

УДК 551.581.1:551.583.7:550.837.82

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ КРОВЛИ ПОДВОДНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2016 г. А. В. Кошурников^{1,*}, В. Е. Тумской², Н. Е. Шахова²,
академик РАН В. И. Сергиенко³, О. В. Дударев^{2,4}, А. Ю. Гунар¹,
П. Ю. Пушкарев¹, И. П. Семилетов^{2,4}, А. А. Кошурников⁵

Поступило 12.04.2016 г.

Выявленное несоответствие между положением кровли подводной мерзлоты в морях Восточной Арктики, полученным путем моделирования, с положением аномалий в распределении растворенного метана, ассоциированным с восходящими факелообразными выбросами пузырькового метана, стало основанием для разработки репрезентативного геофизического экспресс-метода, позволяющего картировать положение кровли подводной мерзлоты, заверенной колонковым бурением в море Лаптевых. Реализованный в работе метод основан на технологии ЭМ-зондирования становлением поля в ближней зоне путем создания первичного ЭМ-поля в среде и измерении возникающего вторичного ЭМ-поля.

DOI: 10.7868/S086956521623016X

В настоящее время исследование особенностей распределения и деградации реликтовых мерзлых толщ на арктическом шельфе (далее подводная мерзлота – ПМ) России является одним из наиболее актуальных направлений морских исследований, что в первую очередь обусловлено потенциальной климатической ролью дестабилизации мегапула низзалегавших гидратов и массивированного выброса метана в водную толщу и атмосферу [1–3, 6, 7]. Очевидно, что при наличии сплошной, а значит газонепроницаемой, ПМ мегапул газовых гидратов является стабильным, в противном случае происходит выброс метана в водную толщу и атмосферу. Недавно выявленное несоответствие между положением кровли мерзлоты, полученным путем моделирования [8, 9], с положением аномалий в распределении растворенного метана [4, 5], ассоцииро-

ванным с восходящими факелообразными выбросами пузырькового метана [6, 7], стало основанием для создания международного научного консорциума, включающего морских биогеохимиков, геофизиков и мерзлотоведов, с целью разработки репрезентативного метода картирования кровли ПМ. Кроме того, происходящая вследствие трансгрессии моря в последние ~15 тыс. лет деградация ПМ, помимо массивированного выброса метана, способствует расширению областей разгрузки подмерзлотных вод на сибирском арктическом шельфе [9], что приводит к повышению инженерно-геологических рисков при разведке и освоении шельфовых нефтегазовых месторождений. Это определяет практическую ценность предлагаемого направления исследования. В отличие от континентальных условий, где геофизические методы для мерзлотной съемки разработаны несколько десятков лет назад [10], для арктического шельфа опыт подобных работ весьма ограничен. Так, например, на основе буровых скважин, число которых на шельфе моря Лаптевых исчезающе мало, картировать распространение мерзлых толщ не представляется возможным. Опыт сейсмоакустических исследований [11] пока не позволяет интерпретировать получаемые данные и различать талые и мерзлые породы.

Настоящая работа посвящена описанию реализации инструментального подхода, основанного на принципах электромагнитного (ЭМ) зондирования [12] в естественных условиях. Реализо-

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Томский политехнический университет

³ Институт химии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

⁴ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

⁵ Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики"

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

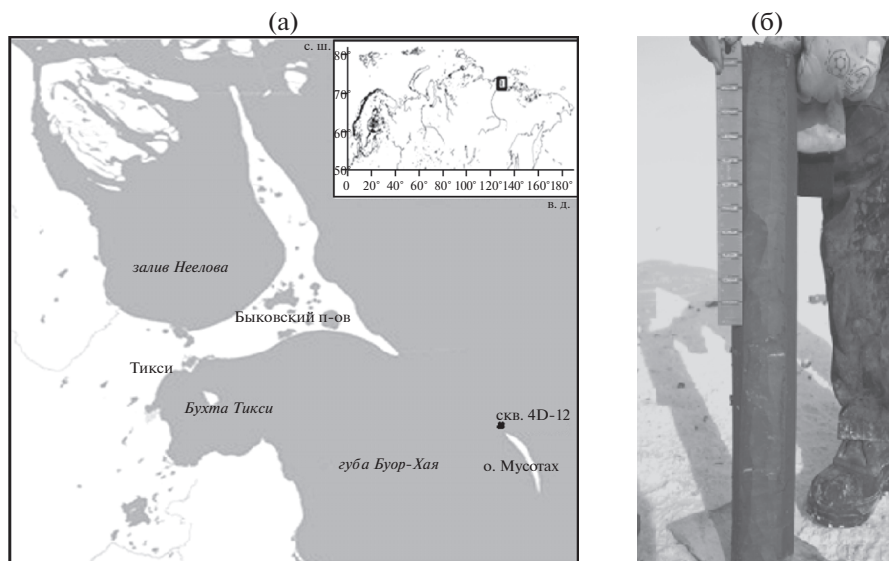


Рис. 1. Слева – обзорная карта района работ и расположение точки электромагнитного зондирования и скважины 4D-12, справа – мерзлый керн скважины 4D-12 из интервала 30–31 м (светлые горизонтальные линзы – шлиры льда, остальная часть керна имеет массивные криогенные текстуры).

ванный в данной работе метод основан на технологии ЭМ-зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) путем создания первичного ЭМ-поля в среде и измерениями возникающего вторичного ЭМ-поля, которая зависит от удельного электрического сопротивления (УЭС) среды. Глубина распространения ЭМ-поля определяется его частотой. Таким образом, измеряя вторичное ЭМ-поле на разных частотах, имеем возможность оценить УЭС пород на разных глубинах. Важно то, что УЭС твердомерзлых пород на несколько порядков превышает УЭС талых пород. В связи с присутствием в мерзлых породах льда, обладающего в чистом виде сопротивлением $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, это обеспечивает репрезентативность ЭМ-зондирований в целях картирования границ залегания талых и мерзлых пород с различным льдонасыщением [10]. Уникальность данной работы заключается в том, что впервые результаты ЭМ-зондирования в Арктическом регионе были проверены путем бурения скважин тем же авторским коллективом и в то же время.

В качестве района исследования была выбрана губа Буор-Хая моря Лаптевых, комплексными исследованиями которой авторы занимаются начиная с 1990-х годов [14]. Именно в этом районе начиная с весны 2011 г. проводится колонковое бурение с целью выявления положения кровли ПМ для понимания механизма формирования газовыводящих каналов, определяющих восходящую миграцию метана [13]. Скважины бурили без применения бурового раствора с поверхности припайного льда в марте–апреле. В первый же год работ (март–апрель 2011 г.) выяснилось, что

глубина залегания кровли мерзлых пород отличается от предполагавшейся ранее по результатам математического моделирования эволюции и современного состояния мерзлых пород на шельфе моря Лаптевых [8]. Более того, было показано, что при глубине моря 12 м ПМ отсутствует как минимум до глубины 100 м, а температура верхнего 60-метрового слоя осадков примерно на 10°C выше, чем на суше [6]. По этой причине в 2012 г. для буровых и ЭМ-работ были выбраны точки в пределах четырехметровой изобаты (рис. 1а), где наличие ПМ было нами документировано (рис. 1б). После ЭМ-зондирования в геометрическом центре петель антенны была пройдена скважина 4D-12 до глубины 57 м от поверхности дна (рис. 1б). Глубина воды в точке бурения составила 2.5 м при толщине припайного льда примерно 2 м. С поверхности залегали немерзлые отложения (талые и охлажденные), а первые мерзлые породы были подняты с глубины 24.3 м. Они были представлены твердомерзлыми песками с массивными криогенными текстурами. Отметим, что в интервале глубин 27–28 и 29–30 м были вскрыты немерзлые прослой суглинков в толще песков, ниже – слой суглинков мощностью около 2 м с редколиновидной криогенной текстурой (рис. 1б) и далее, до забоя скважины – пески с массивными криогенными текстурами.

Геофизические исследования проводили с поверхности морского льда. Они осуществлялись с помощью антенны, состоящей из генераторной и измерительной квадратных петель, и аппаратного комплекса “Цикл-7” [15]. На первом этапе работ ЭМ-поле возбуждалось петлей $25 \times 25 \text{ м}$,

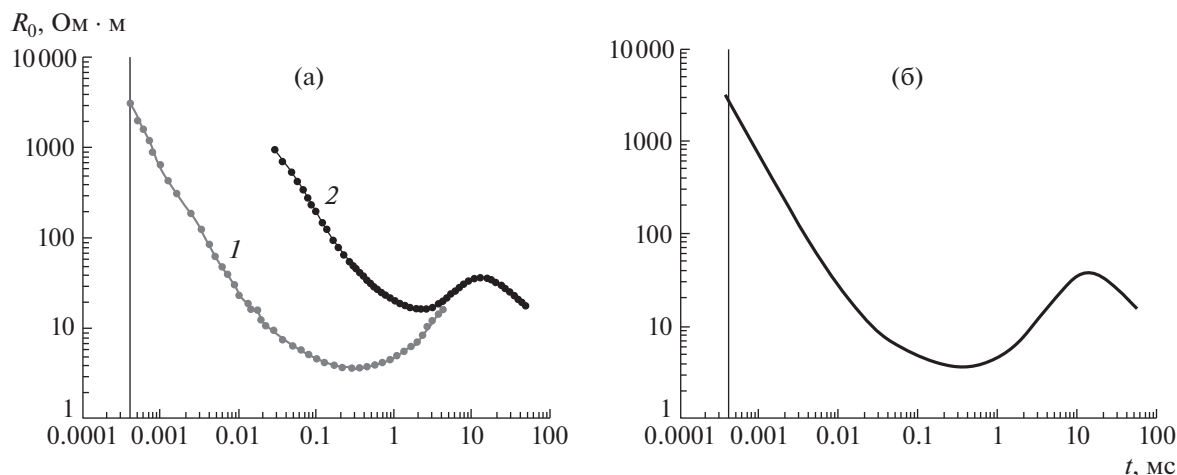


Рис. 2. Слева — наблюдаемые кривые ЗСБ в районе о. Муостах, море Лаптевых, размеры антенн: 1 — 25×25 м, 2 — 400×400 м. Справа — сводная кривая ЗСБ в районе о. Муостах.

расположенной на льду, а его измерение — петлей 20×20 м, расположенной соосно с возбуждающей петлей, для изучения верхней части геоэлектрического разреза, что позволило получить высокое разрешение анализируемого сигнала до глубин 100 м. Глубинную часть геоэлектрического разреза исследовали с помощью генераторных петель размером 400×400 м и измерительной петли размером 100×100 м, расположенной на льду соосно с возбуждающей петлей. При таких размерах антенны измерения ЭМ-поля позволили получить информацию об удельном электрическом сопротивлении пород до глубины около 1 км.

Первые результаты зондирования показали существование в геоэлектрическом разрезе вблизи юго-восточного края дельты р. Лена и о. Муостах высокоомного слоя (рис. 2а). Анализ кривых ЗСБ с генераторной петлей 25×25 м свидетельствует об увеличении кажущегося сопротивления со временем (т.е. с глубиной) в интервале времен 0.4–4 мс. Анализ кривых ЗСБ с генераторной петлей 400×400 м свидетельствует об увеличении кажущегося сопротивления с глубиной в интервале 3–10 мс и уменьшении кажущегося сопротивления с глубиной в интервале 20–50 мс (рис. 2а). Сводная кривая ЗСБ в районе о. Муостах приведена на рис. 2б. Анализ сводной кривой позволяет сделать вывод, что по данным электромагнитных зондирований в районе о. Муостах зафиксирован высокоомный слой с кажущимся сопротивлением $40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и выше, тогда как кажущееся сопротивление немерзлых толщ оказалось на 1–2 порядка меньше. Полученные данные позволяют оценить УЭС этого слоя и глубины до его кровли и подошвы.

Первой задачей при проведении ЭМ-зондирований стала оценка достоверности и точности получаемых при этом результатов. Для этого вблизи северной оконечности о. Муостах (рис. 1) в точке,

где планировалось бурение одной из колонковых скважин, до подхода буровой техники были выполнены два электромагнитных зондирования с размерами генераторных петель 25×25 м и 400×400 м (рис. 2а). Это позволило исключить влияние металла техники на результаты зондирований и получить неискаженные данные о положении кровли ПМ. После зондирований было проведено математическое моделирование геоэлектрического разреза по данным ЗСБ. Математическое моделирование осуществлялось с помощью программного обеспечения Faraday (П.Ю. Пушкарев, МГУ). Программное обеспечение позволило выполнить расчет ЭМ-поля диполя в 1D-среде. Постановка и решение задачи расчета электромагнитного поля диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды подробно описаны М.С. Ждановым (1986). Ниже приведен пример реализации этой модели для точки, где скважина 4D-12 была выполнена после электромагнитного зондирования.

Математическое моделирование заключалось в задании трехслойной горизонтально-слоистой модели среды (рис. 3) и расчете ЭМ-поля, которое создается генераторной петлей (диполем) на поверхности среды и измеряется в приемной петле. Далее программное обеспечение позволило рассчитать кривую кажущегося сопротивления на поверхности среды согласно [12]. Затем кривые ЗСБ, модельная и наблюдаемая, сравниваются. Если эти кривые не совпадают, то, изменяя геоэлектрическую модель среды (меняя УЭС и мощности слоев), добиваются совпадения модельных кривых с наблюдаемой (рис. 3). После совпадения с точностью до 5% модельной и наблюдаемой кривой изменения геоэлектрической модели останавливаются и моделирование считается выполненным. Последняя геоэлектрическая

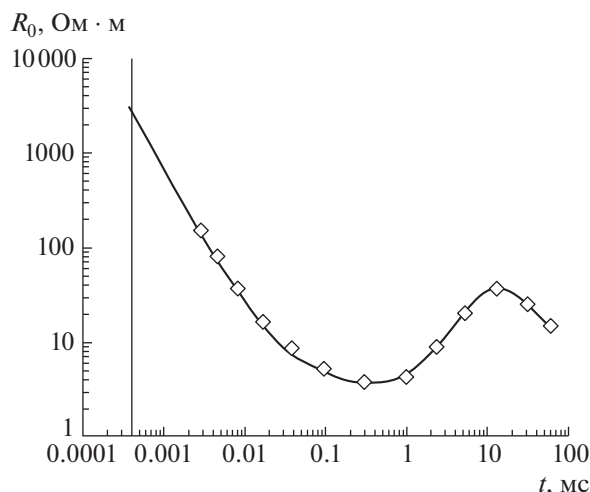


Рис. 3. Результаты моделирования геоэлектрического разреза в точке бурения скважины 4D-12. Линия – наблюдаемая кривая ЗСБ, точки – результаты моделирования. Геоэлектрическая модель: $R_0 = 3.8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $H = 25 \text{ м}$ (1-й слой); $R_0 = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $H = 600 \text{ м}$ (2-й слой); $R_0 = 1.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (3-й слой).

модель, которая обеспечила совпадение модельных и наблюдаемых кривых, считается итоговой (рис. 3).

Результаты моделирования геоэлектрического разреза вблизи о. Муостах приведены на рис. 3. По данным наблюдений и математического моделирования было получено положение кровли высокоомного слоя на глубине 25 м. УЭС высокоомного слоя достигает 300 Ом · м (рис. 3). Для получения истинных значений УЭС мерзлых отложений, вскрытых бурением, были проведены измерения по образцам керна естественного сложения и засоления из скважины 4D-12. Для средней, более льдистой, части мерзлых пород, вскрытой в интервале глубин 31.5–40 м, получено УЭС песка 500 Ом · м, ниже по разрезу, в интервале глубин 40–55 м, получено УЭС песков 300 Ом · м. Измерения УЭС образцов керна из скважин позволяют задавать истинные величины УЭС слоев в геоэлектрической модели при моделировании результатов ЭМ-зондирований. Поскольку поле ЭМ-диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды зависит как от УЭС слоев, так и от их мощности [12], то использование УЭС, измеренных в керне из скважин, позволяет определять мощности слоев с различным УЭС, в частности, глубину до кровли ПМ.

Вопрос о возможности картирования подошвы ПМ требует дополнительного исследования, так как в настоящее время нет возможности ассоциировать глубину залегания подошвы высокоомного слоя с подошвой ПМ – УЭС высокоомного слоя может быть проявлением существования высокоомного слоя (слоев) газгидратов,

газов, выходов коренных пород или их комбинацией. Тем не менее в данной работе впервые показана возможность использования ЭМ-зондирования для картирования кровли ПМ.

Сопоставление результатов опережающего ЭМ-зондирования методом ЗСБ и бурения скважины 4D-12 показало хорошее совпадение глубины залегания кровли мерзлых пород: 25 и 24.3 м соответственно. Таким образом, по результатам электромагнитных зондирований на шельфе моря Лаптевых в районе губы Буор-Хая обнаружен высокоомный слой. Сравнение глубины залегания кровли высокоомного слоя геоэлектрического разреза и результатов бурения показало, что, по крайней мере в верхней части разреза, существование высокоомного слоя связано с ПМ, а положение кровли ПМ определяется с высокой степенью точности. Это позволяет использовать ЭМ-зондирование методом ЗСБ для картирования кровли реликтовых мерзлых толщ на арктическом шельфе.

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (грант 14, Z50.31.0012/03.19.2014), РФФИ (гранты 13–05–12015, 13–05–12013, 13–05–12004, 13–05–12028, 13–05–12041), Российского научного фонда (грант 15–17–20032).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. РАН. 2009. Т. 79. № 6. С. 507–518.
2. Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными природных измерений // ДАН. 2009. Т. 429. № 4. С. 541–544.
3. Nicolsky D., Shakhova N. Modeling Sub-sea Permafrost in the East-Siberian Arctic Shelf: the Dmitry Laptev Strati // Environ. Res. Lett. 2010. V. 5. doi 10.1088/1748-9326/5/1/015006
4. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
5. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and Geophysical Evidence of Methane Release from the Inner East Siberian Shelf // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi 10.1029/2009JC005602
6. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernikh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskey V., Gustafsson O. Ebullition and Storm-Induced Methane Release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geosciences. 2014. V. 7. № 1. doi 10.1038/NNGEO2007
7. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatina A., Chernykh D., Kosmach D., Pantelev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S.,

- Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O.* The East Siberian Arctic Shelf: Towards Further Assessment of Permafrost-Related Methane Fluxes and Role of Sea Ice // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2015. V. 373. 20140451. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>
8. *Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Пустовойт Т.П. и др.* Распространение субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // *Криосфера Земли.* 1997. Т. 1. № 3. С. 9–18.
 9. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S.* Offshore Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone on the Shelf of East Siberian Seas // *Geo-Mar. Lett.* 2005. V. 25. P. 167–182.
 10. *Хмелевской В.К.* Электроразведка. М.: Изд-во МГУ, 1984. 422 с.
 11. *Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М.* Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // *Криосфера Земли.* 2014. Т. XVIII. № 2. С. 83–90.
 12. *Жданов М.С.* Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
 13. *Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Pipko I.I., Dudarev O.* On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land–Shelf–Atmosphere System // *Environ. Res. Lett.* 2012. V. 7. doi 10.1088/1748-9326/7/1/015201
 14. *Semiletov I.P., Pipko I.I., Pivovarov N.Ya., Popov V.V., Zimov S.A., Voropaev Yu.V., Daviodov S.P.* Atmospheric Carbon Emissions from Northern Lakes: a Factor of Global Significance // *Atmos. Environ.* 1996. V. 30. P. 1657–1671.
 15. *Захаркин А.К.* Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой “Цикл”. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981. 98 с.