

УДК 550.837:550.836:550.8.05:551.34

А.В. Кошурников¹

ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОКРИОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД И ГАЗОГИДРАТОВ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Активное освоение Российской Арктики в последние 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. Рассмотрены обоснование и возможности предлагаемого комплексного геокриологического-геофизического анализа. Методика исследований включает морские электроразведочные и буровые работы на шельфе, термометрические наблюдения в пробуренных скважинах, лабораторные испытания грунтов, моделирование электромагнитного и теплового полей на шельфе. Показано, что наиболее информативный геофизический метод для изучения многолетнемерзлых пород на шельфе — электромагнитное зондирование методом становлением поля (ЗСБ). Наиболее информативным геофизическим методом для изучения многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суши–шельф предстает частотное электромагнитное зондирования (ЧЗ). Приведены примеры стандартной интерпретации геофизических данных и инверсии геофизических данных в режиме фиксированных значений модельного удельного электрического сопротивления. На примере Приамальского шельфа показано, что стандартная интерпретация не позволяет получить однозначное решение геокриологических задач на шельфе. В случае инверсии геофизических данных в режиме толстошлистых моделей и фиксированных модельных удельных электрических показателей необходимы результаты определения электрических свойств грунтов в лаборатории. Важные составляющие предлагаемого комплекса — буровые и термометрические исследования, обеспечивающие проверку результатов геофизической инверсии. Измерение температуры грунтов в выстоянных скважинах особенно важно в условиях арктического шельфа. Завершают комплекс исследований расчеты тепловых моделей. Совместный анализ геоэлектрических и тепловых моделей позволяет оценить глубину до подошвы многолетнемерзлых пород, а также мощность газогидратных толщ. Применение разработанного комплекса исследований на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых, Чукотского морей позволило получить новые представления о распространении, сплошности и состоянии многолетнемерзлых пород и развитии газогидратов на шельфе морей Российской Арктики.

Ключевые слова: геокриологический анализ, геоэлектрическая модель, тепловая модель, арктический шельф, многолетнемерзлые породы, газогидраты.

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 of the distribution and state of permafrost on the Arctic shelf is needed. The article discusses the rationale and possibilities of the proposed integrated geocryological and geophysical analysis. The technique of researches includes realization of sea electroprospecting works, drilling on the shelf, thermometric observations in the drilled wells, bench tests of soils, modeling of electromagnetic and thermal fields on the shelf. It is shown that the most informative geophysical method for studying of permafrost on the shelf is electromagnetic sounding by the TEM method. The most informative geophysical method for studying of permafrost in the transit zone “land-shelf” represents the frequency electromagnetic (FS) sounding. In the article there are examples of standard interpretation of geophysical data and inversion of geophysical data in the mode of the fixed model specific electrical resistivity. With the example of the Yamal shelf it is shown that standard interpretation doesn't allow to receive the unambiguous solution of geocryologic tasks on the shelf. Specific electric results of determination of electric properties of soils in laboratory are necessary in case of inversion of geophysical data in the mode of thickly stratified models and the fixed model. An important component of the offered complex is boring and thermometric research which provide validation of results of geophysical inversion. Measurement of temperatures of soils in the stood wells is especially important in the conditions of the Arctic shelf. Calculations for thermal models complete a complex of researches. The collateral analysis of geoelectric and thermal models allows

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии; вед. науч. с., заместитель заведующего кафедрой геокриологии, канд. геол.-минер. н.; e-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

to estimate depths to a sole of permafrost and also capacities of gaseous-hydrate thicknesses. The use of the developed research complex on the Pechora, Karsky, Laptev and Chukchi seas shelves provided new insights into the distribution, continuity and condition of permafrost and the development of gas hydrates on the shelf of the Russian Arctic seas.

Key words: geocryological-geophysical analysis, geoelectric model, heat model, arctic shelf, permafrost, gas hydrates.

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 требует актуальных знаний о несущей способности грунтов на его акватории. Несущая способность грунтов шельфа во многом определяется их состоянием. Поэтому актуальными представляются исследования, направленные на изучение многолетнемерзлых пород (ММП) и газогидратов на шельфе морей Российской Арктики. Буровые работы на арктическом шельфе дорогостоящие, поэтому ведущие методы для решения геокриологических задач — 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 распространения талых, охлажденных и многолетнемерзлых пород, получить современные данные о их сплошности и состоянии, вероятности метанового «заражения» пород арктического шельфа.

Объект исследований. Федеральный закон от 30.11.1995 № 187-ФЗ (ред. от 28.11.2018) «О континентальном шельфе Российской Федерации» определяет континентальный шельф РФ как морское дно и их недра на расстоянии 200 морских миль (исключительная экономическая зона РФ) от границы территориальных вод РФ, если граница подводной окраины материка не продолжается более чем на 200 морских миль от границы территориальных вод. В случае, если подводная окраина материка расположена далее 200 морских миль от границы территориальных вод РФ, границы континентального шельфа определяются положением подводной окраины материка. Шельф Северного Ледовитого океана — самый большой. За исключением внутренних морей России (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское), арктический шельф используется совместно с Норвегией (Баренцево море) и США (Чукотское море) по соглашению между СССР и США о линии разграничения морских пространств 1990 г. (рис. 1).

Многолетнемерзлые породы, сохранившиеся на арктическом шельфе, практически не изучены. Есть несколько различных точек зрения о вдольбереговом или, наоборот, более широком их распространении на арктическом шельфе. Буровые данные, свидетельствующие о глубинах кровли и

подошвы ММП на шельфе, очень редки. Однако по буровым данным на шельфе Карского моря глубина кровли ММП составляет от 0 до 100 м в зависимости от глубины акватории, а подошвы, соответственно, — 200–300 м. На шельфе морей Лаптевых и Бофорта глубина кровли составляет от 0 до 50–70 м, а подошвы — до 500–700 м соответственно [Жигарев, 1997; Романовский 1993]. Таким образом, рассмотрены исследования разреза до глубины 1000 м, где возможно существование реликтовых ММП. Геологический разрез арктического шельфа до глубины 1000 м представлен переслаивающимися толщами глин, песков, супесей, причем мощность этих толщ достигает нескольких километров во впадинах и составляет не менее 1 км на сводах поднятий и мегавалов по данным сейсмоакустики и сейсморазведки, полученным ОАО «АМИГЭ», ОАО «МАГЭ», АО «Севморнефтегеофизика». Рассматривая разрез до глубины 1000 м, можно утверждать об практически повсеместном отсутствии на этих глубинах скального основания, присутствии талой или мерзлой толщи осадочных пород [Кошурников, 2016].

Материалы и методы исследований. Научные основы комплексного анализа геолого-геофизических данных. Разработанный комплекс исследований включает 5 составляющих: лабораторные испытания пород шельфа, электромагнитные исследования, подтверждение геофизических результатов бурением, термометрию в пробуренных на шельфе скважинах и тепловое моделирование на шельфе арктических морей.

Лабораторные испытания пород шельфа. Актуальность выполнения лабораторных испытаний на образцах пород шельфа арктических морей объясняется, с одной стороны, необходимостью выбора геофизической технологии изучения субмаринной криолитозоны, а с другой — потребностью в количественных характеристиках гео- и теплофизических свойств талых и мерзлых пород для выполнения математического моделирования (электромагнитного и теплового) применительно к району исследований.

К таким характеристикам относятся скорость продольных и поперечных волн в талых и мерзлых породах для интерпретации данных сейсморазведки и сейсмоакустики, удельное электрическое сопротивление (УЭС) и поляризуемость талых и мерзлых пород шельфа арктических морей [Кошурников 2019; Фролов, 2005; Тюрин 2019]. Результаты лабораторного определения плотности, влажности, температуры начала замерзания, теплопроводности и теплоемкости талых и мерзлых

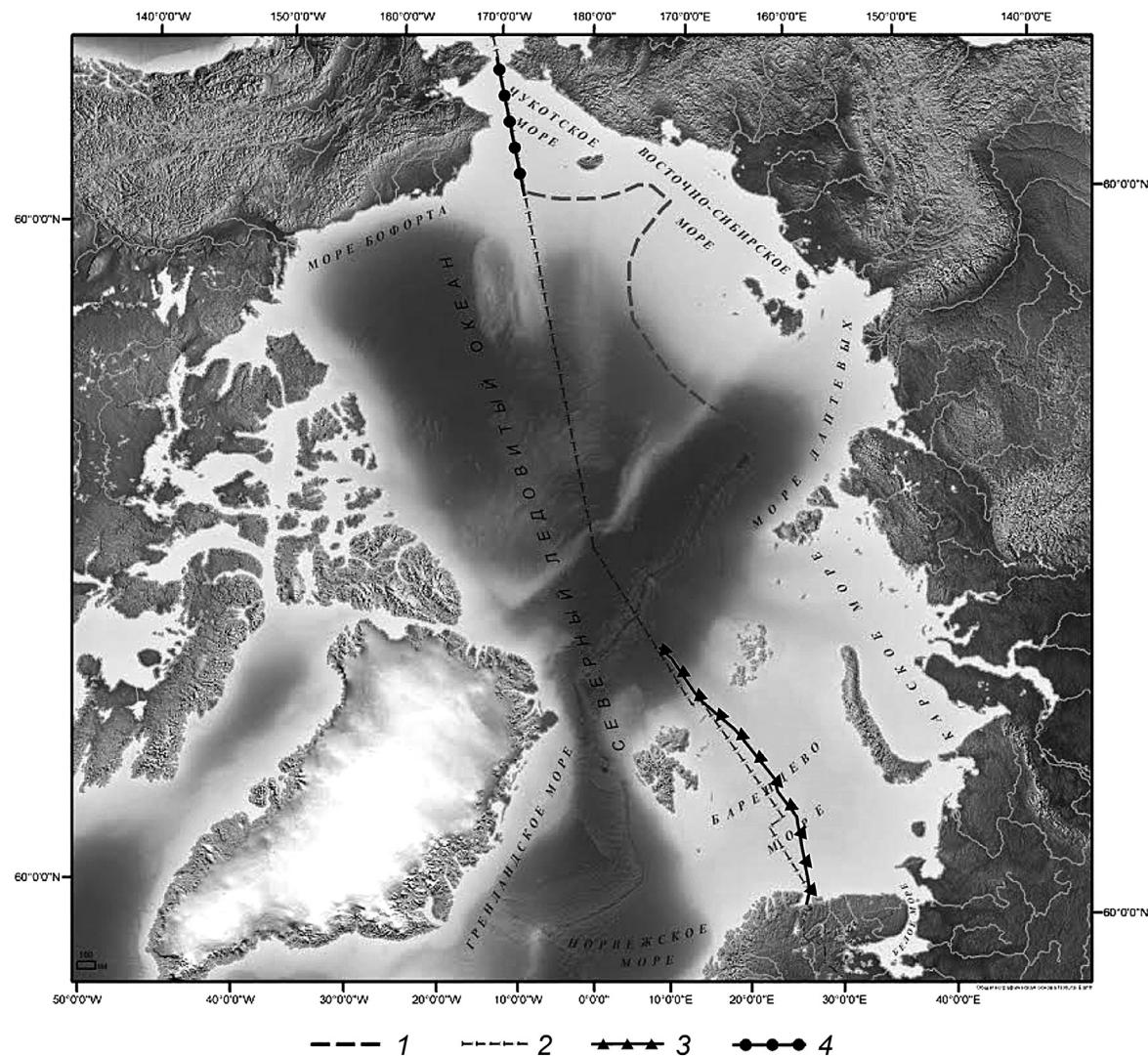


Рис. 1. Орографическая карта арктического шельфа согласно Федеральному закону «О континентальном шельфе Российской Федерации» № 187-ФЗ (ред. от 28.11.2018) от 30.11.1995, см. Собрание законодательства Российской Федерации, 1995, № 49, ст. 4694; 1999, № 7, ст. 879; 2008, № 18, ст. 1941; № 29, ст. 3420; 2009, № 52, ст. 6440; 2012, № 53, ст. 7648

пород шельфа арктических морей применяли для решения тепловых задач. Лабораторные испытания были выполнены для талых и мерзлых пород на опорных участках арктического шельфа. Результаты исследований показали, что при замерзании удельное электрическое сопротивление увеличивается в $1\text{--}10^5$ раз, тогда как скорость продольных волн возрастает в 1,5–2 раза в зависимости от литологического состава пород шельфа [Зыков, 2013; Кошурников, 2016; Хименков, 2018]. Поэтому для изучения субмаринной криолитозоны были выбраны методы электроразведки, как наиболее информативные для решения геокриологических задач. Необходимо отметить, что абсолютные значения УЭС для ММП могут меняться в очень широких пределах. Если рассматривать арктический шельф и транзитную зону суши–моря, то УЭС ММП могут изменяться от нескольких ом–метров у мерзлых засоленных глин до нескольких тысяч ом–метров у пресных пластовых льдов [Фролов, 2005].

Электромагнитные исследования. Для выбора электроразведочной технологии было выполнено математическое моделирование чувствительности зондирований методами становления поля (ЗС) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) для решения типичной геокриологической задачи в условиях арктического шельфа (рис. 2). В методе ЗСБ поле создавалось и измерялось гальваническим способом (рис. 3).

Результаты моделирования свидетельствуют о большей информативности технологий ЗСБ для решения геокриологических задач в условиях арктического шельфа. Для выполнения морских электроразведочных исследований методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ) в летний период автором разработано техническое задание для производства многофункционального, многоканального морского телеметрического электроразведочного комплекса «ТЕЛСС-3-Э» производства ООО «Геосигнал» (рис. 3).

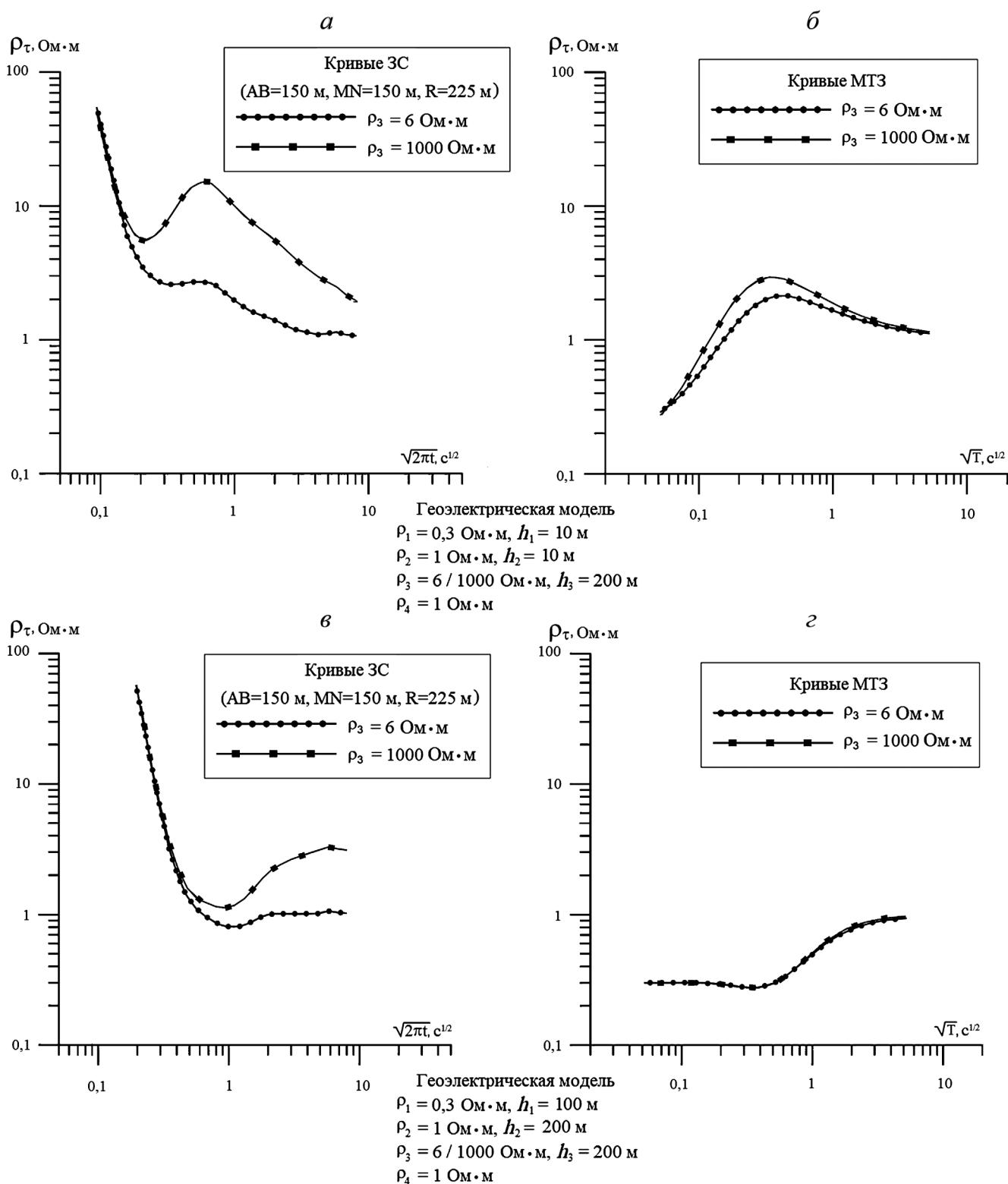


Рис. 2. Результаты математического моделирования чувствительности кривых ЗСБ (*а, в*) и МТЗ (*б, г*) к высокомому слою, модель в соответствии с геоэлектрической моделью приямальского шельфа, Карское море. Программное обеспечение Faraday П.Ю. Пушкирева. Глубина воды 10 (*а, б*) и 100 м (*в, г*)

Отличительная особенность электrorазведочной аппаратуры «ТЕЛЛС» — ее принцип, заимствованный с сейморазведочных станций. Станция сконструирована по принципу одна плата — один канал. Это позволяет добиться повышенной помехозащищенности в морских условиях эксплуатации измерительного оборудования. Как и

в сейсмических станциях выполняется оцифровка всего первичного сигнала на арифметической шкале, что позволяет легко конвертировать данные в сейсмические форматы (<http://geosignal.ru/catalog/elsis-1/>). С помощью аппаратурного комплекса «ТЕЛСС-3-Э» автор организовал и выполнил работы на шельфе Печорского, Карского, Лаптевых,

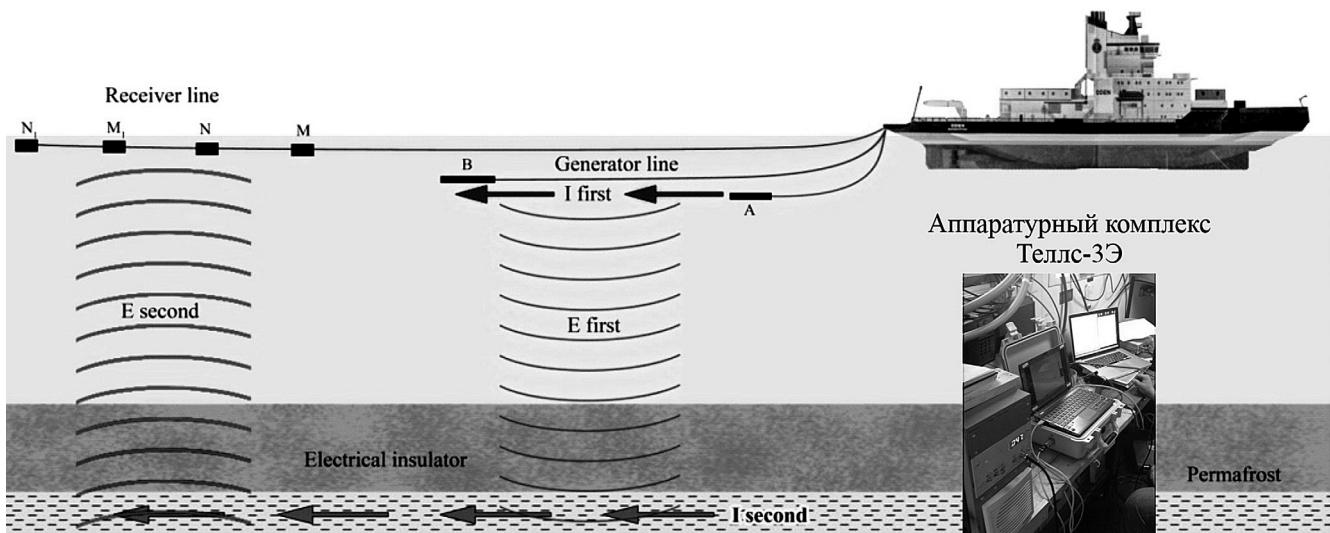


Рис. 3. Технология выполнения зондирования становлением поля в ближней зоне на арктическом шельфе. Фото А. В. Кошурникова

Восточно-Сибирского, Чукотского морей в период 2012–2019 гг.

Для выполнения электроразведочных исследований в транзитной зоне суши–шельф в зимний период автором разработан способ выполнения малоглубинных частотных зондирований (ЧЗ), подтвержденный патентом № 2280269 [Пушкарев, 2006]. По техническому заданию, разработанному автором, силами ООО «МГУ-геофизика» произведен аппаратурный комплекс «HF-EM» для работ методом ЧЗ (рис. 4)

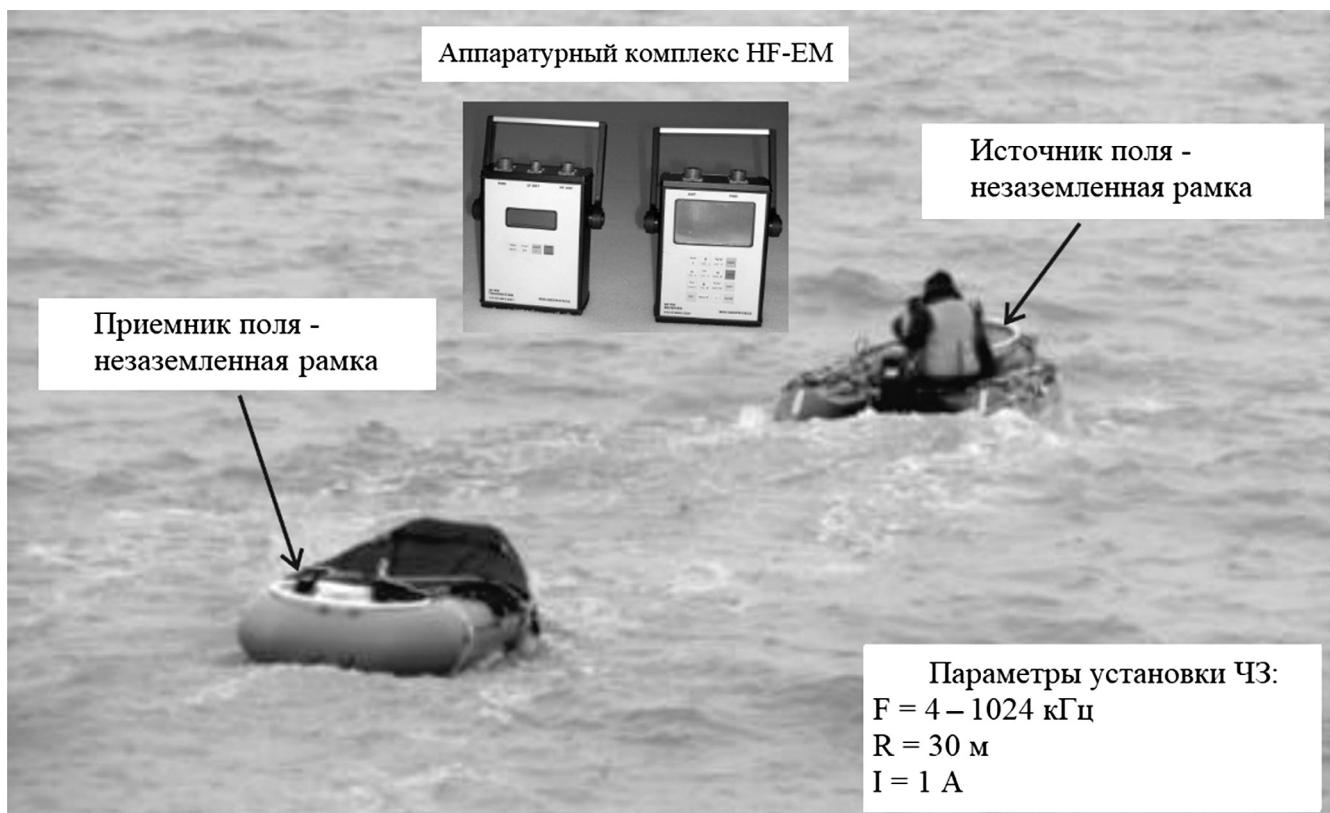
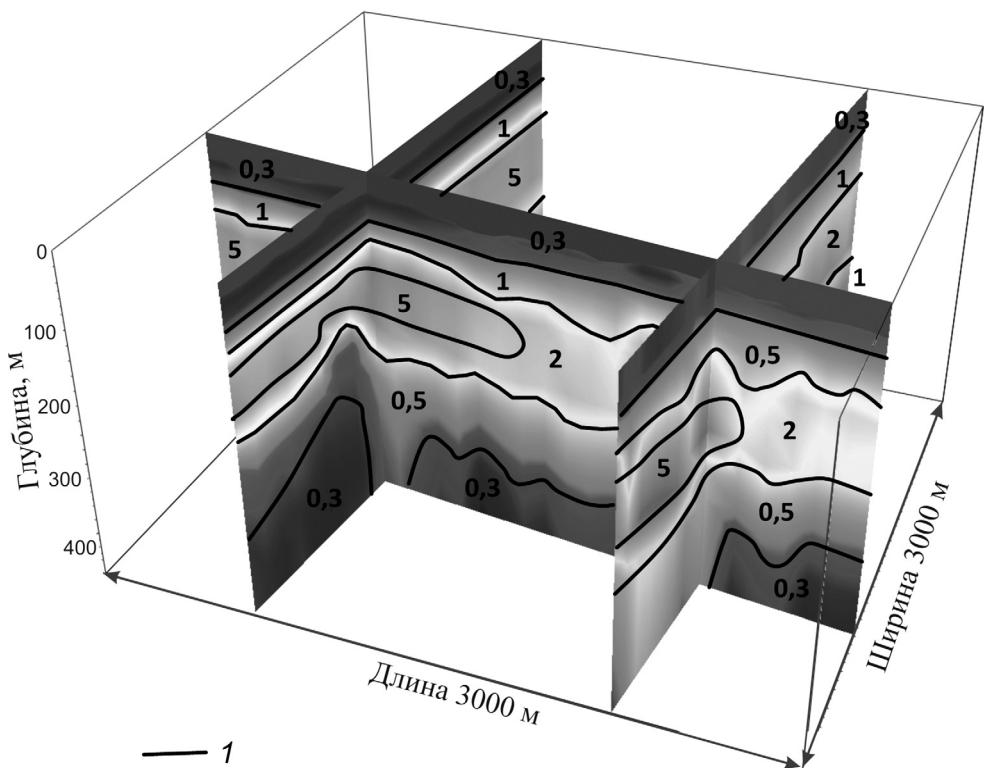


Рис. 4. Технология выполнения ЧЗ в транзитной зоне суши–шельф, приамальский шельф. Фото А. В. Кошурникова

и описанный ранее в журнале «Инженерные изыскания» в 2008 г. [Зыков, 2008]. Аналогом аппаратурного комплекса в России может служить оборудование ДЭМП, а в мире — «Geonics EM-34». Отличительная особенность аппаратурного комплекса «HF-EM» — более широкий ряд частот от 4 до 1024 кГц и возможность работы в автоматическом режиме без смены антенн для разных частот, в отличие от аналогов (<http://www.msu-geophysics.ru/uslugi/oborudovanie/apparaturnyij-kompleks>).

Рис. 5. 3D сглаженная геоэлектрическая модель, отражающая кровлю, подошву и неоднородное строение многолетнемерзлых пород на приямальском шельфе. Программное обеспечение ZondTem1D (А.Е. Каминский): 1 — линии кажущегося сопротивления, Ом·м



Исследования с аппаратурным комплексом «НФ-ЕМ» позволили получить новые данные о строении уральского и ямальского участков Байдарацкой губы на шельфе Карского моря (2006–2009), залива Шарапов Шар на шельфе Карского моря (2010), Чаунской губы на шельфе Чукотского моря (2015) [Зыков, 2008, 2009; Кошурников, 2008]. Необходимо отметить, что именно за счет гальванической составляющей технологии ЗСБ на акватории шельфа имеет более высокую чувствительность к высокоомным мерзлым породам, чем технология МТЗ или технология ЗСБ на суше с индукционным способом создания и измерения поля.

Геофизические исследования, выполненные на акватории или с припайного льда, позволяют получить модели распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) на шельфе [Кошурников, 2016; Isaev, 2019]. Рассмотрен один из примеров выполнения ЗСБ на детальном участке приямальского шельфа. Отличительная особенность этих работ заключалась в том, чтобы получить данные о кровле ММП до начала выполнения буровых работ. Стандартная интерпретация данных ЗСБ и ЧЗ заключается в автоматической 1D-инверсии кривых кажущегося сопротивления и построении геоэлектрических разрезов и моделей УЭС (рис. 5).

Отличие применяющейся автором методики интерпретации данных геофизики заключается в использовании для стартовых геоэлектрических моделей значений УЭС, полученных при лабораторных испытаниях грунтов на опорных участ-

ках (близких по свойствам к рядовому участку работ). Такой подход к решению неустойчивой обратной задачи геофизики позволил получить устойчивое решение применительно к опорным участкам арктического шельфа. На рис. 6 приведены результаты автоматической инверсии одних и тех же первичных данных ЗСБ на шельфе при использовании разных подходов к инверсии данных. Рассмотрены геоэлектрические модели, полученные для случая гладких (тонкослоистых) моделей (рис. 6, а–в) и для случая толстослоистых моделей (рис. 6, г). На рисунке 6, а–в выполнена различная геокриологическая интерпретация одной и той же геоэлектрической модели. ММП задавались по изооме 2,5 Ом·м для варианта а, 5 Ом·м для варианта б, 10 Ом·м для варианта в. Очевидно, что для одной и той же геоэлектрической модели получены разные глубины для кровли, подошвы и мощности ММП, ее сплошности и распространения.

Этот пример свидетельствует, что выполнить геофизические исследования для оценки глубины залегания кровли, подошвы ММП и ее распространения недостаточно. В случае использования гладких тонкослоистых моделей возникает большая неопределенность с выбором границ распространения ММП. В случае использования толстослоистых моделей подобные неопределенности не возникает. Четырехслойная модель описывает подавляющее большинство региональных геокриологических задач для арктического шельфа. В такой модели первый геоэлектрический слой — слой воды, второй представлен талыми осадками,

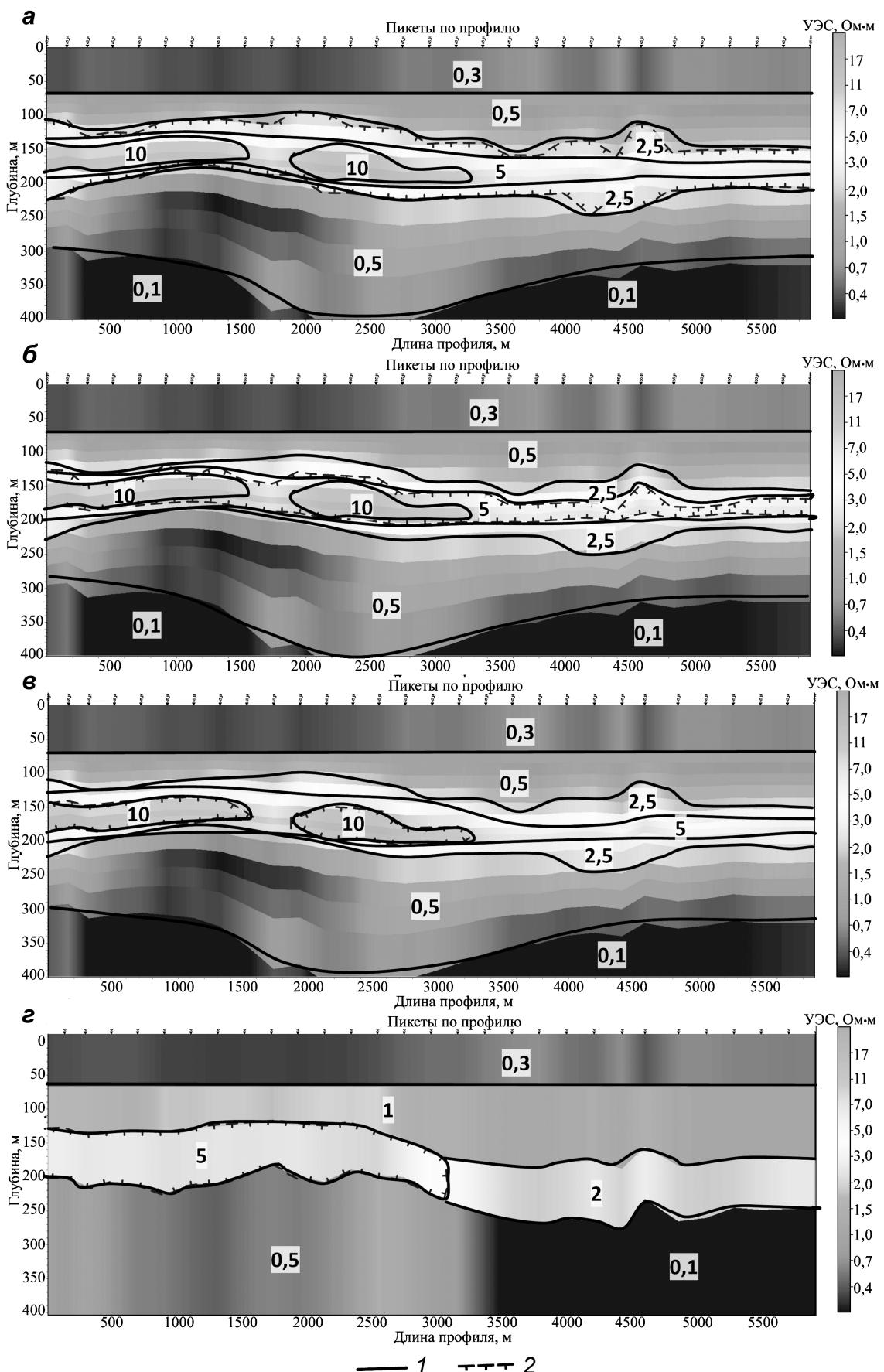


Рис. 6. Модели кровли и подошвы многолетнемерзлых пород для разных значений удельного электрического сопротивления (1) ($\text{Ом}\cdot\text{м}$) ММП: а — 2,5; б — 5; в — 10; г — результаты автоматической инверсии в случае толстослоистой модели; 2 — граница многолетнемерзлых пород

Рис. 7. Выполнение термо-
метрических наблюдений,
летний период — на при-
ямальском шельфе, зим-
ний — на лаптевоморском
шельфе. Фото А.В. Кошур-
никова



третий слой в геоэлектрической модели связан с ММП на шельфе, подстилает модель слой талых осадочных пород (рис. 6, *г*).

Однако даже при использовании инверсий с минимальным количеством слоев в модели, необходимо выполнить на участке работ бурение, определить кровлю и подошву ММП (в случае растепления ММП при бурении это возможно только по данным термометрии), а затем для талых и мерзлых участков разреза определить УЭС в лаборатории. Только имея результаты испытаний УЭС грунтов и данные о температуре начала замерзания ($T_{нз}$), можно приступить к геокриологической интерпретации данных геофизических работ. В связи с изменением засоления на различных участках шельфа значения $T_{нз}$, а значит и УЭС, для ММП будут различны. Это объясняется тем, что разные участки шельфа имели разную историю формирования, а значит, и разное засоление. При увеличении концентрации соли понижается температура начала замерзания грунтов, а также УЭС пород как в талом, так и в мерзлом состоянии. Поэтому еще одна составляющая предлагаемого комплекса — *инженерно-геологическое бурение* с отбором образцов и их лабораторным исследованием в полевых условиях.

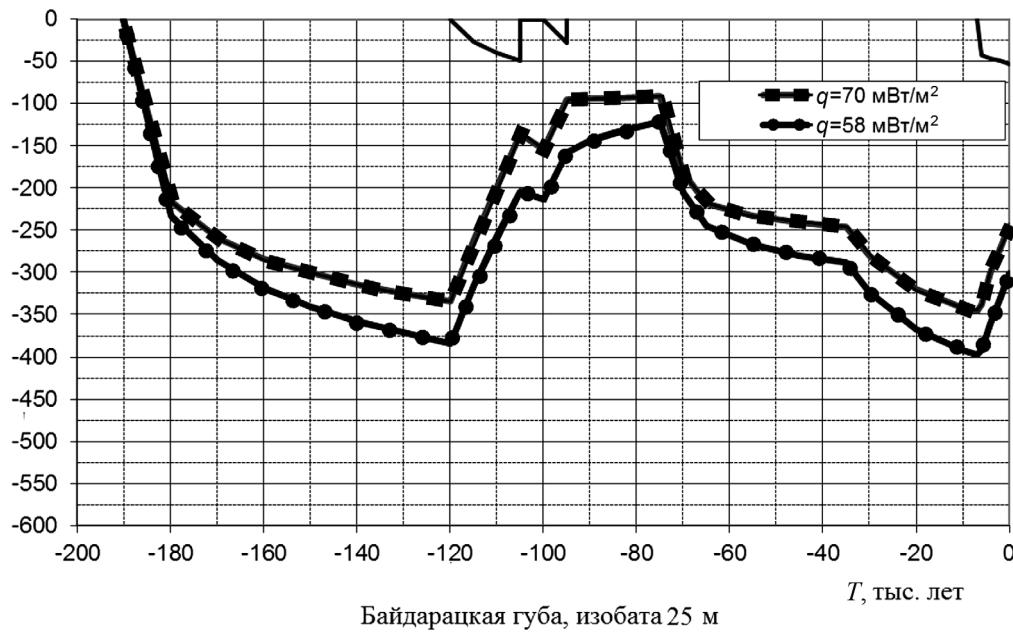
Последняя особенность предлагаемой методики — *измерение температурного поля* в скважинах на опорных участках, с регистрацией температурного поля на льду и на акватории с «выстойкой» термокос. Для измерения температур грунтов на акватории автором разработано техническое задание на цифровые термометрические косы, которые были изготовлены и сертифицированы. При измерениях использованы логгеры, аппаратура связи и обработки. В летних условиях термокосы устанавливают в скважину с бурового судна по технологии автора, в зимних — термометрия выполняется с припайного льда (рис. 7).

Разработанная технология регистрации температуры грунтов на шельфе позволяет накапливать данные в условиях арктического шельфа в течение нескольких лет и передавать накопленные данные с логгера на ноутбук на расстояние до 1 км при высоте волны не менее 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 необходимо от 1–2 дней в суглинистых грунтах до 3–5 дней в супесчаных грунтах. При бурении на шельфе арктических морей с судна при минимальной скорости бурения «выстойка» скважины составляет от 3–5 дней в суглинистых грунтах до 2–3 недель 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.).

Необходимое условие для успешного выполнения инверсии геофизических данных, проведения тепловых расчетов, оценки фазового состояния пород шельфа — лабораторные испытания грунтов. Испытания необходимо выполнять в полевых условиях, определяя плотность, влажность, температуру начала замерзания, теплопроводность, теплоемкость, электрические, акустические свойства пород, а в камеральных условиях определять также гранулометрический состав, теплопроводность, теплоемкость, соленость, электрические и акустические свойства талых и мерзлых пород шельфа.

Важная составляющая комплекса исследований заключается в *математическом моделировании тепловых полей* на опорных участках. Для этого задаются характерные для этого участка палеосце-

Глубина, H , м



нарии, выбираются граничные условия, задается разрез и его свойства, моделируются температурные поля с помощью программных средств, разработанных на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (рис. 8).

Автором были выделены 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 буровых работ и лабораторных испытаний пород на шельфе, как полученным автором в период 2006–2018 гг., так и из РосгеоЛФонда.

Совместный анализ результатов теплового моделирования и толстослоистых геоэлектрических моделей показал, что мощность высокоомных слоев в геоэлектрических моделях на 100–300 м больше для зон 1–7, чем мощность многолетнемерзлых пород по тепловым моделям. Объяснить этот феномен на арктическом шельфе возможно, если предположить существование толщ газогидратов под многолетнемерзлыми породами. Образцы газогидратов были подняты на приемальском шельфе при бурении с судна «Бавенит» (ОАО

Рис. 8. График глубины (H) подошвы многолетнемерзлых пород от времени (T) для приемальского шельфа на глубине 25 м

«АМИГЭ») и на шельфе моря Бофорта канадскими исследователями [Романовский, 1993].

Заключение. В результате исследований разработаны основы комплексного анализа геолого-геофизических данных включающего полевые методы электроразведки, лабораторные исследования и математическое моделирование:

- обосновано проведение широкомасштабных исследований методом зондирований становлением поля (ЗСБ) для изучения многолетнемерзлых пород на шельфе;

- доказана перспективность электроразведки методом частотного зондирования (ЧЗ) для изучения многолетнемерзлых пород в транзитной зоне суша–шельф;

- обоснована необходимость инверсии геофизических данных в режиме толстослоистых моделей и фиксированных модельных УЭС по лабораторным испытаниям грунтов;

- показана эффективность комплекса буровых работ, математического моделирования тепловых полей, лабораторных испытаний грунтов и полевой термометрии для оценки строения криолитозоны в условиях арктического шельфа;

- разработаны оригинальное комплексное оборудование для электроразведки и методики его применения на арктическом шельфе, в частности способ выполнения малоглубинных частотных зондирований (ЧЗ), косы цифровые термометрические (КЦТ); доказана их эффективность.

В случае проведения только геофизических исследований вместо предлагаемого комплекса невозможно установить однозначное положение границы распространения талых, охлажденных и многолетнемерзлых пород и получить современные данные о их сплошности и состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жигарев Л.А.* Океаническая криолитозона. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 320 с.
- Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Пушкирев П.Ю.* Применение частотного электромагнитного зондирования при проектировании газопроводов // Инженерные изыскания. 2008. № 3. С. 70–74.
- Зыков Ю.Д., Мотенко Р.Г., Кошурников А.В.* и др. Экспериментальное исследование влияния нефтяного загрязнения на теплофизические и геофизические свойства засоленных мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов // Вестн. Моск. государственного областного ун-та. 2013. № 1. С. 1–17.
- Зыков Ю.Д., Скворцов А.Г., Кошурников А.В., Погорелов А.А.* Информативность геофизических исследований при инженерных изысканиях в криолитозоне // Инженерные изыскания. 2009. № 12. С. 57–63.
- Кошурников А.В., Демидов Н.Э.* и др. Информативность геофизических методов разведки при решении геокриологических задач на суше и шельфе // Российские полярные исследования. 2019. № 2. С. 17–23.
- Кошурников А.В., Зыков Ю.Д., Пушкирев П.Ю., Хасанов И.М.* Электромагнитные исследования при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 25–26.
- Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е.* и др. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Докл. РАН. 2016. Т. 469, № 5. С. 616–620.
- Пушкирев П.Ю., Кошурников А.В., Джалилов Ф.Ф., Кириаков В.Х.* Патент: Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления, № 2280269, 20 июля 2006 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам // Бюлл. № 20 от 20.07.2006.
- Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.
- Тюрин А.И., Исаев В.С., Сергеев Д.О.* и др. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 2. С. 70–81.
- Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино, 2005.
- Хименков А.Н., Гагарин В.Е., Кошурников А.В.* и др. Лабораторное моделирование процессов формирования криогенного строения морских отложений // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 3. С. 40–51.
- Isaev V.S., Kosshurnikov A.V., Pogorelov A.A.* et al. Cliff retreat of permafrost coast in the southwest Baydaratskaya Bay of Kara Sea during 2005–2016 // Permafrost and Periglacial Processes. 2019. N 30. C. 35–47.

Поступила в редакцию 11.12.2019

Поступила с доработки 15.01.2020

Принята к публикации 15.01.2020