывающих скважин и сопутствующих инженерных сооружений на акватории арктического шельфа России требуют актуальных знаний о несущей способности грунтов на акватории шельфа. Несущая способность грунтов шельфа во многом определяется их состоянием. Поэтому актуальными представляются исследования, направленные на изучение многолетнемерзлых пород и газогидратов на шельфе морей Российской Арктики. Буровые работы на арктическом шельфе очень дороги, поэтому ведущими методами для решения геокриологических задач являются дистанционные геофизические технологии. Однако, широко применяемые стандартные подходы к интерпретации геофизических данных, часто не решают однозначно геокриологические задачи. Разработка новой методики геокриолого-геофизического анализа позволила изучить границы распростра-

нения талых, охлажденных и многолетнемерзлых пород, получить современные данные об их сплошности и состоянии, вероятности метанового “заражения” пород арктического шельфа, оценить распространение на арктическом шельфе газогидратных толщ, обосновать выделение на арктическом шельфе криогенной толщи.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 приведена карта фактического материала геофизических исследований, выполненных автором на арктическом шельфе в период 2006–2019 гг. в совместных экспедициях на северном полушарии. Здесь указаны пути: 1 – ледокола “Оден” в шведско-российско-американской экспедиции 2014 г., 2 – НИС “Виктор Буйницкий” в 2012 г., 3 – судна “Маршал Василевский” в 2015, 2016, 2017, 2018 гг., 4 – судна “Сапфир” в 2019 г., 5 – судна “Академик Мстислав Келдыш” в 2017, 2018, 2019 гг.

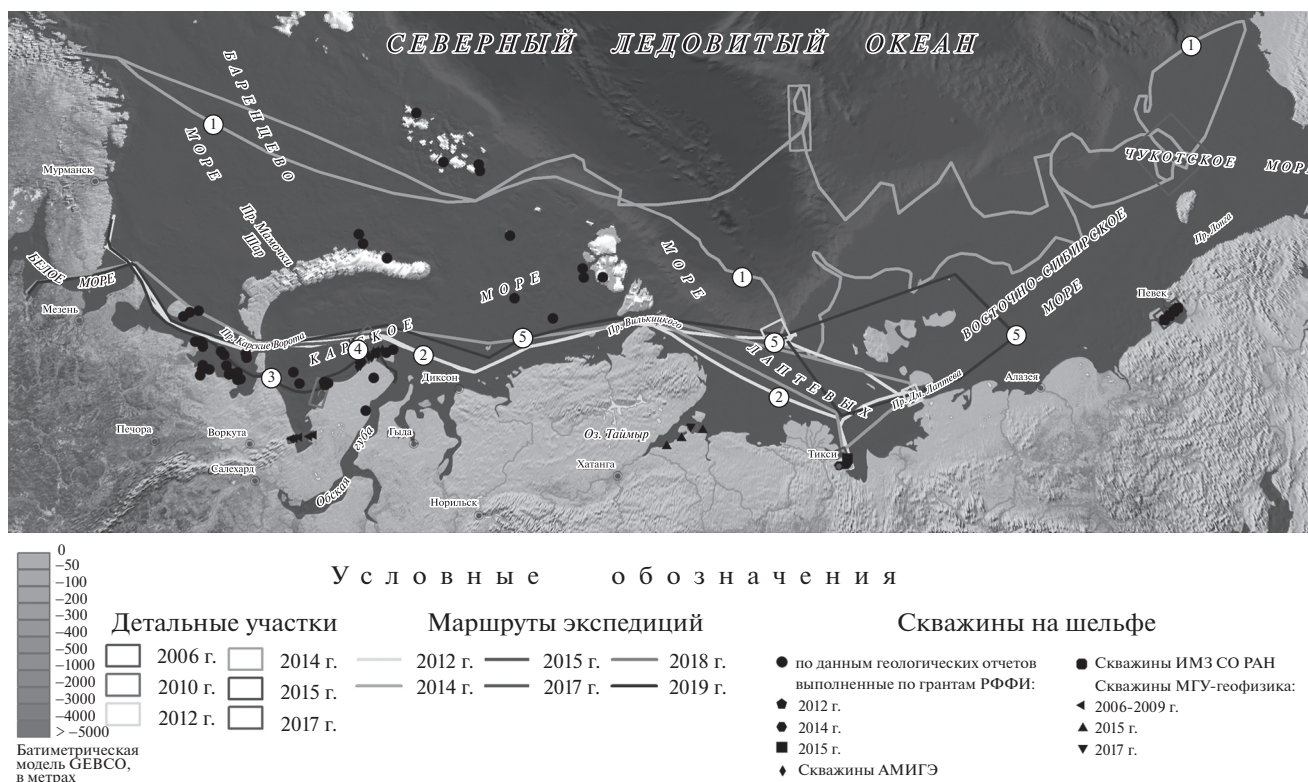


Рис. 1. Карта фактического материала геофизических исследований, выполненных автором в период 2006–2019 гг.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате многолетних исследований на арктическом шельфе автором предложен и апробирован комплекс для геокриолого-геофизического анализа, включающий электроразведку (методы зондирования становлением поля для изучения многолетнемерзлых пород (ММП) на шельфе, малоглубинных частотных зондирований для изучения ММП в транзитной зоне суша-шельф); инверсию геофизических данных в режиме фиксированных модельных удельных электрических сопротивлений по лабораторным испытаниям грунтов; буровые работы; моделирование тепловых полей; лабораторные испытания грунтов и термометрию с учетом “выстойки” скважин. Обоснование к применению комплекса для геокриолого-геофизического анализа при изучении многолетнемерзлых и газогидратных толщ на арктическом шельфе приводится в работе [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Геофизические исследования методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), выполненные как с акватории, так и с припайного льда в западной и восточной частях

арктического шельфа России, зафиксировали существование горизонта высокого сопротивления (высокоомный слой), подтвержденного буровыми работами и термометрическими наблюдениями. Кровля этого слоя связана на шельфе Карского моря (приамальский участок, глубины моря 1–100 м) и моря Лаптевых (залив губы Буор-Хая, Хатангский залив, глубины моря 1–10 м) с ММП [4, 5, 10].

Детальные исследования, выполненные автором с припайного льда в заливах Байдарацкой губы, Шарапов Шар методом частотных зондирований (ЧЗ), позволили установить двухслойное строение ММП в транзитной зоне суша-шельф. Мощность современных “kozyrkov” ММП составляет не более 10 м, простираение до 100–200 м (рис. 2) [1]. Детальные 3D-геофизические исследования автора выявили заглупления сложной формы в кровле высокоомного слоя и сквозные нарушения в нем, к которым приурочены выходы подмерзлотных подземных вод на шельфе моря Лаптевых [9].

Важнейшей особенностью геоэлектрического разреза на шельфе Печорского моря является существование трех слоев с различными удельными электрическими сопротивлениями. Первый слой имеет мощность от 10 до 70 м с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) – 0.3 Ом м. Под ним находится второй слой, имеющий мощ-

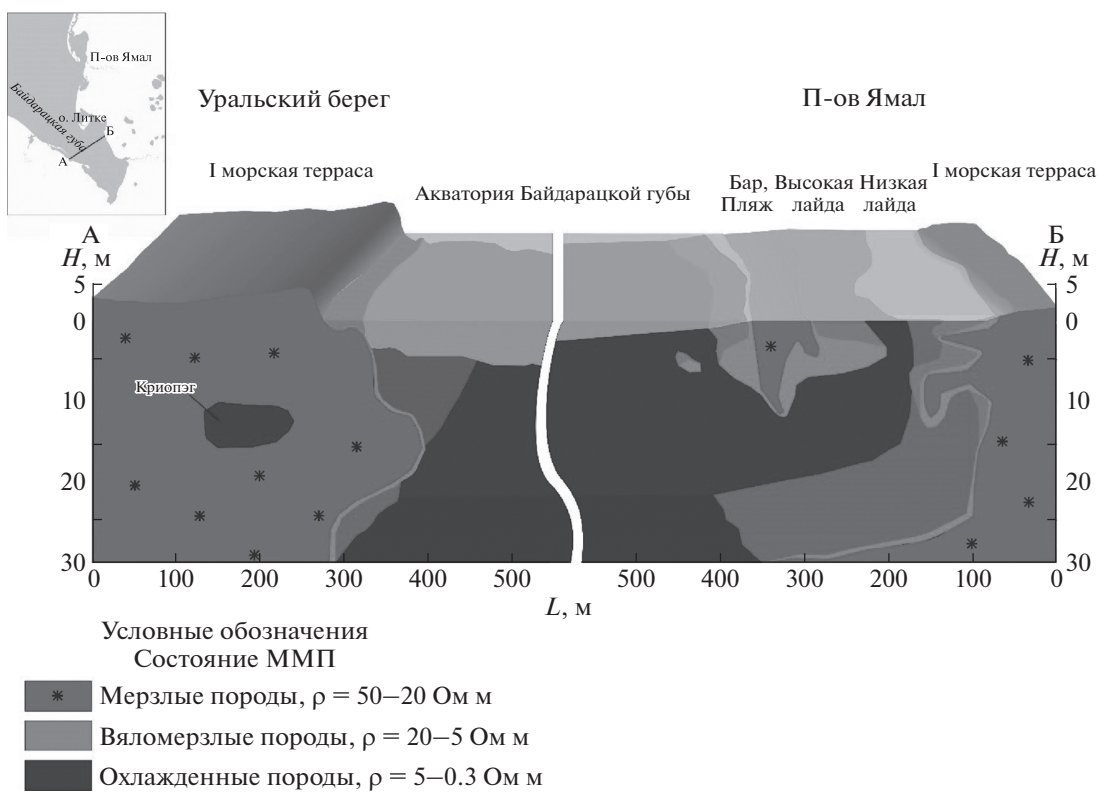
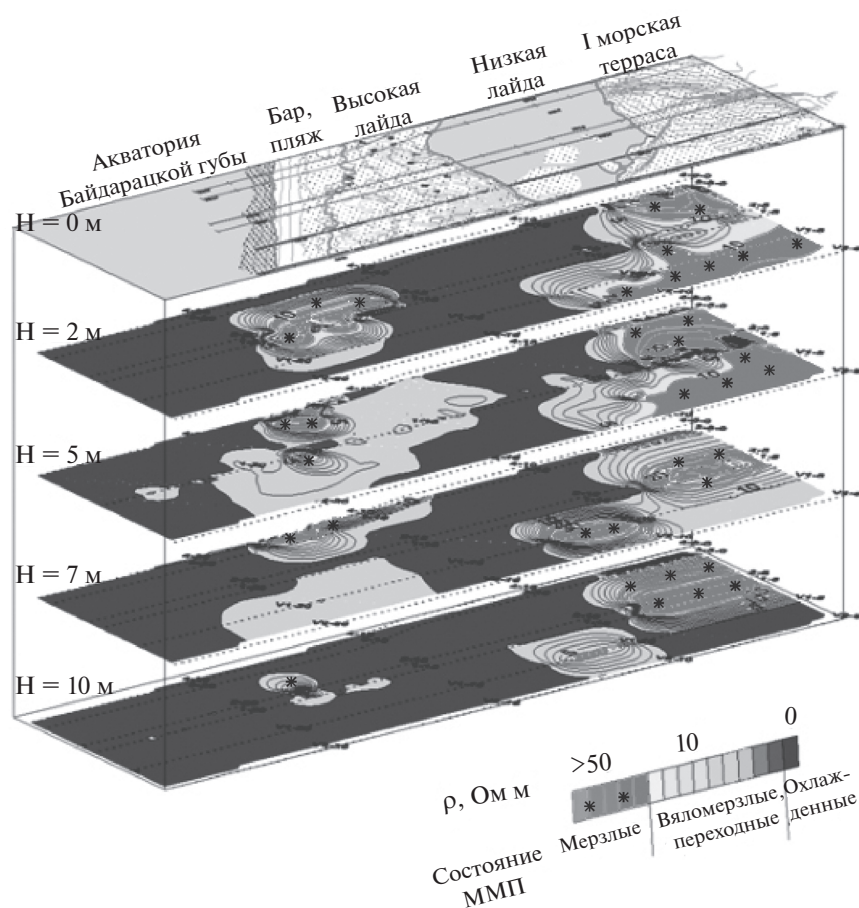


Рис. 2. 3D-модель состояния многолетнемерзлых толщ участка транзитной зоны суша–шельф Карского моря.

ность от 30 до 150 м и сопротивление 0.9–1.1 Ом м. Третий слой находится на глубине от 80 м и имеет мощность более 400 м, его сопротивление от 2.5 до 20 Ом м. Результаты исследований позволяют оценить сплошность наиболее высокоомного 3-го слоя в модели (рис. 3а). Для западной части Печорского профиля от полуострова Канин до острова Колгуев характерны редкоостровные проявления 3-го слоя в разрезе. Отдельные острова имеют простирание не более 1–5 км вдоль профиля, тогда как зоны отсутствия высокоомного слоя составляют 10–50 км. Далее на восток высокоомный слой прерывается на расстоянии 40–50 км в районе Поморского пролива и вновь появляется в районе полуострова Русский Заворот и продолжается с увеличением сплошности до пролива Югорский Шар. Для восточной части Печорского профиля характерно массивноостровное проявление 3-го слоя в разрезе. Отдельные острова имеют простирание от 10–50 км вдоль профиля, а зоны отсутствия высокоомного слоя составляют 1–7 км (см. рис. 3а).

Геоэлектрический разрез шельфа Карского моря имеет принципиально похожее строение и фиксирует слой высоких сопротивлений на глубинах от 50 до 400 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 с его отсутствием. Исследования показали, что преобладающий уровень удельных электрических сопротивлений на шельфе Карского моря для высокоомного слоя значительно ниже и составляет около 7–10 Ом м, чем на шельфе Печорского – 15–20 Ом м (см. рис. 3б). В целом, на Карском шельфе высокоомный слой имеет более низкий уровень удельных сопротивлений, более представительен, имеет большую сплошность и отсутствует полностью в западной части и частично в восточной части участка профиля, пересекающего Байдарацкую губу. 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. Исключением является относительно узкий (до 10 км) участок в районе губы Буор-Хая, где высокоомный слой прерывается. В районе губы Буор-Хая мощность высокоомного слоя составляет 700–800 м. В проливе Вилькицкого мощность высокоомного слоя сокращается до 100–200 м. Подошва высокоомного слоя в районе Тикси отмечена на глубинах 700 м, далее погружается до 1000 м и в проливе Вилькицкого поднимается до 500–600 м.

Важной особенностью распределения удельных электрических сопротивлений высокоомного слоя является существование протяженных

участков вдоль профиля от 5 до 100 км, где удельные электрические сопротивления уменьшаются до 5–6 Ом м. К интересным особенностям полученного разреза можно отнести:

- наличие зоны пониженных сопротивлений, простирающейся вдоль береговой линии; в период летних работ с акватории в ней зафиксированы аномально высокие концентрации метана;

- 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 его мощность возрастает до 1000 м (см. рис. 3в).

Геокриолого-геофизический анализ тепловых моделей для шельфа морей Лаптевых, Карского и Печорского и геоэлектрических моделей (см. рис. 3) позволяет сделать следующие выводы. Мощности многолетнемерзлых пород по данным тепловых расчетов не превышают 600–700 м, тогда как мощности высокоомных слоев достигают 1000 м на шельфе моря Лаптевых. Следовательно, подошва высокоомного слоя в геоэлектрических моделях не всегда связана с подошвой ММП на арктическом шельфе.

Одно из возможных объяснений продолжения высокоомного слоя вглубь – существование под ММП толщ газогидратов, известных на канадском арктическом шельфе по данным сейсморазведки по эффекту “двойного дна” в исследованиях Hunter [12] и MacAulay [13]. Для части профилей, где подошва высокоомного слоя залегает выше подошвы ММП по результатам моделирования, автор интерпретирует высокоомный слой как многолетнемерзлые породы. На участках профиля, где по результатам теплового моделирования подошва высокоомного слоя залегает ниже подошвы ММП, природа нижних горизонтов высокоомного слоя не ясна. Возможно, высокоомный слой на больших глубинах связан с наличием газовых гидратов. Близкие значения удельных электрических сопротивлений для ММП и газовых гидратов не позволяют пока технологиям электроразведки зафиксировать эту границу. По данным В.И. Мельникова [6], зона стабильности газовых гидратов начинается с 200 м для Карского моря, а по данным Е.М. Чувилина, Г.С. Типенко, И.А. Комарова [2, 7], с 500 м для моря Лаптевых.

Таким образом, в результате электромагнитных исследований на шельфе морей Российской Арктики фиксируется кровля ММП и подошва криогенногидратной толщи (многолетнемерзлых пород или газогидратов). Выделение данной толщи как единого объекта оправдано с точки зрения общих физических свойств многолетнемерзлых пород и гидратов газов. Поскольку будущие исследования шельфа будут в основном выполняться с помощью дистанционных геофизических ме-

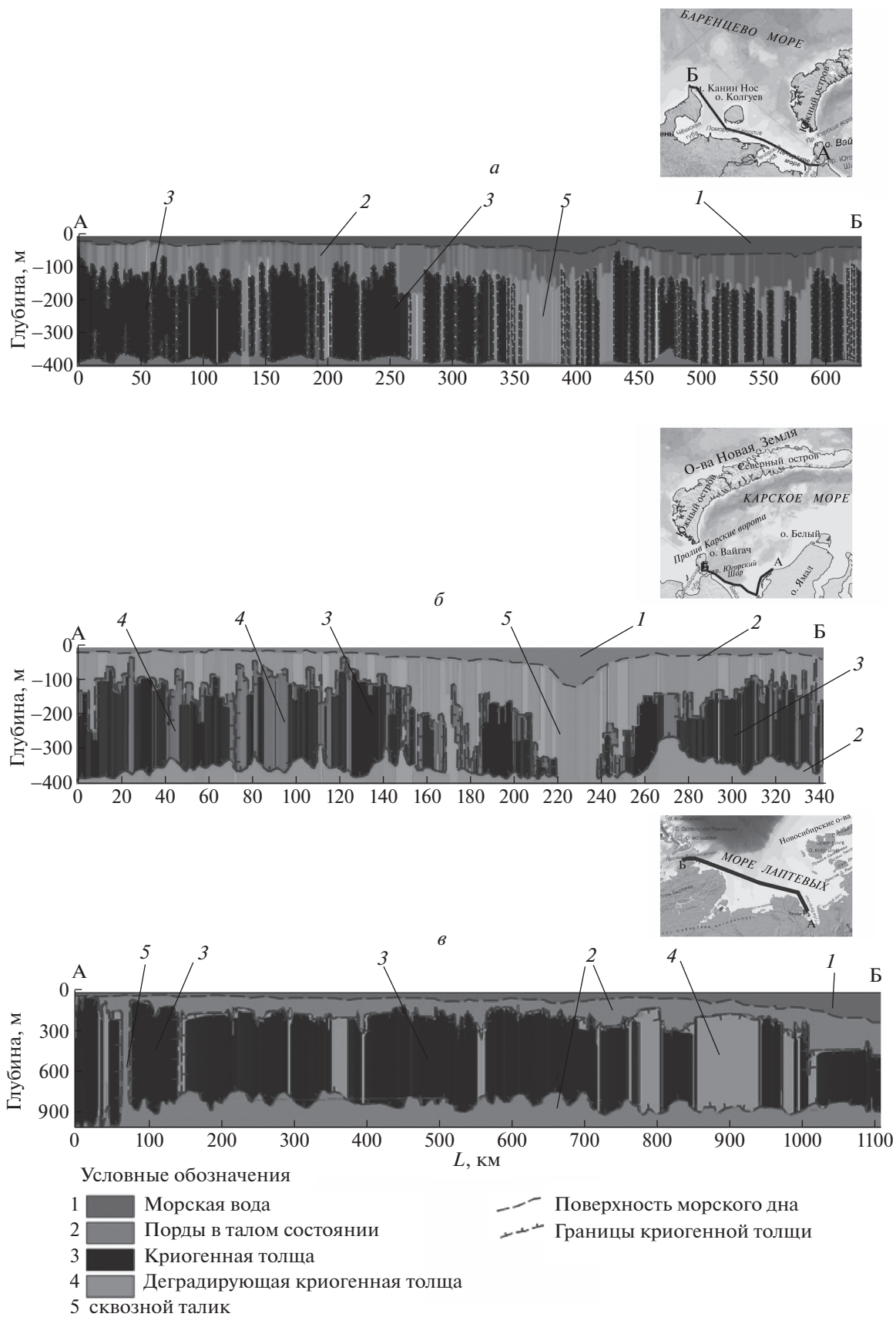


Рис. 3. 2D-модель геокриологические модели арктического шельфа: *a* – Печорского моря, *б* – Карского моря, *в* – моря Лаптевых.

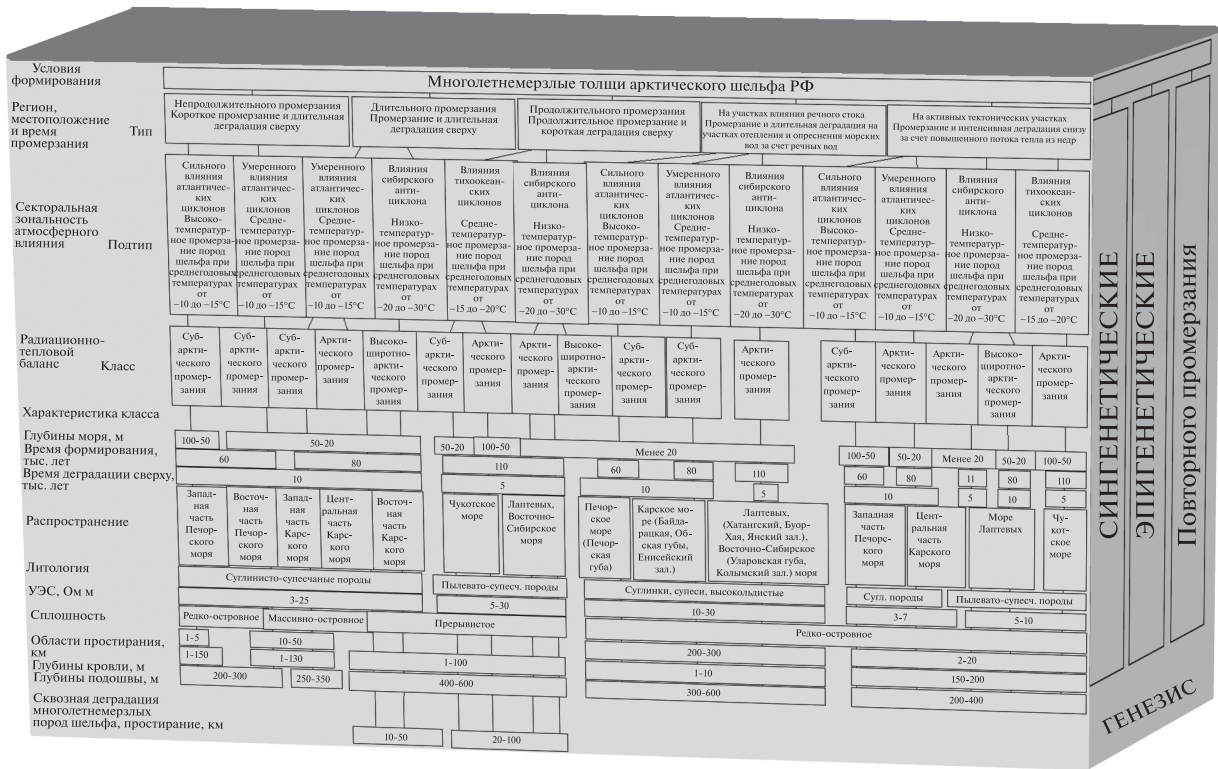


Рис. 4. Типизация многолетнемерзлых толщ арктического шельфа РФ.

тодов, то выделение криогенногидратной толщи на арктическом шельфе приобретает особую актуальность.

Обобщая результаты исследований по методике комплексного геолого-геокриологического анализа, автор выполнил типизацию многолетнемерзлых пород арктического шельфа РФ.

В типизации учитываются 3 уровня по условиям формирования ММП:

- геолого-географические условия (глубина акватории, влияние теплого и пресного стока рек, тектонический режим);
- изменение радиационно-теплого баланса с широтой;
- изменение атмосферных условий с долготой.

Авторская типизация многолетнемерзлых пород шельфа позволила зафиксировать для различных районов шельфа 11 характерных особенностей, полученных как экспериментальными методами, так и расчетными методами: время формирования и деградации, распространение, литология, УЭС, сплошность, глубины кровли и подошвы, размеры зон деградации и зон непрерывного распространения ММП (рис. 4). На основе типизации ММП построена схема их распространения и мощности на арктическом шельфе РФ. Для этого использовались региональные

геокриологические 2D-модели шельфа, построенные на основе геокриолого-геофизического анализа, детальные 3D-модели на шельфе Карского и Лаптевых морей, результаты буровых и термометрических исследований на опорных участках. Интерполяция границ твердомерзлых, пластичномерзлых, деградирующих и газогидратных толщ выполнена с учетом результатов теплового моделирования, границ и природных особенностей опорных районов, значений удельных электрических сопротивлений, полученных на арктическом шельфе.

При построении схемы учитывалось, что твердомерзлые породы характеризуются значениями УЭС 15 Ом м и более, а пластичномерзлые и деградирующие – 2.5–15 Ом м, в зависимости от района исследований, солености отложений и их литологического состава. Верификация УЭС для деградирующих многолетнемерзлых пород выполнена по экспериментальным измерениям метана в воздухе, акватории и породах арктического шельфа автора и коллег [11]. Новые результаты, полученные при геокриолого-геофизическом анализе на арктическом шельфе, позволили уточнить и дополнить представления о состоянии многолетнемерзлых толщ известные ранее по результатам математического моделирования [8]. Новые результаты исследований свидетельствуют



Рис. 5. Схема распространения криогенногидратных толщ на шельфе морей Российской Арктики.

ют о более широком распространении твердомерзлых пород, меньшем распространении пластичномерзлых пород и существовании в настоящее время обширных зон деградации (до 100 км в поперечнике) ММП на шельфе морей восточной Арктики. Аналогичные зоны деградации ММП обнаружены и на шельфе морей западной Арктики (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлены следующие закономерности формирования и распространения многолетнемерзлых пород на арктическом шельфе.

1. На арктическом шельфе зафиксировано существование горизонта высокого сопротивления (высокоомный слой), подтвержденного буровыми работами и термометрическими наблюдениями, кровля которого связана на шельфе Карского моря (приамальский участок, глубины моря 1–100 м) и моря Лаптевых (залив губы Буор-Хая, Хатангский залив, глубины моря 1–10 м) с многолетнемерзлыми породами.

2. Многолетнемерзлые породы в транзитной зоне суша–шельф имеют двухслойное строение. Мощность современных “козырьков” многолет-

немерзлых пород составляет не более 10 м и простирается до 100–200 м.

3. Для западной части Печорского моря характерно редкоостровное 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 моря характерно массивноостровное распространение многолетнемерзлых пород. Отдельные острова многолетнемерзлых пород имеют размеры 10–50 км и 200–300 м по вертикали. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Печорского моря располагается в пределах 1–150 м, подошва – в пределах 300–400 м. Для шельфа Карского моря характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород с зонами сквозной деградации многолетнемерзлых пород, достигающих горизонтальных размеров от 10 до 50 км. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря располагается в пределах 1–150 м, подошва – 300–400 м. Для шельфа моря Лаптевых характерно прерывистое распространение многолетнемерзлых пород с зонами деградации многолетнемерзлых пород, достигающих горизонтальных размеров до 100 км. Кровля многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых располагается в

пределах 1–100 м, подошва – в пределах 400–600 м.

4. С помощью математического моделирования с учетом данных экспериментального исследования теплофизических свойств отложений подтверждено предположение о формировании многолетнемерзлых пород арктического шельфа в верхнем плейстоцене при его осушении и возможной значительной мощности криолитозоны, испытывающей в настоящее время преимущественно тепловую и химическую (концентрационную) деградацию, как кровли, так и подошвы.

5. По результатам геофизических работ и тепловых расчетов обосновано вероятное присутствие гидратных толщ газов значительной мощности до глубин 1000 м на шельфе морей восточного сектора Российской Арктики.

6. Проведена типизация неоднородности многолетнемерзлых пород, учитывающая строение, свойства и масштабный уровень исследуемых объектов.

7. Построена авторская схема криогенногидратных (многолетнемерзлых и газогидратных) толщ на шельфе морей Российской Арктики, отличающаяся распространением, состоянием, строением криолитозоны с изменением глубин залегания кровли, подошвы многолетнемерзлых и газогидратных толщ, а также обозначением зон современной деградации многолетнемерзлых толщ от известных ранее геокриологических карт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Пушкарев П.Ю. Применение частотного электромагнитного зондирования при проектировании газопроводов // Инженерные изыскания. 2008. № 3. С. 70–74.
2. Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах М.: Научный мир, 2003. 608 с.
3. Кошурников А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России // Вестник МГУ. Сер. 4 Геология. 2020. № 3. (в печати)
4. Кошурников А.В., Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Желтенкова Н.В. и др. Информативность геофизических методов разведки при решении геокриологических задач на суше и шельфе // Российские полярные исследования. 2019. № 2. С. 17–23.
5. Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И. и др. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469. № 5. С. 616–620.
6. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 198 с.
7. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
8. Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др. Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 2. С. 22–32.
9. Charkin A.N., Michiel Rutgers van der Loeff, Shakhova N.E., Örjan Gustafsson, et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea // Cryosphere. 2017. V. 11. № 5. P. 2305–2327.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-2305-2017>
10. Koshurnikov A.V., Tumskey V.E., Skosar V., Efimov Y.O., et al. Submarine Permafrost in the Laptev Sea // Int. Society of Offshore and Polar Engineers. The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference 16–21 June, Honolulu, Hawaii, USA, 2019.
11. Natalia Shakhova, Igor Semiletov, Orjan Gustafsson, Valentin Sergienko, et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature communications. 2017. Num. 15872.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15872>
12. Hunter J.A. et al. The study of frozen seabed materials in the Southern Beaufort Sea, Tech. Rep. N 22, Beaufort Sea Environmental Project, Environment Canada, Victoria, B.C. 1976.
13. MacAulay H.A. et al. Detailed seismic refraction analysis of ice-bonded permafrost layering in the Canadian Beaufort Sea. 4-th Can. Permafrost Conf. 1982. <http://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC4-256.pdf>.

COMPLEX GEOCRYOLOGICAL AND GEOPHYSICAL ANALYSIS FOR THE STUDY OF PERMAFROST AND GAS HYDROGATES ON THE ARCTIC SHELF OF RUSSIA

A. V. Koshurnikov[#]

Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 1119234 Russia

[#]E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

The active development of the Russian Arctic in the last 10 years requires relevant data on the bearing capacity of rocks on the Arctic shelf of the Russian Federation. To assess the bearing capacity of soils, knowledge on the distribution and state of permafrost on the Arctic shelf is needed. The paper discusses the rationale and

possibilities of the proposed integrated geocryological and geophysical analysis including electrical exploration by sounding the formation of a field for studying permafrost on the shelf, electrical exploration by the method of shallow depth sounding for studying permafrost in the transit zone of the land-shelf, inversion of geophysical data, electrical resistance for laboratory testing of soil, drilling, modeling of heat fields, laboratory testing of soils, and the thermometry for “stable” wells. The use of the developed research complex on the shelves of Pechora, Kara, Laptev and Chukchi seas provided us with new insights on the distribution, continuity and condition of permafrost and the development of gas hydrates on the shelf of the Russian Arctic seas.

Keywords: *geocryological and geophysical analysis, geoelectric model, heat model, Arctic shelf, permafrost, gas hydrates*

REFERENCES

- Zykov, Yu.D., Koshurnikov, A.V., Pushkarev, P.Yu. *Primenenie chastotnogo elektromagnitnogo zondirovaniya pri proektirovani gazoprovodov* [Application of frequency electromagnetic sounding in the design of gas pipelines]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2008, no. 3, pp. 70–74. (in Russian)
- Komarov, I.A. *Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnykh merzlykh porodakh* [Thermodynamics and heat and mass transfer in fine frozen soils]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2003, 608 p. (in Russian)
- Koshurnikov, A.V. *Osnovy kompleksnogo geokriologo-geofizicheskogo analiza dlya issledovaniya mnogoletne-merzlykh porod i gazogidratov na arkticheskom shel'fe Rossii* [Basics of complex geocryological and geophysical analysis for the research of permafrost and gas hydrates on the Arctic shelf of Russia]. *Vestnik MGU, Ser. 4 Geologiya*, 2020, no 3. (in print) (in Russian)
- Koshurnikov, A.V., Demidov, N. E., Gunar, A.Yu., Zheltenkova, N.V., et al. *Informativnost' geofizicheskikh metodov razvedki pri reshenii geokriologicheskikh zadach na sushe i shel'fe* [Informativeness of geophysical exploration methods in solving geocryological problems on land and shelf]. *Rossiiskie polyarnye issledovaniya*, 2019, no. 2, pp. 17–23. (in Russian)
- Koshurnikov, A.V., Tumskoy, V.E., Shakhova, N.E., Sergienko, V.I., et al. *Pervyi opyt elektromagnitnogo zondirovaniya dlya kartirovaniya krovli podvodnoi merzloty na shel'fe morya Laptevykh* [The first experience of electromagnetic sounding for mapping the underwater permafrost table on the Laptev sea shelf]. *Doklady Akademii nauk*, 2016, vol. 469, no. 5, pp. 616–620. (in Russian)
- Mel'nikov, V.P., Spesivtsev, V.I. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya shel'fa Barentsova i Karskogo morei* [Engineering geological conditions of the shelf of the Barents and Kara seas]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 198 p. (in Russian)
- Romanovskii, N.N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere]. Moscow, MGU Publ., 1993, 336 p. (in Russian)
- Romanovskii, N.N., Kholodov, A.L., Gavrilov, A.V., Tumskoy, V. E., et al. *Moshchnost' merzlykh tolshch vostochnoi chasti shel'fa morya Laptevykh (rezul'taty modelirovaniya)* [Thickness of frozen massif in the Eastern part of the Laptev Sea shelf (simulation results)]. *Kriosfera Zemli*, 1999, vol. III, no. 2, pp. 22–32. (in Russian)
- Charkin, A.N., van der Loeff, M.R., Shakhova, N.E., Gustafsson, Ö., et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea. *Cryosphere*, 2017, vol. 11, no. 5, pp. 2305–2327. doi.org/10.5194/tc-11-2305-2017.
- Koshurnikov, A.V., Tumskoy, V.E., Skosar, V., Efimov, Ya.O., et al. Submarine permafrost in the Laptev Sea. *Int. Society of Offshore and Polar Engineers. The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 16–21 June, Honolulu, Hawaii, USA, 2019.
- Shakhova, N., Semiletov, I., Gustafsson, Ö., Sergienko, V., et al. Current rates and mechanisms of sub-sea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature communications*. 2017, no. 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872.
- Hunter J.A. et al. The study of frozen seabed materials in the Southern Beaufort Sea, Tech. Rep. No. 22, Beaufort Sea Environmental Project, Environment Canada, Victoria, B.C. 1976.
- MacAulay H.A. et al. Detailed seismic refraction analysis of ice-bonded permafrost layering in the Canadian Beaufort Sea. 4-th Can. Permafrost Conf. 1982. <http://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC4-256.pdf>.