

## **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ**

*Олег Валентинович Нечаев*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.ф.-м.н, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

*Кирилл Николаевич Даниловский*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Статья посвящена проблеме изучения состояния вечной мерзлоты и процессов ее геокриологических изменений с помощью геофизических методов. Для мониторинга криолитозоны предлагается методика импульсного электромагнитного межскважинного зондирования. На основе векторного метода конечных элементов создана математическая модель процесса межскважинного зондирования импульсным источником в трехмерной пространственно неоднородной среде.

**Ключевые слова:** криолитозона, импульсное электромагнитное зондирование, межскважинная разведка

## **NUMERICAL SOLVING THREE-DIMENSIONAL DIRECT PROBLEM OF PULSED ELECTROMAGNETIC CROSS-WELL EXPLORATION FOR CRYOLITHOZONE MONITORING**

*Oleg V. Nechaev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

*Kirill N. Danilovskiy*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

The article is devoted to the problem of studying permafrost state and the processes of its geocryological changes using geophysical methods. To monitor the cryolithozone, a method of pulsed electromagnetic cross-well sounding is proposed. On the basis of the vector finite element method, a mathematical model of the cross-well sounding process by a pulsed source in a three-dimensional spatially inhomogeneous medium has been created.

**Keywords:** cryolithozone, pulsed electromagnetic sounding, cross-well survey

Исследование состояния вечной мерзлоты, занимающей не менее 25% площади суши земного шара, в настоящее время становится всё более актуальной научной задачей. Это обусловлено, прежде всего, климатическими изменениями последних десятилетий, сопровождающимися повышением среднегодовой

температуры воздуха на Земле. Таяние вечной мерзлоты, как следствие, несёт угрозы как локального, так и регионального и глобального масштабов. Представленное исследование посвящено научному обоснованию нового способа электромагнитного мониторинга вечной мерзлоты под автодорогами, которая представляет серьёзную проблему на территории Российской Федерации. Эксплуатация автодорог, построенных на мёрзлом основании, отличается высокой капиталоемкостью, связанной с постоянно возникающими деформациями дорожного полотна, требующими восстановительных работ и разработки мер по стабилизации мерзлотной обстановки. Как правило, причиной деформаций является вытаивание внутригрунтового льда и образование чаш протаивания в основании дороги – таким образом формируется термокарст. Развитие термокарста продолжается в течение нескольких лет, а иногда и десятков лет, что требует значительных финансовых затрат на поддержание автодороги в состоянии, соответствующем стандартам. Задача картирования чаш протаивания под дорожным полотном и определения их размеров эффективно решается методом электротомографии [1]. Чёткое оконтуривание чаши протаивания даёт возможность прицельно спланировать инженерные работы и повысить эффективность противодеформационных мероприятий.

Однако кроме картирования термокарста возникает необходимость мониторинга процессов геокриологических изменений в основании дороги, например, после проведения мероприятий по стабилизации мерзлотной обстановки. Процессы протаивания или промерзания мёрзлых пород будут сопровождаться изменением их электрической проводимости, что даёт возможность применения электроразведочных, в том числе электромагнитных методов, для мониторинга.

Мы предлагаем способ мониторинга вечной мерзлоты под автодорогами, основанный на импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании геологического пространства. Рассматриваются следующие параметры геоэлектрической модели и установки межскважинного просвечивания (рис 1.).

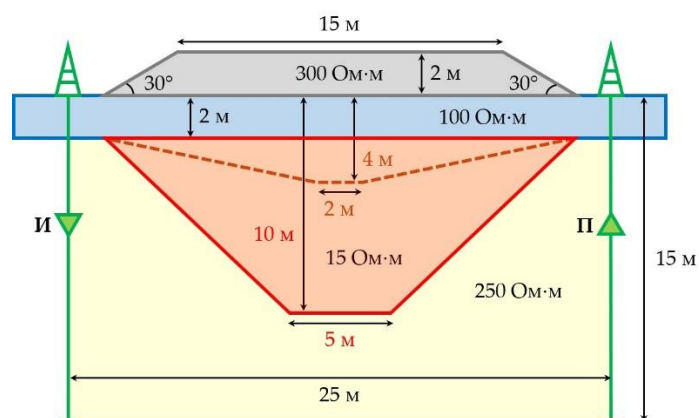


Рис. 1. Геоэлектрическая модель элемента автодороги с подтаявшей мерзлотой и применяемая геофизическая установка межскважинного просвечивания (в разрезе). Серый цвет – дорожное полотно с насыпью, синий – сезонно-оттаивающий слой, жёлтый – многолетнемёрзлые породы, красный – талики, зелёный – скважины с источником и приёмников сигнала

Трапециевидный в разрезе элемент дорожного полотна с насыпью (серый цвет) имеет высоту 2 м, длину верхнего основания 15 м и протяжённость 30 м в плане (на рисунке не показано). Углы при основании трапеции составляют  $30^\circ$ . Удельное электрическое сопротивление (УЭС) представленного элемента дороги – 300 Ом·м. Ниже залегает сезонно-оттаивающий слой прямоугольной формы (синий) с высотой 2 м и УЭС 100 Ом·м. Многолетнемёрзлые породы (жёлтый) характеризуется УЭС 250 Ом·м. Геоэлектрические параметры модели хорошо согласуются с результатами обработки полевых данных электротомографии.

Под дорогой и сезонно-оттаивающим слоем сформировалась область протавивания (талик), имеющая в разрезе форму трапеции (красный). Мы исследуем случаи двух разных таликов с УЭС 15 Ом·м: большего размера (длина верхнего основания 5 м, расстояние от него до низа насыпи 10 м) и меньшего размера (длина верхнего основания 2 м, расстояние 4 м).

С целью электромагнитного просвечивания рассматриваемой среды, по обеим сторонам дороги пробурены две вертикальные скважины глубиной 15 м от низа насыпи, на расстоянии 25 м друг от друга (зелёный). В первой находится источник сигнала (И), во второй – приёмник (П). Источник сигнала – виток с радиусом 0.02 м, приёмник – катушка того же радиуса. По витку протекает постоянный ток с амплитудой 1 А. В момент времени  $t = 0$  происходит его ступенчатое выключение, после чего в приёмной катушке регистрируется зависимость электродвижущей силы (э.д.с.) от времени. Во время межскважинного просвечивания источник и приёмник располагаются на одном уровне по глубине и синхронно перемещаются вдоль скважин.

Для получения математической модели, описывающей процесс зондирования с использованием импульсного источника возбуждения электромагнитного поля в сложной по физическому и геометрическому строению трехмерной области, используется система уравнений Максвелла. Воспользовавшись уравнениями состояния, из системы уравнений исключаются вектора электрической и магнитной индукции, а также напряженность магнитного поля, в результате чего получается уравнение второго порядка относительно напряженности электрического поля. Для решения уравнения по времени используется преобразование Фурье. Для получения дискретного аналога исходной задачи по пространственным координатам используется векторный метод конечных элементов [2]. Построение матрицы и правой части системы линейных уравнений осуществляется при помощи векторных базисных функций третьего порядка, определенных на тетраэдральной сетке [3]. Для решения системы линейных алгебраических уравнений используется модифицированный мультипликативный алгоритм совместно с алгоритмом QMR [4-5]. Расчеты выполнялись на кластере ССКЦ СО РАН.

Смоделированные зависимости э.д.с. в измерительной катушке от времени представлены в логарифмическом масштабе для четырёх глубин по скважине: 1, 5, 10 и 15 м (рис. 2).

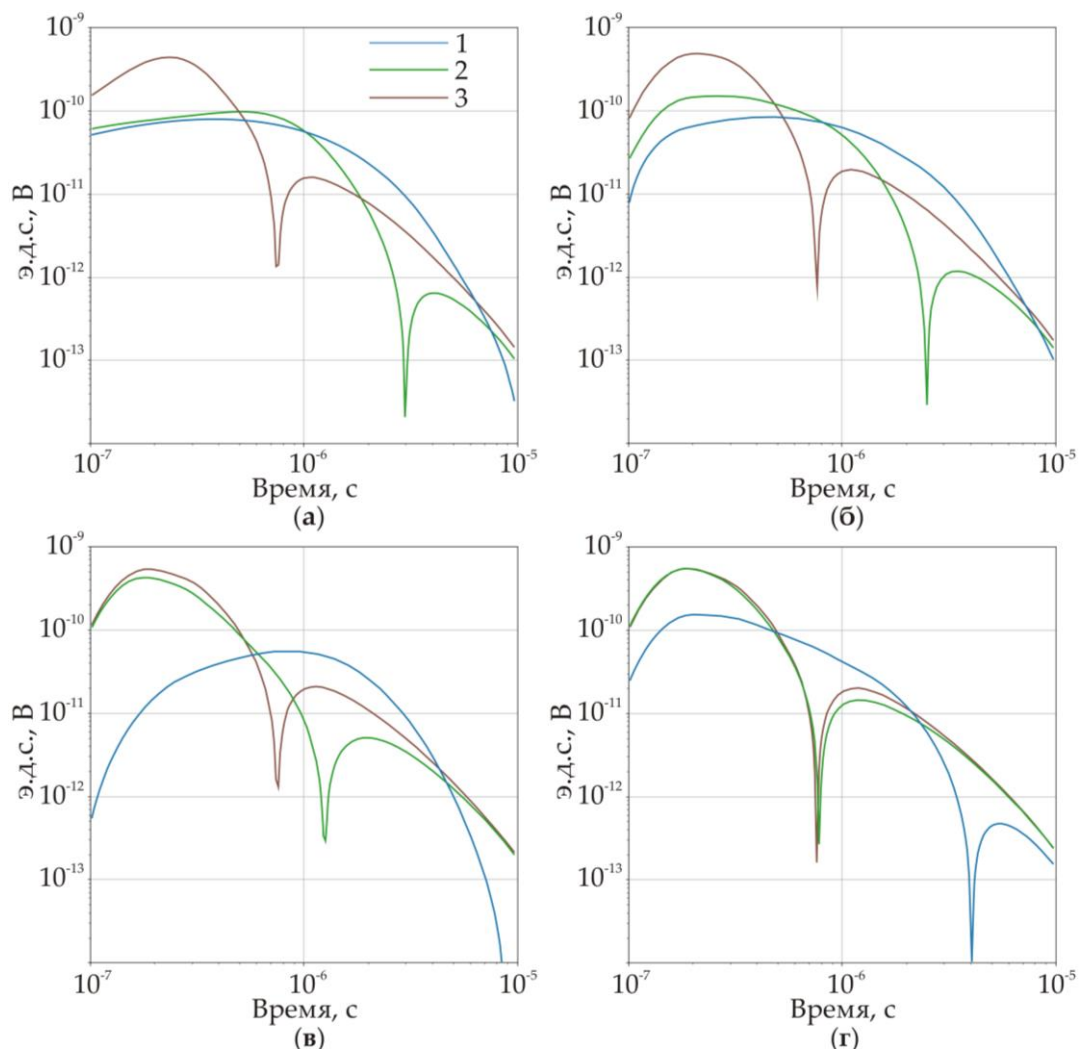


Рис. 2. э.д.с. в измерительной катушке от времени на 4 характерных глубинах (а – 1 м, б – 5 м, в – 10 м, г – 15 м) при движении источника и приёмника вниз напротив друг друга: 1 – в референтной модели, 2 – в модели с малым таликом, 3 – в модели с большим таликом

Нулевая глубина соответствует низу дорожной насыпи на рис. 1. Наиболее простой вид имеет э.д.с. для референтной модели – переход через 0 отмечается только на глубине 15 м в области больших времён. Что касается обеих моделей с таликами, соответствующие им э.д.с. существенно от неё отличаются: переход через 0 проявлен на всех графиках. При этом принципиальное различие заключается в расположении соответствующих экстремумов при изменении просвечиваемой глубины. Так, для большего талика с ростом глубины экстремум находится на одном времени, а величина э.д.с. незначительно уменьшается. Для малого талика увеличение глубины приводит к сдвигу экстремума графика э.д.с. в область меньших времён и увеличению измеряемого сигнала. Наибольшее различие между графиками э.д.с. касательно времени перехода через 0 и абсолютному значению наблюдается в среднем диапазоне глубин (например, на 5 м). На глубине 15 м размер неоднородности (талика) перестаёт быть различимым, так как зависимости э.д.с.

практически идентичны. Главный вывод проведённого анализа: с применением предлагаемой системы межскважинного просвечивания можно достоверно говорить о наличии талика под дорожной насыпью, а также оценивать его размеры.

Результаты выполненных исследований направлены на научное обоснование геофизического способа мониторинга процессов геокриологических изменений в основании автомобильных дорог. Для изучения процессов протаивания или промерзания мёрзлых пород, сопровождающихся изменением их электрической проводимости, предлагается импульсное электромагнитное зондирование.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта № 19-77-20130 «Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН».*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оленченко В.В., Кондратьев В.Г. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мёрзлом основании // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. – 2017. – С. 282-283.
2. Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numerica. – 2002. – vol. 11. – P. 237-339.
3. Webb J. P. Hierarchical vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – vol. 47. – P. 1244-1253.
4. Nechaev O.V., Shurina E.P., Botchev M.A. Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // Computers & Mathematics with Applications. – 2008. – vol. 55. – P. 2346-2362.
5. Freund R.W., Nachtigal N.M. Software for simplified Lanczos and QMR algorithms. // Applied Numerical Mathematics. – 1995. – vol. 19. – P. 319-341.

#### REFERENCES

1. Olenchenko, V.V., Kondratyev V.G. Geofizicheskie issledovaniya v predelakh uchastka deformatsij avtodorogi, postroennoj na myorzlom osnovanii // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya. – 2017. – 282-283.
2. Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numerica. – 2002. – vol. 11. – P. 237-339.
3. Webb J. P. Hierarchical vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – vol. 47. – P. 1244-1253.
4. Nechaev O.V. Shurina E.P. Botchev M.A. Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // Computers & Mathematics with Applications. – 2008. – vol. 55. – P. 2346-2362.
5. Freund R.W., Nachtigal N.M. Software for simplified Lanczos and QMR algorithms. // Applied Numerical Mathematics. – 1995. – vol. 19. – P. 319-341.

© О. В. Нечаев, К. Н. Даниловский, 2021