НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 32–40 http://www.izdatgeo.ru

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ И ПОБЕРЕЖЬЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

УДК 551.345.3:552.578.1

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ ГУБЫ БУОР-ХАЯ (ШЕЛЬФ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ)

Е.М. Чувилин[1], Б.А. Буханов[1], В.Е. Тумской[1], Н.Е. Шахова[2,3], О.В. Дударев[2], И.П. Семилетов[2,3]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; chuvilin@geol.msu.ru*
[2] *Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*
[3] *Международный Арктический исследовательский центр, Университет Аляска, АК 99709, Фэрбанкс, США*

Приведены фактические значения теплопроводности донных отложений верхних горизонтов криолитозоны шельфа моря Лаптевых, полученные при проведении исследований в районе губы Буор-Хая к востоку от о. Муостах в рамках российско-американского проекта по изучению метанового потенциала морей Восточной Арктики. В полевых условиях были выполнены определения теплопроводности донных отложений, а также их влажности и плотности до поддонной глубины 52,3 м. При исследовании полученных при бурении кернов пород выявлены особенности изменения теплопроводности донных отложений по глубине. При этом выполнен анализ влияния влажности, плотности, пористости, литологического состава на теплопроводность пород. Выявлено, что содержание глинистых и пылеватых частиц – основной фактор, влияющий на теплопроводность исследуемых донных отложений.

Теплопроводность, физические свойства, донные отложения, арктический шельф, охлажденные породы, море Лаптевых

THERMAL CONDUCTIVITY OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE REGION OF BUOR-KHAYA BAY (SHELF OF THE LAPTEV SEA)

E.M. Chuvilin[1], B.A. Bukhanov[1], V.E. Tumskoy[1], N.E. Shakhova[2,3], O.V. Dudarev[2], I.P. Semiletov[2,3]

[1] *Lomonosow Moscow State University, Department of Geology, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; chuvilin@geol.msu.ru*
[2] *Il'ichov Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Baltiyskaya st., 43, Russia*
[3] *International Arctic Research Center, University of Alaska, Fairbanks, AK 99709, USA*

The paper presents the actual values of the thermal conductivity of sediments of the upper horizons of the Laptev's Sea shelf permafrost. The data have been obtained during researches in the Buor-Khaya Bay to the East from the Muostah island under the Russian-American project of studying of the methane potential in seas of the eastern Arctic. The thermal conductivity of sediments, and their water content and density have been investigated in field conditions to the under-bottom depths of 52.3 m. During investigations of the cores of bottom sediments the features of variation in the thermal conductivity values have been detected. At that, the analysis of the influence of water content, density, porosity, lithology on the thermal conductivity of sediments have been carried out. It has been found out that the content of clay and silt particles is the main factor affecting the thermal conductivity of the investigated sediments.

Thermal conductivity, physical properties, sediments, Arctic shelf, cooled rocks, the Laptev Sea

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время донные отложения арктического шельфа России, особенно в восточной части, изучены слабо, так как геологические работы на шельфе сопряжены со значительными техническими трудностями и рисками. В этой связи любые геологические данные, полученные при бурении и глубоком опробовании донных осадков арктического шельфа, являются уникальными [*Романовский, Тумской, 2011*]. Обнаружение массированных выбросов метана из донных отложений морей Восточной Арктики в водную толщу и атмосферу [*Shakhova et al., 2010a,b*] предполагает наличие газовыводящих каналов на большей части акватории шельфа, что дает основания к пересмотру сложившихся взглядов на состояние подводной мерзлоты. Для решения этой междис-

циплинарной задачи проводятся комплексные биогеохимические и геофизические исследования, включая бурение с припайного льда [*Шахова и др., 2009; Сергиенко и др., 2012; Shakhova et al., 2010a,b; Semiletov et al., 2011*]. В данной работе представлены фактические значения теплопроводности донных отложений верхних горизонтов криолитозоны шельфа моря Лаптевых, полученные по керну скв. 1D-11 в результате бурения в губе Буор-Хая к востоку от о. Муостах. Работы проводились в рамках российско-американского проекта по изучению метанового потенциала морей Восточной Арктики [*Shakhova et al., 2009; Shakhova et al., 2010a*].

Первые сведения о тепловом состоянии донных отложений восточного сектора Арктики были получены в 60–70-х гг. прошлого столетия исследователями из Института мерзлотоведения (г. Якутск) [*Григорьев, 1966; Молочушкин, 1969; Молочушкин, Гаврильев, 1970*]. В частности, Е.Н. Молочушкин проводил режимные наблюдения в районе о. Муостах. Позднее геологами "Севморгео" и НИИГА (ныне – ВНИИОкеангеология) были осуществлены масштабные буровые работы со льда в проливах Санникова и Дмитрия Лаптева [*Фартышев, 1978, 1993; Соловьев, 1981*].

В последние годы активные мерзлотно-геологические исследования на шельфе моря Лаптевых проводятся в рамках различных международных проектов [*Григорьев, 2008; Junker et al., 2008; Semiletov et al., 2012*]. Эти исследования показали, что в прибрежной зоне шельфа присутствуют как толщи засоленных охлажденных грунтов, так и многолетнемерзлые породы (ММП), подошва которых пока не вскрыта [*Романовский, Тумской, 2011*].

Следует отметить, что геологические исследования на арктическом шельфе в основном базируются на сейсмоакустических работах. Однако геофизические материалы не позволяют достоверно интерпретировать состав и состояние донных отложений арктического шельфа вследствие больших литологических и фазовых неоднородностей.

При изучении донных отложений морей Лаптевых и Восточно-Сибирского основное внимание уделялось вопросам стратиграфии, генезиса и истории развития. При этом физические свойства этих отложений практически не рассматривались, хотя донные отложения арктического шельфа очень специфичны. Они могут иметь отрицательную температуру и содержать лед, а могут находиться в охлажденном состоянии без ледяных включений. При этом реликтовые мерзлые породы арктического шельфа испытывают процессы оттаивания, засоления, что отражается на изменении их свойств. Кроме того, особенностью донных отложений арктического шельфа является их высокая газо- и гидратонасыщенность, что также находит отражение в свойствах пород [*Романовский и др., 2006; Рекант и др., 2009; Шахова и др., 2009; Сергиенко и др., 2012*].

Изучение свойств донных отложений Арктики имеет большое значение для инженерно-геологических изысканий при освоении нефтегазовых ресурсов шельфа, в частности, при осуществлении различных расчетов, модельных построений, прогнозов. Наиболее важными для моделирования физическими характеристиками грунтов являются их влажность, плотность, пористость, теплопроводность и др. Таких данных применительно к донным отложениям восточной части арктического шельфа очень мало. Имеются публикации в основном для западного сектора Арктики, в частности для Баренцева и Карского морей [*Маслов, 1985, 2006; Козлов, 2005, 2006; Хуторской, Подгорных, 2010*]. При этом следует отметить, что большинство этих работ по изучению отложений шельфа Баренцева и Карского морей были направлены на поиск горючих полезных ископаемых, и детальные описания разреза и изучения свойств пород были получены только для участков, где предполагалось наличие углеводородных месторождений. Основной акцент в таких исследованиях делался на изучение физико-механических свойств отложений, необходимых для оценки устойчивости донных отложений, а также для интерпретации геофизических данных [*Козлов, 2005, 2006*]. Имеются лишь отдельные данные по физическим свойствам донных отложений Баренцева и Карского морей [*Маслов, 1985, 2006*].

Часто из-за нехватки фактических данных для построения различных геологических моделей применительно к арктическому шельфу использовались осредненные значения основных свойств пород, которые могут характеризовать толщу в целом, без выделения в ней каких-либо особенностей и неоднородностей состава. Первая попытка проверить результаты моделирования путем бурения показала возможность глубокой или сквозной деградации субмаринных мерзлых толщ как в районах, подверженных комплексному тепловому влиянию р. Лена и аномальному геотермальному потоку, так и за их пределами за счет развития подозерных таликов [*Сергиенко и др., 2012; Nicolsky, Shakhova, 2010; Nicolsky et al., 2012*].

Иногда используют данные теплофизических параметров для донных отложений более изученных водных бассейнов. Так, применительно к Черному морю можно отметить работу В.М. Кобзаря и А.Ю. Митропольского [*1983*], в которой представлены подробные данные по теплопроводности приповерхностного слоя (до 2 м) донных осадков. Температура этих пород была положительной, и теплопроводность верхнего слоя осадков колебалась от 1,2 Вт/(м·К) в прибрежных до 0,7 Вт/(м·К) в более глубоководных частях, при этом плотность

осадков была 1,3–1,6 г/см^3. Заслуживают внимания исследования теплопроводности донных отложений, выполненные в последние годы для оз. Байкал [*Дучков и др., 2009; Перлова и др., 2009*]. Эти породы находились при температурах порядка +3,2 °С. Согласно полученным данным, теплопроводность донных отложений в среднем составляет 0,8–0,9 Вт/(м·К), при этом глубина опробования не более 2 м. В целом значения теплопроводности для оз. Байкал и Черного моря оказались сходными.

По восточному сектору Арктики на сегодняшний день имеются лишь единичные публикации, посвященные исследованию физических характеристик образцов керна, отобранных на мелководных участках шельфа Восточной Арктики [*Молочушкин, Гаврильев, 1970; Балобаев и др., 1983; Чеверев и др., 2007*]. Наиболее детальные исследования применительно к донным отложениям шельфа моря Лаптевых выполнены для Ивашкиной лагуны на Быковском полуострове в районе дельты р. Лена [*Чеверев и др., 2007*]. В этой работе авторы представили некоторые данные о составе, криогенном строении и теплофизических свойствах образцов талых и мерзлых пород до глубины 12 м, отобранных из пяти скважин, пробуренных в термокарстовой лагуне. При этом было показано изменение некоторых физических свойств по глубине, однако в связи с небольшим количеством фактических данных авторами не проведены сопоставление и корреляция.

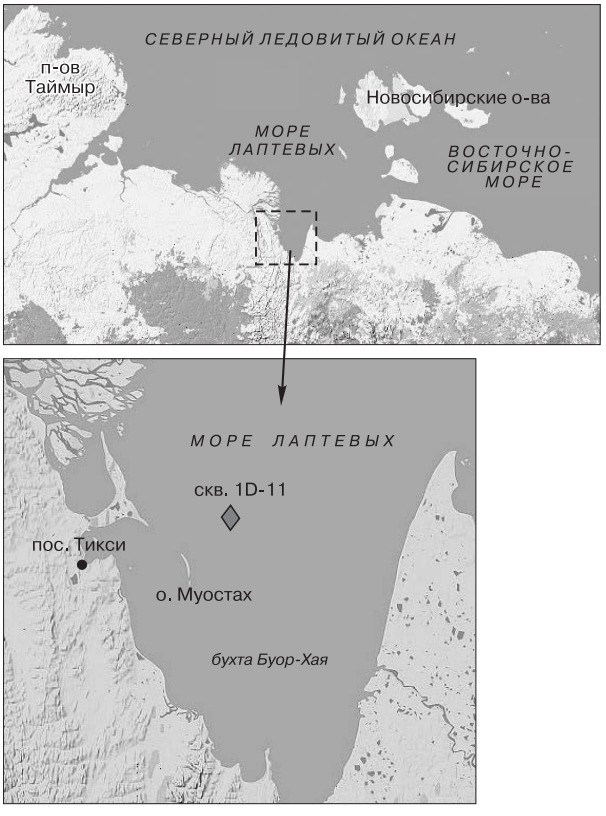

Рис. 1. Карта-схема района проведения буровых работ.

Подводя итог, можно отметить, что в настоящее время реальных значений теплофизических параметров для донных отложений арктического шельфа, особенно его восточной части, очень мало. Отсутствие таких данных стимулирует специальные исследования с целью их получения.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Российско-американские исследования, организованные лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения РАН и Международным Арктическим научным центром Университета Аляски (Фэрбанкс) (International Arctic Research Center/University of Alaska, Fairbanks) при участии сотрудников кафедры геокриологии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, проводились в западной части губы Буор-Хая (море Лаптевых), в 17 км на северо-восток от о. Муостах (рис. 1). Глубина воды в районе скважины составляла 12,5 м, толщина льда 1,4 м. В этом районе была пробурена скв. 1D-11 глубиной 52,3 м от поверхности дна с полным отбором керна (рис. 2).

Отобранный по скважине керн находился в охлажденном состоянии. В верхней части разреза до глубины 6 м он был представлен водонасыщенными голоценовыми однородными глинистыми осадками темно-серого цвета. Доля глинистой фракции составляла 50–55 %. Минеральный состав глинистых отложений, по данным рентгеноструктурного анализа, представлен кварцем (44–55 %), микроклином и альбитом (26 %), иллитом (18–25 %) и хлоритом (до 5 %). По данным И.П. Семилетова с соавт. [*Semiletov et al., 2011*], доля органической составляющей в них не превышала 2–3 %. Далее вниз по разрезу до забоя скважины на 52,3 м была вскрыта песчаная толща, в которой преобладал мелкозернистый песок с небольшими по мощности (до 10–20 см) прослоями пылеватого песка. В песчаной толще выделялись прослои и включения пылевато-глинистого и гравийного материала, а также включения органических остатков. Доля пылевато-глинистой фракции составила 5–8 %, в основном она была представлена частицами пылеватой размерности (от 0,05 до 0,001 мм). В минеральном составе песчаной толщи преобладают кварц (55 %), микроклин и альбит (43 %), иллит (4–8 %) и хлорит (около 1 %). Доля органического вещества в песчаной толще в среднем была 1–2 %, однако иногда значения доходили до 5 %. В большинстве случаев повышенные значения органической составляющей в песчаной

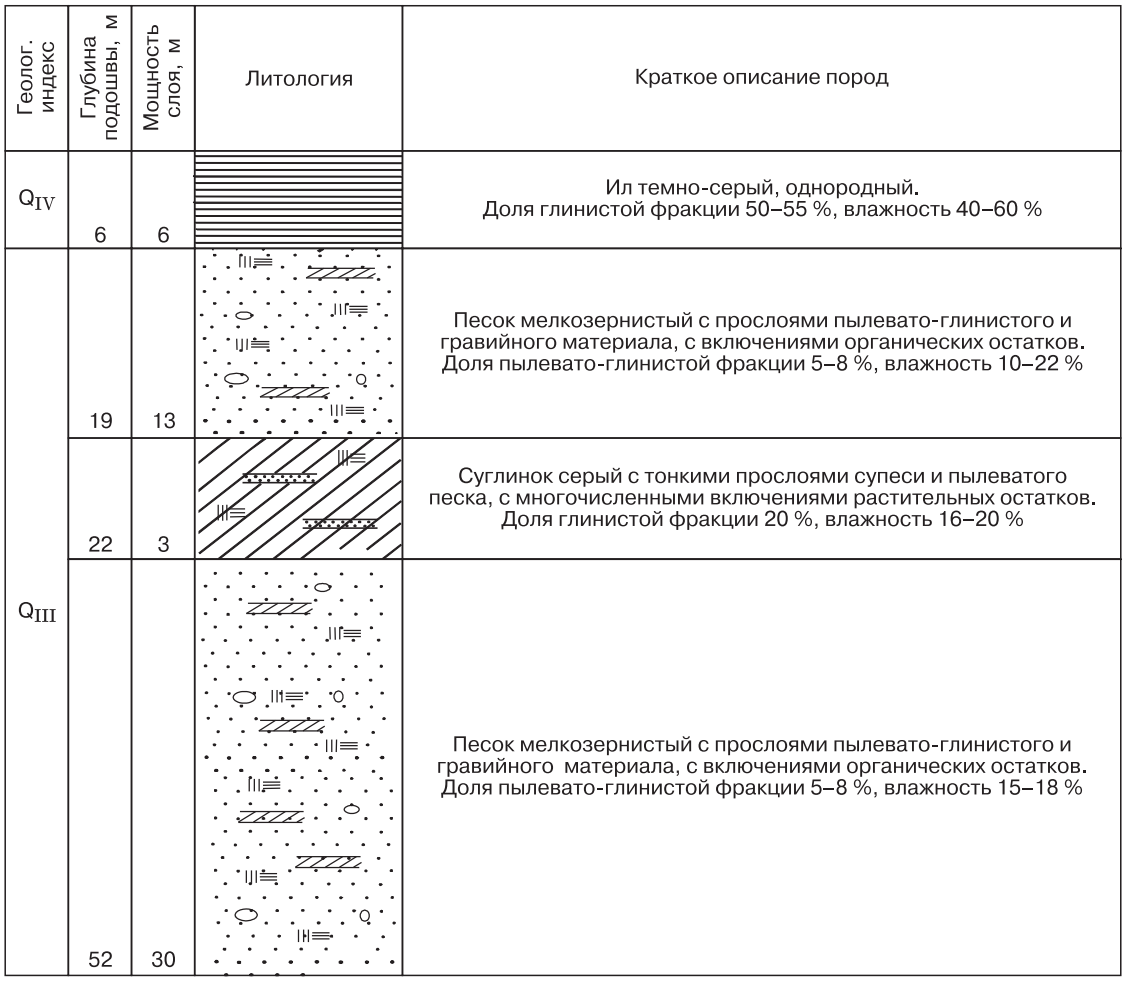

Рис. 2. Геологический разрез по скважине 1D-11.

толще хорошо коррелировались со значениями в пылевато-глинистых прослоях.

Следует отметить, что на глубине 19 м была вскрыта крупная линза переслаивающихся суглинков и супесей мощностью 3 м. Доля глинистой фракции (менее 0,001 мм) составляла в среднем около 20 %.

Вскрытая при бурении мощная песчаная толща имеет неоплейстоценовый возраст и коррелируется со сходными песчаными отложениями, вскрывающимися в береговых обнажениях Быковского полуострова и в нижней части разреза отложений о. Муостах [*Григорьев, 1996*].

На основе данных термометрии в скважине было установлено, что породы имели отрицательную температуру, при этом наблюдалось ее понижение с глубиной. Так, на глубине 15–20 м температура донных отложений была –0,15 °С, а на глубинах 40–45 м составляла уже –0,3 °С. Сравнение данных по термометрии и температуры начала замерзания пород, которая лежала в интервале –0,8...–1,0 °С, показало, что породы находились в охлажденном состоянии. При этом засоленность исследуемых пород слабо менялась по разрезу и составляла в среднем 0,5 %. Исходя из анализа распределения температуры пород по глубине, а также температуры начала замерзания пород, можно предположить, что в районе исследования кровля ММП находится на глубине около 80–100 м [*Semiletov et al., 2011*].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Теплопроводность донных отложений в море Лаптевых определялась непосредственно в полевых условиях по керну, полученному при бурении со льда буровой установкой УРБ-4Т. Буровые работы проводились в апреле 2011 г. В ходе работ удалось добиться высокого выхода керна (более 95 %). Диаметр получаемого керна был примерно 10 см.

Для определения теплопроводности образцов керна использовался аналитический зонд KD-2 (рис. 3). Этот прибор представляет собой цилиндрический зонд, оснащенный 16-битным микропроцессором, который автоматически производит вычисление теплопроводности (Вт/(м·К)) и контролирует температуру грунта с точностью до 0,1 °С. Методика определения теплопроводности дисперсных пород с помощью KD-2 представлена в работе [*Чувилин, Буханов, 2013*].

В наших исследованиях замеры теплопроводности кернов осуществляли сразу после их поднятия из скважины. На образце керна (длиной 50–60 см) равномерно по его длине выбирали три-четыре точки замера теплопроводности. При этом аналитический зонд внедряли в грунт на всю длину. В каждой точке делали два-три замера теплопроводности, интервал между замерами был не менее 30 с. Во время проведения замеров контролировали температуру образца. В итоге по керну на всю мощность исследуемого разреза (52,3 м) сделано более 1200 замеров теплопроводности. В дальнейшем все полученные данные анализировали, определяли средние значения для каждого интервала керна.

Для отдельных образцов керна определяли значения теплопроводности не только в охлажденном, но и в мерзлом состояниях. Для этого талые образцы керна замораживали в холодильной камере при температуре –5...–7 °С.

Рис. 3. Замер теплопроводности образца керна аналитическим зондом KD-2.

В ходе полевых работ, параллельно с измерениями теплопроводности керна, определялся ряд физических параметров и характеристик керна: влажность (*W*, %) и плотность грунта (ρ, г/см^3). Расчеты плотности скелета ($\rho_{ск}$, г/см^3) и пористости (*n*, д. е.) грунта проводились по стандартной методике, принятой в грунтоведении [*Практикум..., 1993; Методы..., 2004*].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В результате определения теплопроводности донных отложений были получены профили изменения теплопроводности, влажности и плотности пород по глубине (рис. 4). Анализ данных по теплопроводности донных отложений позволяет выявить следующие особенности ее изменения по глубине. До глубины порядка 6 м теплопроводность отложений составляет 0,8–1,1 Вт/(м·К). На глубине 6–7 м происходит резкое увеличение теплопроводности от 1,1 до 1,7 Вт/(м·К). Это связано с тем, что от 0 до 6 м разрез представлен донными илами (см. рис. 2), которые характеризуются высокой влажностью – от 90 % в верхней до 45 % в нижней части интервала. При этом плотность скелета илов составляет 1,2–1,4 г/см^3. Глубже 6–7 м илы резко сменяются песчаными породами. До глубины 17–18 м теплопроводность песков плавно повышается от 1,7 до 2,0 Вт/(м·К) (см. рис. 4). Такое повышение можно связать с постепенным увеличением плотности скелета пород от 1,44 до 1,76 г/см^3 на данном интервале (8–14 м).

Далее вниз по разрезу в интервале глубин 18–20 м наблюдается снижение теплопроводности пород с 2,0 до 1,5 Вт/(м·К), а с глубины 20 до 26 м происходит увеличение теплопроводности до 1,9 Вт/(м·К). Зафиксированное понижение теплопроводности пород в этом интервале (18–22 м) вызвано появлением в песчаном разрезе прослоя более дисперсного состава. По данным, представленным на рис. 5, видно, что в интервале глубин от 18 до 22 м в значительных количествах (более 10 %) начинают появляться частицы менее 0,05 мм, т. е. пылеватые и глинистые фракции. На глубине 19,5 м наблюдается пик содержания глинистых частиц (около 20 %), что соответствует глубине с минимальным значением теплопроводности 1,5 Вт/(м·К) для данного интервала. В разрезе этому интервалу значений теплопроводности соответствует прослой суглинка с влажностью 16–20 %.

Ниже, с глубины 22 м и до забоя скважины на 52,3 м, разрез представлен песками с влажностью 15–18 %, плотностью скелета 1,5–1,8 г/см^3 и пористостью 0,36–0,42. Их теплопроводность находится в основном в диапазоне 1,7–2,0 Вт/(м·К). При этом небольшие отклонения в значениях теп-

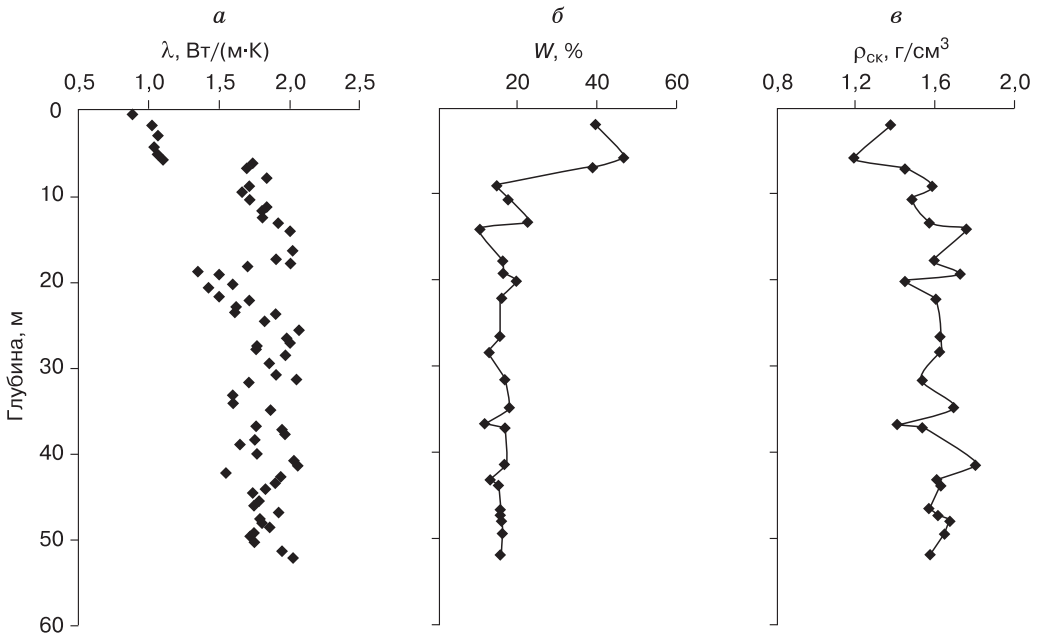

Рис. 4. Изменение теплопроводности (*а*), влажности (*б*) и плотности скелета пород (*в*) по глубине.

лопроводности песков, по-видимому, связаны с некоторыми изменениями влажности и плотности по глубине, а также, возможно, с присутствием тонких прослоев тонкодисперсного материала. Повышенное значение теплопроводности песков (2,0–2,1 Вт/(м·К)) в интервале 40–41 м было приурочено к песчаным горизонтам с более высокой (до 1,8 г/см^3) плотностью скелета породы.

Согласно данным рис. 5, в песчаной толще с глубины 22 м можно также выделить две зоны в интервалах глубин 33–35 и 47–49 м, где наблюдается некоторое уменьшение значения теплопро-

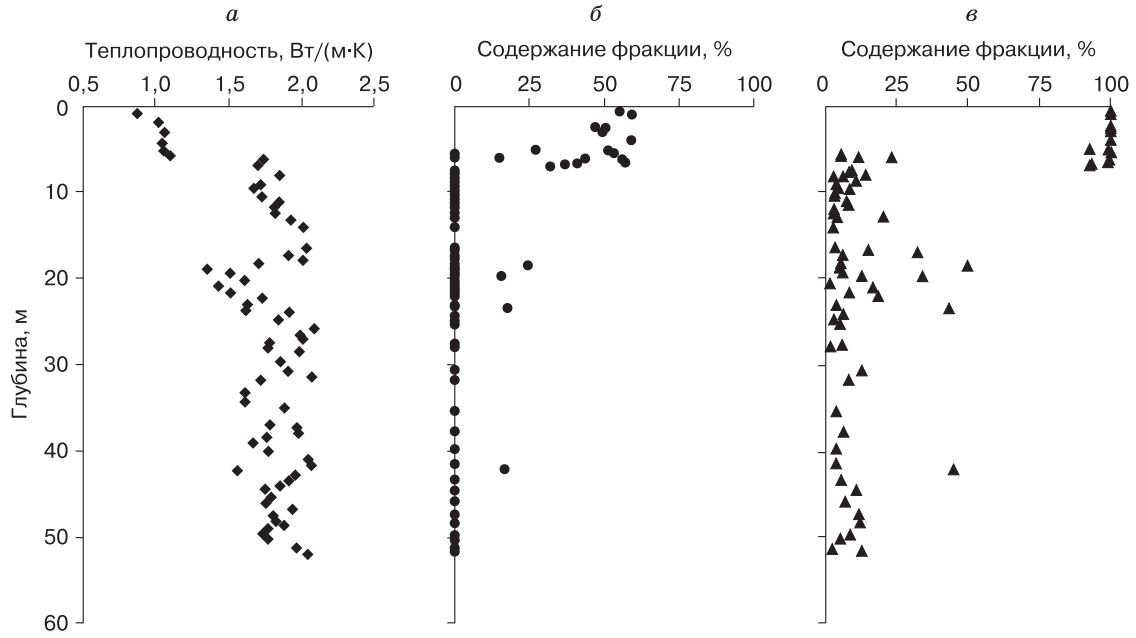

Рис. 5. Изменение теплопроводности пород (*а*) и содержания пылевато-глинистого материала (*б*, *в*) в породах по глубине.

б – фракция менее 0,001 мм; *в* – фракция менее 0,05 мм.

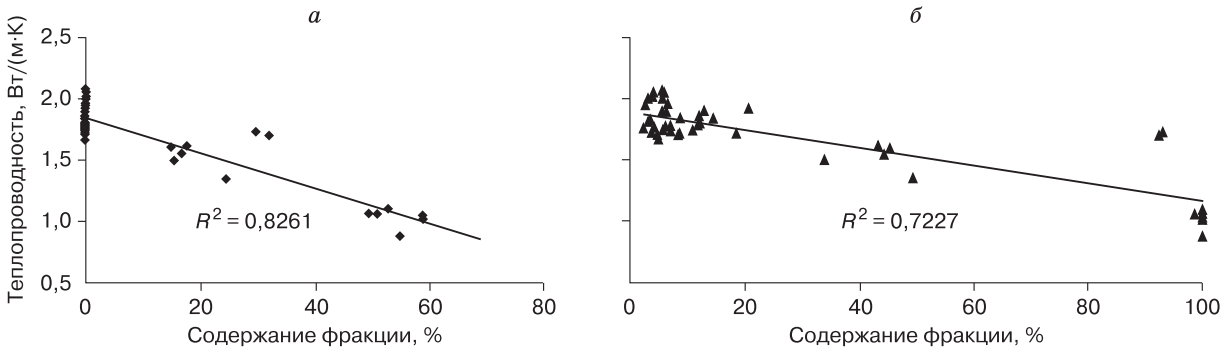

Рис. 6. Зависимость теплопроводности донных отложений от содержания фракций:

а – менее 0,001 мм; *б* – менее 0,05 мм.

водности до 1,7 Вт/(м·К). В интервале глубин 33–35 м теплопроводность снизилась до 1,6 Вт/(м·К), что может быть связано с локальным появлением в разрезе литологической неоднородности с высоким (около 15 %) содержанием пылевато-глинистой фракции (менее 0,05 мм) (см. рис. 5). Другой интервал глубин 47–49 м, где наблюдается пониженное значение теплопроводности пород (λ = 1,7 Вт/(м·К)), также характеризуется повышенным содержанием пылевато-глинистой фракции (до 12 %). Он представлен песками пылеватыми с W = 16 % и $\rho_{ск}$ = 1,65 г/см^3.

Из данных, представленных на рис. 6, следует, что содержание глинистых и пылеватых частиц в изученном разрезе является очень важным фактором, влияющим на их теплопроводность. На рис. 6, *а* видно, что теплопроводность донных отложений имеет линейную зависимость от содержания в нем глинистых частиц (фракции менее 0,001 мм) с высокой достоверностью аппроксимации R^2 = 0,826. На рис. 6, *б* можно проследить, что теплопропроводность изучаемых отложений имеет линейную зависимость (R^2 = 0,722) от содержания фракции менее 0,05 мм, т. е. суммарного содержания глинистых и пылеватых частиц.

На рис. 7 представлены зависимости теплопроводности песчаных отложений от влажности (W), плотности (ρ) и плотности скелета ($\rho_{ск}$). Видно, что зависимость теплопроводности песков от этих параметров очень слабая. Вероятно, это связано с тем, что большая часть (75 %) значений сконцентрирована в одной области, и диапазон значений изучаемых параметров в данной области крайне узкий. Большая часть значений W находится в интервале 15–17 %, при этом теплопроводность меняется в диапазоне 1,7–2,0 Вт/(м·К) (см. рис. 7, *а*).

На основе приведенных данных можно сделать вывод, что рассмотренные параметры (влажность, плотность и плотность скелета) не являются основными и значимыми факторами, влияющими на изменчивость теплопроводности изученных

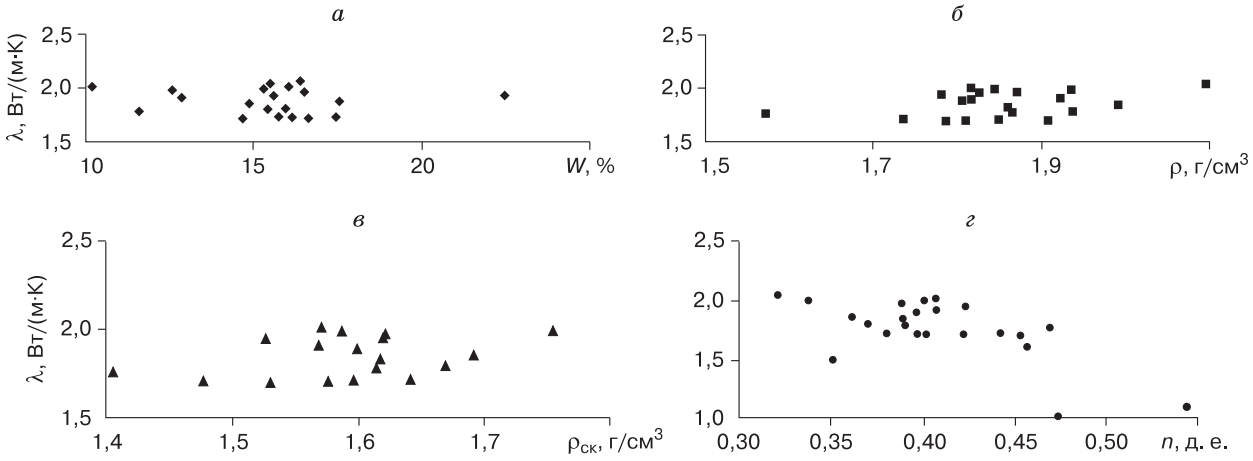

Рис. 7. Зависимости теплопроводности песчаных отложений от влажности (*а*), плотности (*б*), плотности скелета (*в*) и теплопроводности донных отложений от их пористости (*г*).

песчаных отложений. По-видимому, большую роль играют структурно-текстурные особенности этих отложений, в частности наличие тонких прослоев глинисто-пылеватого материала, а также неравномерная газонасыщенность донных отложений.

На рис. 7, *г* представлена зависимость теплопроводности донных отложений от их пористости. В целом теплопроводность с повышением пористости уменьшается. Эта зависимость может быть аппроксимирована в виде линейной со сравнительно небольшой достоверностью аппроксимации $R^2 = 0{,}435$. Связано это с тем, что помимо пористости имеются другие факторы, указанные выше, которые влияют на условия теплопереноса в донных отложениях.

Как отмечено выше, для отдельных образцов керна измерение величины теплопроводности выполнялось как в мерзлом, так и в охлажденном состояниях. Сравнение полученных значений теплопроводности приведено на рис. 8. Из представленных данных следует, что после замораживания теплопроводность донных отложений увеличилась примерно на 45–60 %. Для образца песка, отобранного с глубины 45 м, теплопроводность в охлажденном состоянии равна 1,78 Вт/(м·К), а в мерзлом – 2,78 Вт/(м·К). При этом разница в значениях составляет 56 %.

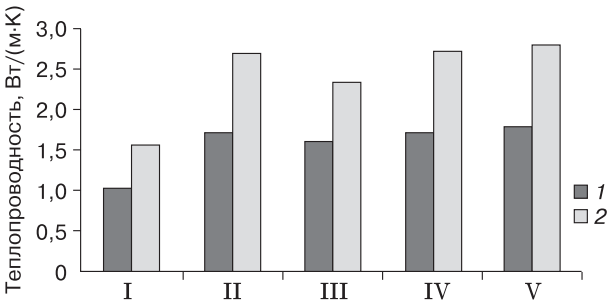

Рис. 8. Сравнение теплопроводности образцов керна с разных глубин в охлажденном (*1*) и мерзлом (*2*) состояниях при $t = -5\ldots-7$ °С.

I – глина, 2 м; II – песок, 9 м; III – суглинок, 20 м; IV – песок, 32 м; V – песок, 45 м.

ВЫВОДЫ

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получены фактические значения теплопроводности донных отложений в губе Буор-Хая на шельфе моря Лаптевых до глубины 52,3 м.

2. В верхней части разреза, представленной до глубины 6 м илами, теплопроводность с глубиной повышается от 0,8 до 1,1 Вт/(м·К). Весовая влажность пород при этом закономерно уменьшается с 90 до 45 %. Для нижележащей толщи песчаных пород теплопроводность отложений меняется от 1,4 Вт/(м·К) для горизонта с повышенным содержанием пылевато-глинистого материала до 2,1 Вт/(м·К) для песчаных горизонтов с высокой плотностью. В целом для песчаной толщи характерны величины теплопроводности порядка 1,7–2,0 Вт/(м·К), влажности 15–18 % и плотности скелета 1,5–1,8 г/см^3. Выявленные в песчаной толще горизонты с пониженными значениями теплопроводности соответствуют присутствию в разрезе прослоев с повышенным содержанием глинисто-пылеватого материала. Частое изменение теплопроводности песчаной толщи по глубине, возможно, связано со структурно-текстурными неоднородностями, которые обусловлены микрослоистостью за счет тонкодисперсного материала, а также неравномерной газонасыщенностью донных отложений.

3. Содержание в отложениях глинистых и пылеватых фракций (более 2–3 %) является основным фактором, определяющим теплопроводность донных отложений. Отмечено закономерное понижение теплопроводности пород с увеличением их пористости. Эта зависимость характерна как для песчаных, так и для более дисперсных пород. Показано, что влажность, плотность песчаных отложений и их плотность скелета оказывают слабое влияние на теплопроводность и не являются значимыми факторами, влияющими на ее изменчивость по глубине.

4. Показано, что теплопроводность одних и тех же образцов в мерзлом состоянии на 45–60 % выше, чем в охлажденном.

Настоящая работа является важным этапом многолетних (1999–2012) исследований в морях Восточной Арктики. Проведение экспедиционных работ стало возможным благодаря финансовой поддержке по грантам ориентированных фундаментальных исследований РФФИ (11-05-12043, 11-05-00781, 11-05-12021, 11-05-12027, 11-05-12028, 11-05-12032), гранту NOAA OAR Climate Program Office (NA08OAR4600758), грантам National Science Foundation (OPP-0327664, OPP-0230455, ARC-1023281, ARC-0909546).

Авторы выражают благодарность президиуму ДВО РАН и лично академику В.И. Сергиенко, без решающей поддержки которых работа не была бы выполнена.

Литература

Балобаев В.Т. Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / В.Т. Балобаев, А.В. Павлов, Г.З. Перльштейн и др. Новосибирск, Наука, 1983, 214 с.

Григорьев М.Н. Геология, сейсмичность и мерзлотные процессы арктических районов Западной Якутии / М.Н. Григорьев, В.С. Имаев, Л.П. Имаева и др. Якутск, Якут. науч. центр СО РАН, 1996, 84 с.

Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Якутск, 2008, 40 с.

Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии / Н.Ф. Григорьев. М., Наука, 1966, 119 с.

Дучков А.Д., Манаков А.Ю., Казанцев С.А. и др. Измерение теплопроводности синтетических образцов донных осадков, содержащих гидрат метана // Физика Земли, 2009, № 8, с. 42–50.

Кобзарь В.М., Митропольский А.Ю. Теплопроводность поверхностного слоя донных осадков Черного моря // Геол. журн., 1983, т. 43, № 3, с. 38–46.

Козлов С.А. Опасные для нефтегазопромысловых сооружений геологические и природно-техногенные процессы на западно-арктическом шельфе России // Нефтегаз. дело, 2005, № 1. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kozlov/Kozlov_2.pdf (дата обращения: 10.08.12).

Козлов С.А. Концептуальные основы инженерно-геологических исследований Западно-Арктической шельфовой нефтегазоносной провинции // Нефтегаз. дело, 2006, № 1. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kozlov/Kozlov_4.pdf (дата обращения: 10.08.12).

Маслов А.Д. Физико-механические и теплофизические свойства донных отложений юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского морей // Инженерно-геологические свойства донных отложений Мирового океана. Л., Севморгеология, 1985, с. 51–63.

Маслов А.Д. Изучение физического состояния пород криолитозоны // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 44–55.

Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.

Молочушкин Е.Н. Результаты годичного наблюдения за температурой грунтов на острове Муостах // Вопр. географии Якутии, 1969, вып. 5, с. 127–137.

Молочушкин Е.Н., Гаврильев Р.И. Строение, фазовый состав и термический режим горных пород, слагающих дно прибрежной зоны моря Лаптевых // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л., Гидрометеоиздат, 1970, с. 503–509.

Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М. Результаты исследований гидратосодержащих осадков глубоководного грязевого вулкана "Маленький" (оз. Байкал) // Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений: Тезисы докл. междунар. конф. М., РГУНГ, 2009, с. 28–30.

Практикум по грунтоведению / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М., МГУ, 1993, 390 с.

Рекант П.В., Гусев Е.А., Тумской В.Е. и др. Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 332–348.

Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В. и др. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности гидратов газов в рифтовых структурах арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2) // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 29–38.

Романовский Н.Н., Тумской В.Е. Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 3–14.

Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина "метановой катастрофы": некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. РАН, 2012, т. 446, № 3, с. 330–335.

Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1981, с. 28–38.

Фартышев А.И. О динамике криолитозоны побережий пролива Санникова // Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. Якутск, 1978, с. 25–37.

Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых / А.И. Фартышев. Новосибирск, Наука, 1993, 136 с.

Хуторской М.Д., Подгорных Л.В. Геотермия арктического бассейна – проблемы и решения. I. Тепловое поле и нефтегазоносность шельфа арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии, 2010, № 1, с. 6–26.

Чеверев В.Г., Видяпин И.Ю., Тумской В.Е. Состав и свойства отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 44–50.

Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Экспериментальное изучение теплопроводности мерзлых гидратосодержащих грунтов при атмосферном давлении // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 69–79.

Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных измерений // Докл. РАН, 2009, т. 429, № 4, с. 541–544.

Bukhanov B.A., Chuvilin E.M., Guryeva O.M., Kotov P.I. Experimental study of the thermal conductivity of the frozen sediments containing gas hydrate // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost, Alaska, Fairbanks, 2008, p. 205–209.

Junker R., Grigoriev M.N., Kaul N. Non-contact infrared temperature measurements in dry permafrost boreholes // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, No. B04102.

Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Romanovskii N.N. et al. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea Region // J. Geophys. Res., 2012, doi:10.1029, p. 429–436.

Nicolsky D.J., Shakhova N.E. Modeling sub-sea permafrost in the East-Siberian Arctic Shelf: the Dmitry Laptev Strait // Environ. Res. Lett., 2010, vol. 5, doi:10.1088/1748-9326/5/1/015006.

Semiletov I., Shakhova N., Dudarev O. et al. First drilling in the Ust' Lensky Rift Zone, Laptev Sea: accomplishment and preliminary results // EOS: AGU Fall Meeting, 2011, San-Francisco, USA, GC51I-07.

Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I. et al. On Carbon transport and fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System // Environ. Res. Lett., 2012, vol. 7, doi:10.1088/1748-9326/7/1/01520.

Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // J. Geophys. Res., 2010a, vol. 115, doi:10.1029/2009JC005602.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science, 2010b, vol. 327, p. 1246–1250.

Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Modern state of the role of the East Siberian Shelf in the methane cycle // Herald of the Rus. Acad. of Sci., 2009, vol. 79, No. 6, p. 507–518.

Поступила в редакцию
30 августа 2012 г.