



ИМПУЛЬСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МЕЖСКВАЖИННОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

М.И. Эпов, В.Н. Глинских[✉], И.В. Михайлов, М.Н. Никитенко, О.В. Нечаев, К.Н. Даниловский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

[✉] Вячеслав Николаевич Глинских, GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6275-3612>

Аннотация. Научно обосновывается технология импульсного электромагнитного мониторинга многолетнемерзлых пород для предотвращения техногенных аварий и экологических катастроф. Развита методика быстрого одномерного и трехмерного моделирования импульсных сигналов. Создана процедура трансформации сигналов в кажущиеся электросопротивления, реализован алгоритм инверсии данных с использованием преобразования Сумуду и искусственных нейронных сетей. На основе моделирования сигналов в реалистичных геоэлектрических моделях с многолетнемерзлыми породами, показана возможность мониторинга состояния мерзлого грунта по изменению сигналов. Успешно выполнены натурные эксперименты с макетным образцом установки импульсного мониторинга.

Ключевые слова: криолитозона, электромагнитный мониторинг, импульсное зондирование, межскважинное просвечивание, геоэлектрическая модель, преобразование Сумуду, векторный метод конечных элементов, трехмерное моделирование и инверсия, искусственные нейронные сети, натурные эксперименты

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-17-00181.

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам Научно-исследовательского института измерительных приборов – Новосибирского завода имени Коминтерна (АО “НПО НИИИП-НЗиК”, г. Новосибирск) за организацию и проведение полевых экспериментов на геофизическом полигоне.

Для цитирования: Эпов М.И., Глинских В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Нечаев О.В., Даниловский К.Н. Импульсное электромагнитное межскважинное просвечивание для мониторинга состояния криолитозоны // Геофизические технологии. 2024. № 1. С. 72–82. doi:10.18303/2619-1563-2024-1-72.

TRANSIENT ELECTROMAGNETIC CROSS-BOREHOLE EXPLORATION FOR MONITORING THE STATE OF THE CRYOLITHOZONE

M.I. Epov, V.N. Glinskikh[✉], I.V. Mikhaylov, M.N. Nikitenko, O.V. Nechaev, K.N. Danilovskiy

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

[✉] Vyacheslav N. Glinskikh, GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6275-3612>

Abstract. A technology for transient electromagnetic monitoring of permafrost is being scientifically substantiated to prevent man-made accidents and environmental disasters. Methods for fast 1D and 3D modeling of pulse signals have been developed. We have created a procedure for transforming the signals into apparent electrical resistivities, and implemented a data inversion algorithm using the Sumudu transform and artificial neural networks. Based on modeling of the signals in realistic geoelectric models with permafrost, the capability of monitoring the state of frozen soil by changes in the signals has been shown. Full-scale experiments with a prototype of a transient monitoring system have been successfully completed.

Keywords: cryolithozone, electromagnetic monitoring, transient sounding, cross-borehole exploration, geoelectric model, Sumudu transform, vector finite element method, 3D modeling and inversion, artificial neural networks, full-scale experiments

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-17-00181.

Acknowledgments: The authors are grateful to staff of the Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after the Komintern for organizing and providing field experiments at the geophysical test site.

For citation: Epov M.I., Glinskikh V.N., Mikhaylov I.V., Nikitenko M.N., Nechaev O.V., Danilovskiy K.N. Transient electromagnetic cross-borehole exploration for monitoring the state of the cryolithozone // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 1. P. 72–82. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-1-72.

ВВЕДЕНИЕ

В России территория распространения многолетнемерзлых пород занимает около 65 %. Учитывая климатические изменения последних десятилетий, направленные в сторону увеличения среднегодовой температуры воздуха [Мохов, Парфенова, 2021], возникла выраженная необходимость внедрения систем мониторинга многолетней мерзлоты для предотвращения техногенных аварий и экологических катастроф [Мельников и др., 2022]. Последние нередко возникают вследствие деградации-аградации мерзлых пород в окрестности гражданских и промышленных объектов, зданий и сооружений, включая нефте- и газопроводы, площадки нефтяных и газовых месторождений, железные дороги и автомагистрали, здания на свайном фундаменте.

Для отслеживания состояния многолетнемерзлых пород применяется набор геофизических методов. Наиболее широко вовлекается их температурный мониторинг [Нерадовский, 2013]; следующими по распространенности являются методы наземной геоэлектрики, включая их комплексирование с сейсмическими исследованиями [Яковлев и др., 2019]. В то же время, недостаточно раскрыты в научно-практическом плане возможности импульсных электромагнитных зондирований [Эпов и др., 2021], позволяющих повысить результативность таких мониторинговых изысканий.

Разработка новых геофизических технологий традиционно основывается на высокоэффективных средствах математического моделирования синтетических данных зондирований. В рамках исследования рассматривается численно-аналитическое решение задачи электромагнитных зондирований в базовой модели вертикально-неоднородной среды для произвольного токового импульса в генераторе электромагнитного поля, с созданием алгоритма быстрого и точного численного моделирования. Программно реализован алгоритм трехмерного моделирования электромагнитных импульсов векторным методом конечных элементов. Оригинальное сочетание последнего и преобразования Сумуду позволяет рассматривать пространственно-неоднородные объекты с высоким контрастом геоэлектрических параметров, существенно снизив вычислительные затраты [Эпов и др., 2023]. Выбранные системы межскважинного и наземно-скважинного просвечивания [Marsala et al., 2015] позволяют при этом достичь наибольшей локализации области протаивания.

Рассмотрены результаты численного моделирования сигналов импульсного электромагнитного мониторинга многолетнемерзлых пород, в том числе под гражданскими и промышленными объектами.

Научно-исследовательским институтом измерительных приборов – Новосибирским заводом имени Коминтерна (АО “НПО НИИИП-НЗиК”, г. Новосибирск) создан прототип установки импульсного

электромагнитного межскважинного зондирования, успешно проведены первые серии полевых экспериментов на геофизических полигонах [Бухтияров, Глинских, 2022; Глинских и др., 2023].

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Система измерений для импульсного мониторинга криолитозоны представляет собой наборы источников и приемников электромагнитного поля, смонтированных на непроводящих корпусах и погруженных в две скважины (одна скважина с источниками, вторая с приемниками) (рис. 1). Скважины находятся на таком расстоянии друг от друга, чтобы чувствительность измеренных сигналов к оттаявшему объекту была наибольшей. Источниками и приемниками сигналов являются катушки индуктивности (антенны), ориентированные вдоль осей прямоугольной системы координат. В процессе мониторинга анализируются временные зависимости электродвижущей силы (ЭДС) или компонент магнитного поля.

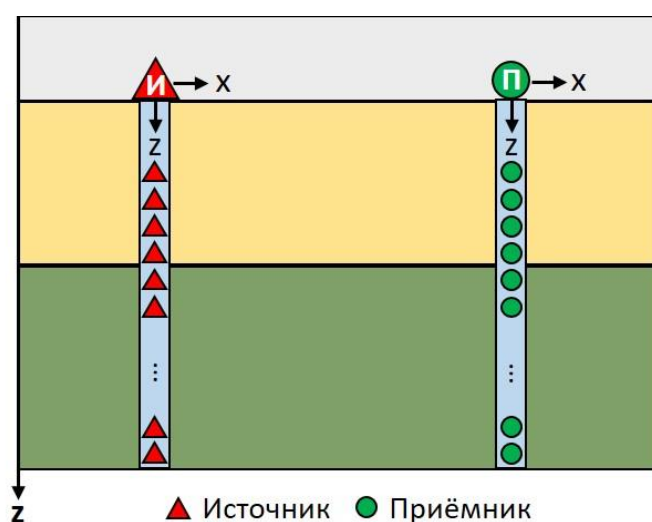


Рис. 1. Базовая горизонтально-слоистая модель среды для исследования основных зависимостей сигналов и их функций чувствительности. Верхнее полупространство – воздух.

Отличительные особенности и достоинства предлагаемой системы импульсного мониторинга следующие. Во-первых, глубинность исследования не уступает электротомографии и значительно больше, чем у георадара. Во-вторых, нет необходимости заземлять токовые электроды, что может представлять значительную сложность для электротомографического метода в окрестности промышленных объектов. В-третьих, при импульсных зондированиях измерения происходят в широком временном диапазоне, что обеспечивает получение значительного объема геофизической информации о среде. В-четвертых, предложенная система импульсного межскважинного просвечивания – стационарная, что сокращает затраты на развертывание системы наблюдений перед каждым последующим измерением. Кроме того, в импульсных электромагнитных зондированиях, по сравнению с частотными, нет необходимости компенсировать прямое поле. Упомянутые практические преимущества определяют перспективность развития импульсных зондирований для задач мониторинга многолетнемерзлых пород.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ В БАЗОВЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

В работе развита теория моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования, в базовых моделях среды (рис. 1) изучены сигналы различных зондирующих систем в зависимости от

времени, показано, каким образом на диаграммах ЭДС проявляются особенности, связанные с пространственным расположением мерзлых пород.

Для магнитного поля, представленного в виде двойного интеграла, изучено расположение особых точек и разрезов в комплексной плоскости пространственной переменной интегрирования и показано, каким образом должен выбираться путь интегрирования, обеспечивающий быстрое затухание подынтегральной функции и увеличивающий скорость численного моделирования [Никитенко и др., 2023].

Проведены численное моделирование и анализ сигналов зондирования, подтверждающие возможность мониторинга состояния многолетнемерзлых пород. Установлено, что по диаграммам ЭДС для различных компонент магнитного поля визуально прослеживается положение границы, разделяющей мерзлые и оттаявшие породы (рис. 2, слева).

Разработан способ трансформации данных импульсных электромагнитных зондирований в кажущиеся удельные электрические сопротивления (УЭС), основанный на подборе УЭС однородного проводящего полупространства [Никитенко и др., 2024]. Так, например, для УЭС оттаявшего слоя 20 Ом·м и расстояния между скважинами 20 м (рис 2, справа), на ранних временах определяется УЭС слоя, в котором находятся источник и приемник, с плавным переходом УЭС при пересечении границы к УЭС мерзлых пород.

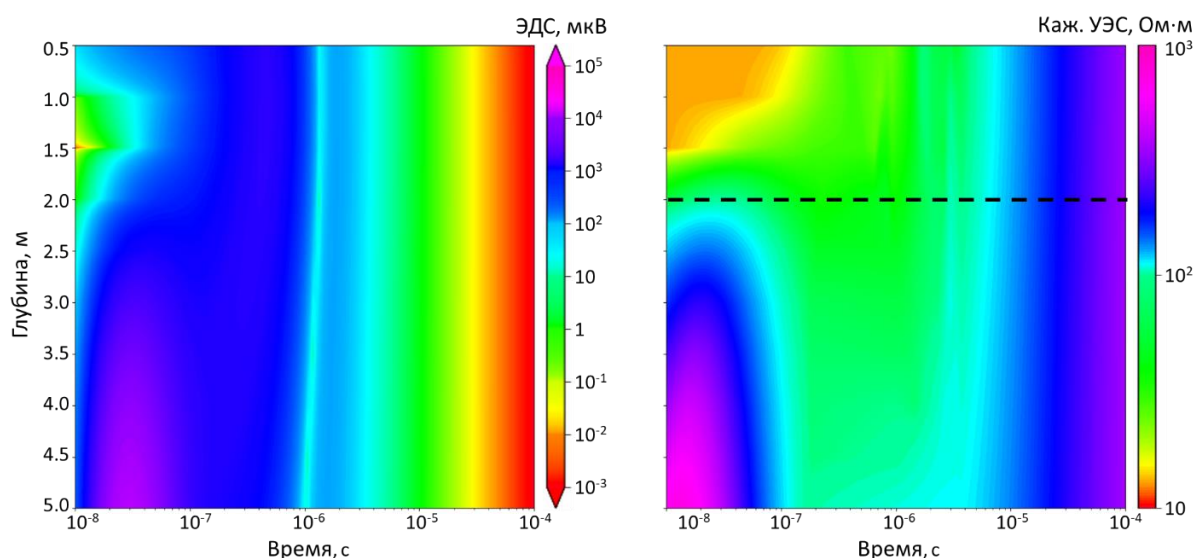


Рис. 2. Слева – модули ЭДС для вертикальной компоненты магнитного поля в зависимости от времени и глубины источника и приемника. Справа – кажущиеся УЭС. Положение границы между оттаявшими и мерзлыми породами обозначено пунктиром. Расстояние между скважинами с источниками и приемниками – 20 м, УЭС оттаявшего слоя – 20 Ом·м, УЭС мерзлых пород – 1000 Ом·м.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА В РЕАЛИСТИЧНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Разработан новый алгоритм трехмерного численного моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования, оригинально сочетающий в себе векторный метод конечных элементов и интегральное преобразование Сумуду по времени [Эпов и др., 2023]. Для обратного преобразования Сумуду применяется нейросетевой алгоритм [Эпов и др., 2024], позволяющий сократить время решения прямой задачи в среднем на 5.5 порядков [Нечаев и др., 2024].

На базе результатов математического моделирования создана обучающая выборка, в которой ко входным данным добавлен нормально распределенный шум, уровень которого пропорционален уровню самого сигнала и соответствует ожидаемой точности измерения зондирующей установкой. С применением параллельных вычислений на базе графического ускорителя обучена искусственная нейронная сеть (ИНС) с архитектурой многослойного перцептрона.

Для оценки возможностей импульсного мониторинга, рассматривается класс трехмерных моделей среды с таликом и сооружением, в окрестности которого проводится мониторинг. По результатам всестороннего анализа открытых публикаций, а также материалов полевых геофизических исследований созданы геоэлектрические модели [Glinskikh et al., 2021; Михайлов и др., 2023], включающие в себя элементы конструкций зданий и сооружений, зоны растепления и образования таликов. Учитываются параметры поляризации в мерзлых породах. На рисунке 3 приведены результаты трехмерного численного моделирования в модели «Железная дорога в Якутии». Она включает в себя многолетнемерзлые породы с УЭС 200 Ом·м, железную дорогу на земной поверхности и талик в виде прямоугольного параллелепипеда (10×10×5 м), расположенный непосредственно под железнодорожным полотном. УЭС талика 50 Ом·м.

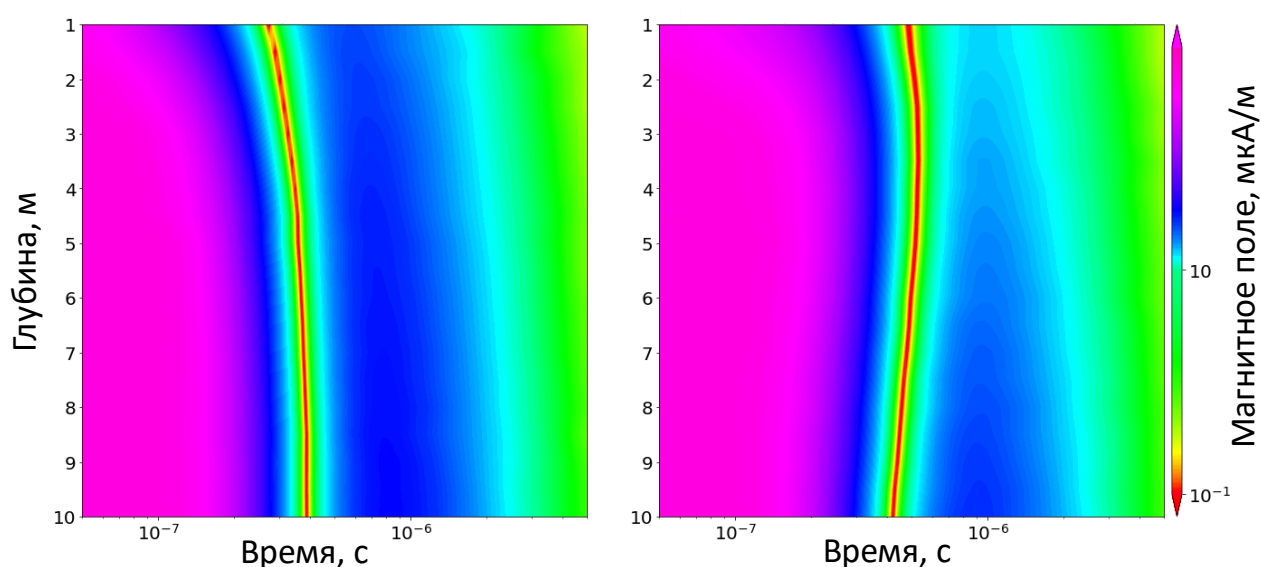


Рис. 3. Модули вертикальной компоненты магнитного поля в модели «железная дорога в Якутии». Прямоугольный импульс. Межскважинная конфигурация по центру талика. Слева – референтная модель без талика, справа – с таликом.

Отметим, что в сигналах межскважинного просвечивания наличие талика проявляется на всех рассмотренных временах и глубинах.

ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СУМУДУ

Для оперативной численной инверсии создан быстрый аналог конечно-элементного алгоритма на основе ИНС с архитектурой многослойного перцептрона. Как альтернатива минимизации функционала невязки между Сумуду-образами реально измеренных сигналов и Сумуду-образами рассчитанных

сигналов, построен оператор, непосредственно отображающий вектор измерений в вектор параметров модели. Для аппроксимации такого оператора также применены ИНС. С помощью имеющихся двух способов решения обратной задачи, построен третий, как их комбинация.

Проведено тестирование методов инверсии на модели двух полупространств, где нижнее представлено многолетнемерзлыми породами с таликом в виде параллелепипеда (рис. 4). Геометрические размеры талика восстановлены с точностью от 5 до 20 % при разных уровнях шума в псевдоэкспериментальных данных и в зависимости от удаления талика от зондирующей установки [Нечаев и др., 2024].

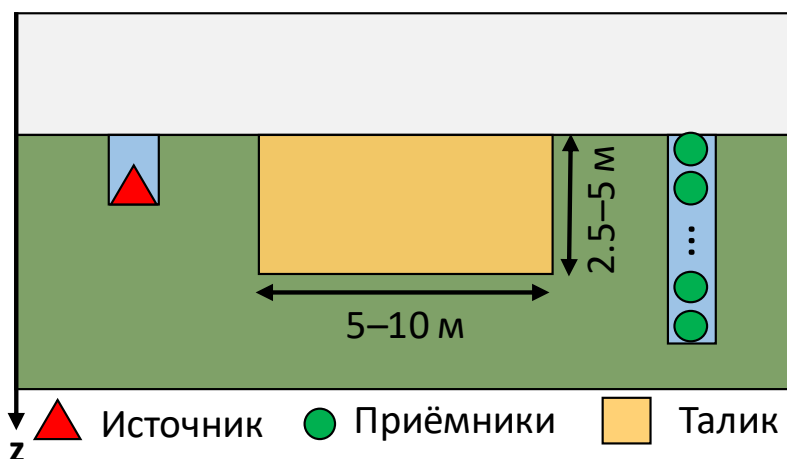


Рис. 4. Трехмерная модель среды с таликом для оценки влияния талика на сигналы импульсного зондирования. Верхнее полупространство – воздух.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАКЕТНЫМ ОБРАЗЦОМ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Система наблюдения для натуральных экспериментов представляет собой источник и приемник электромагнитного поля, расположенные в двух шурфах (скважинах) глубиной 1.5 м на расстоянии друг от друга в диапазоне 10–100 м.

Для изучения зависимости измеряемых сигналов от расстояния между скважинами проведено численное моделирование мониторинга глубины промерзания верхней части грунта. На рисунке 5 цветом представлены амплитуды ЭДС в зависимости от времени и вертикальной глубины границы между мерзлыми и оттаявшими породами (первым слоем и нижним полупространством) для разных компонент поля: ZZ, YY, XX, XZ [Никитенко и др., 2021]. Положение границы изменяется от 0 до 2 м на каждом рисунке, таким образом на изображениях представлен мониторинг промерзающего слоя для каждой компоненты поля и для разных расстояний между скважинами.

Для расстояния между источником и приемником 10 м наблюдается наибольший уровень сигнала – до 10^6 мкВ, для 100 м – $2 \cdot 10^2$ мкВ. В конкретной геолого-технической ситуации рекомендуется минимизировать указанное расстояние, чтобы повысить выраженность и контрастность сигналов, для более детальной и достоверной локализации границы оттаявшего/промерзшего слоя. Наиболее детально граница визуально прослеживается при использовании ZZ- и YY-компонент магнитного поля. С использованием XX-компоненты граница слабо выражена, а для компоненты XZ (ZX) обнаружить границу затруднительно.

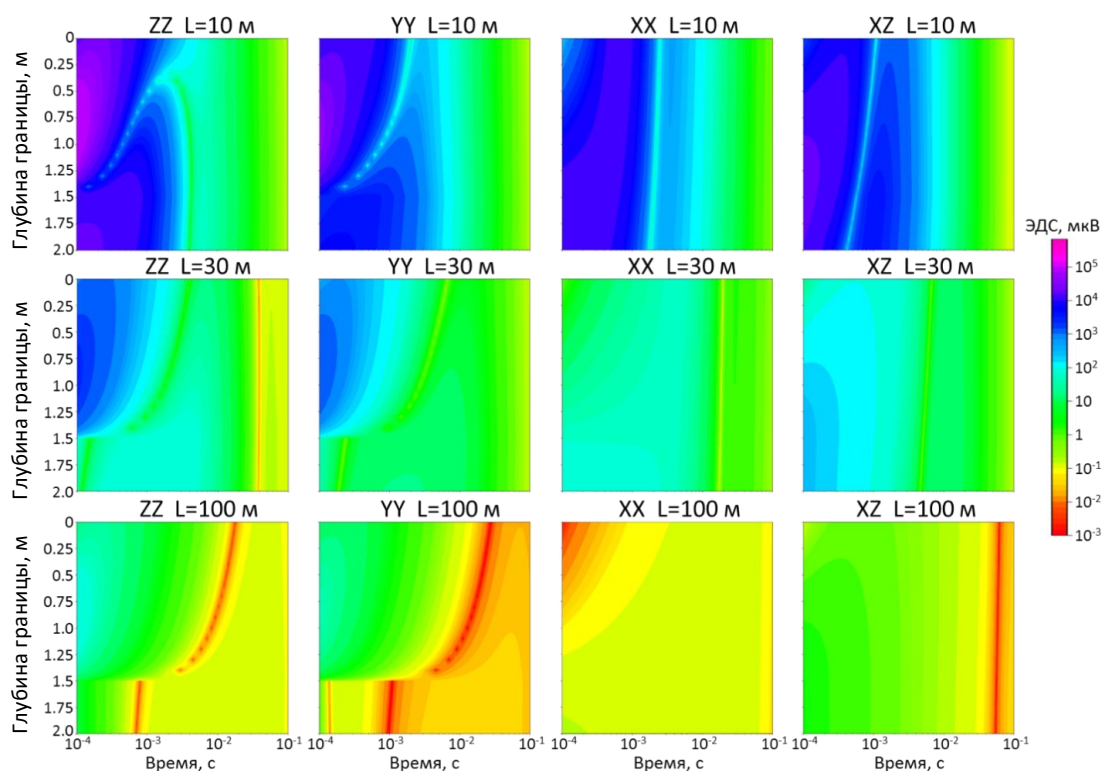


Рис. 5. Амплитуды ЭДС для ZZ, YY, XX, XZ-компонент поля в зависимости от изменения глубины замерзания границы первого слоя. Глубина расположения источника и приемника – 1.5 м.

Выполнены натурные эксперименты с использованием разрабатываемого макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования на песчано-глинистом карьере и геофизическом полигоне [Бухтияров, Глинских, 2022; Глинских и др., 2023]. Отработана методика проведения эксперимента, проведена проверка реализуемых технических решений и работоспособности разрабатываемой аппаратуры в полевых условиях в холодное время года. Выявлена пространственная зависимость излучаемого антенной электромагнитного поля. Установлено, что при расстоянии от 10 до 50 м между антеннами сигнал наиболее устойчив и приемлем для обработки, при этом указанный диапазон может быть расширен при дальнейшей инженерно-технической оптимизации аппаратуры.

Кроме того, для наиболее реалистичного описания геоэлектрических моделей и численного моделирования, отобраны образцы отложений песчано-глинистого карьера и грунта на геофизическом полигоне. Выполнено лабораторное изучение гранулометрического и литологического состава, а также электрофизических свойств в широком диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, научно обоснована технология импульсного электромагнитного мониторинга многолетнемерзлых пород для предотвращения техногенных аварий и экологических катастроф.

Развита теория моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования, на основе которой создан алгоритм быстрого и точного численного моделирования электромагнитного поля в базовых слоисто-однородных моделях сред.

Разработана и реализована вычислительная схема трехмерного численного моделирования импульсных электромагнитных зондирований с использованием векторного метода конечных элементов и преобразования Сумуду для реалистичной геоэлектрической модели криолитозоны. Разработан

вычислительный алгоритм решения прямой задачи с использованием обратного преобразования Сумуду при помощи нейросетевых технологий.

Разработан способ трансформации данных импульсных электромагнитных зондирований в кажущиеся УЭС. Созданы быстрые алгоритмы численной трехмерной инверсии данных импульсного мониторинга, в том числе с использованием нейросетевых технологий.

Проведено численное трехмерное моделирование и анализ сигналов импульсного электромагнитного зондирования в геоэлектрических моделях электропроводящих диспергирующих сред, включая реалистичные модели многолетнемерзлых пород с учетом элементов конструкций зданий и сооружений с электрофизическими параметрами, установленными по результатам полевых наблюдений и лабораторных исследований образцов грунта.

Выполнены натурные эксперименты с использованием разрабатываемого макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования на песчано-глинистом карьере и геофизическом полигоне. Отработана методика проведения эксперимента, выполнена проверка реализуемых технических решений и работоспособности разрабатываемой аппаратуры в полевых условиях. В дальнейшем будут проведены натурные эксперименты на выбранном эталонном объекте геофизического полигона с известными электрофизическими характеристиками, с оптимизацией длительности высоковольтного импульса для повышения глубинности измерений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Бухтияров Д.А., Глинских В.Н. Предварительные результаты мониторинга состояния глинистых грунтов при помощи установки импульсного электромагнитного зондирования // Геофизические технологии. 2022. № 2. С. 44–64. doi:10.18303/2619-1563-2022-2-44.

Глинских В.Н., Федосеев А.А., Никитенко М.Н., Михайлов И.В., Бухтияров Д.А. Проектирование полевых экспериментов для обоснования технологии мониторинга мерзлых пород // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII, № 4. С. 45–53. doi: 10.15372/KZ20230405.

Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Бердников Н.М., Великин С.А., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Жданеев О.В., Захаров А.А., Леопольд Я.К., Кузнецов М.Е., Малкова Г.В., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Ривкин Ф.М., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н., Устинова Е.В., Шеин А.Н. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. XXVI, № 4. С. 3–18. doi:10.15372/KZ20220401.

Михайлов И.В., Нечаев О.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Федосеев А.А. Численное моделирование сигналов импульсного электромагнитного межскважинного мониторинга многолетнемерзлых пород под основаниями промышленных объектов // Геофизические исследования. 2023. Т. 24, № 3. С. 87–102. doi:10.21455/gr2023.3-5.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Евразии по спутниковым данным в связи с полушарными и региональными температурными изменениями // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 78–85. doi:10.31857/S2686739721110104.

Нерадовский Л.Г. Опыт изучения влияния температуры на удельное электрическое сопротивление мерзлых грунтов // Геофизика. 2013. № 1. С. 67–70.

Нечаев О.В., Даниловский К.Н., Михайлов И.В. Моделирование и инверсия сигналов импульсных электромагнитных зондирований в задаче мониторинга многолетнемерзлых пород с применением методов глубокого обучения // Геология и геофизика. 2024. Т. 65, № 7. С. 1012–1022. doi:10.15372/GiG2023211.

Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Горносталев Д.И. Математическое обоснование импульсных электромагнитных зондирований для новых задач нефтепромысловой геофизики // Сибирский журнал вычислительной математики. 2021. Т. 24, № 2. С. 179–192. doi:10.15372/SJNM20210205.

Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В., Федосеев А.А. Математическое моделирование сигналов импульсного электромагнитного зондирования для мониторинга состояния многолетнемерзлых пород // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 4. С. 591–600. doi:10.15372/GiG2022132.

Никитенко М.Н., Бредихин И.А., Михайлов И.В., Федосеев А.А. Трансформация данных импульсных зондирований в кажущиеся электросопротивления для задачи мониторинга криолитозоны // Геофизические исследования. 2024. Т. 25, № 2. С. 65–78. doi:10.21455/gr2024.2-4.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Новый метод импульсного электромагнитного каротажного зондирования: картирование баженовской свиты из юрских коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2021. № 3. С. 31–39. doi:10.20403/2078-0575-2021-3-31-39.

Эпов М.И., Нечаев О.В., Глинских В.Н. Численная инверсия интегрального преобразования Сумуду при моделировании электромагнитного зондирования земных недр // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 7. С. 1033–1045. doi:10.15372/GiG2023104.

Эпов М.И., Даниловский К.Н., Нечаев О.В., Михайлов И.В. Вычислительный алгоритм обратного преобразования Сумуду на основе искусственной нейронной сети в задаче наземного электромагнитного зондирования методом переходных процессов // Геология и геофизика. 2024. Т. 65, № 5. С. 757–765. doi:10.15372/GiG2023190.

Яковлев Д.В., Каплан С.А., Клокова В.П., Соколова Е.Ю., Шпекторов А.Л., Слинчук Г.Е. Построение скоростной модели верхней части разреза в условиях распространения многолетнемерзлых пород с учетом данных наземной электроразведки // Геофизика. 2019. № 4. С. 2–8.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // Geosciences. 2021. Vol. 11 (2). Article 60. doi:10.3390/geosciences11020060.

Marsala A.F., Lyngra S., Safdar M., Zhang P., Wilt M. Crosswell electromagnetic induction between two widely spaced horizontal wells: coiled-tubing conveyed data collection and 3D inversion from a carbonate reservoir in Saudi Arabia // SEG Technical Program Expanded Abstract. New Orleans, Louisiana, USA, 2015. P. 2848–2852. doi:10.1190/segam2015-5891203.1.

REFERENCES

Bukhtiyarov D.A., Glinskikh V.N. Preliminary results of clay soils state monitoring using transient electromagnetic sounding apparatus // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2022. No. 2. P. 44–64. doi:10.18303/2619-1563-2022-2-44.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. New method of pulsed electromagnetic logging sounding: mapping the Bazhenov Formation from Jurassic reservoirs

penetrated by inclined-horizontal wells // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2021. No. 3. P. 31–39. doi:10.20403/2078-0575-2021-3-31-39.

Epov M.I., Nechaev O.V., Glinskikh V.N. Numerical inversion of the Sumudu integral transform in the simulation of electromagnetic sounding of the Earth's interior // *Russian Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64 (7). P. 860–869. doi:10.2113/RGG20234537.

Epov M.I., Danilovskiy K.N., Nechaev O.V., Mikhaylov I.V. Artificial neural network-based computational algorithm of inverse Sumudu transform applied to surface transient electromagnetic sounding method // *Russian Geology and Geophysics*. 2024. Vol. 65 (5). P. 663–669. doi:10.2113/RGG20234607.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // *Geosciences*. 2021. Vol. 11 (2). Article 60. doi:10.3390/geosciences11020060.

Glinskikh V.N., Fedoseev A.A., Nikitenko M.N., Mikhaylov I.V., Bukhtiyarov D.A. Design of field experiments for substantiation of permafrost monitoring technology // *Earth's Cryosphere*. 2023. Vol. 27 (4). P. 45–53. doi:10.15372/KZ20230405.

Marsala A.F., Lyngra S., Safdar M., Zhang P., Wilt M. Crosswell electromagnetic induction between two widely spaced horizontal wells: coiled-tubing conveyed data collection and 3D inversion from a carbonate reservoir in Saudi Arabia // *SEG Technical Program Expanded Abstract*. New Orleans, Louisiana, USA, 2015. P. 2848–2852. doi:10.1190/segam2015-5891203.1.

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Alekseev A.G., Badina S.V., Berdnikov N.M., Velikin S.A., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zheleznyak M.N., Zhdaneev O.V., Zakharov A.A., Leopold Ya.K., Kuznetsov M.E., Malkova G.V., Osokin A.B., Ostarkov N.A., Rivkin F.M., Sadurtdinov M.R., Sergeev D.O., Fedorov R.Yu., Frolov K.N., Ustinova E.V., Shein A.N. Development of geocryological monitoring of natural and technical facilities in the regions of the Russian Federation based on geotechnical monitoring systems of fuel and energy sector // *Earth's Cryosphere*. 2022. Vol. 26 (4). P. 3–18. doi:10.15372/KZ20220401.

Mikhaylov I.V., Nechaev O.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Fedoseev A.A. Numerical simulation of cross-borehole impulsive electromagnetic signals for permafrost monitoring under bases of industrial facilities // *Geophysical Research*. 2023. Vol. 24 (3). P. 87–102. doi:10.21455/gr2023.3-5.

Mokhov I.I., Parfenova M.R. Changes in the snow cover extent in Eurasia by satellite data in relationship to hemispheric and regional temperature changes // *Doklady Earth Sciences*. 2021. Vol. 501 (1). P. 963–968. doi:10.1134/S1028334X21110106.

Nechaev O.V., Danilovskiy K.N., Mikhaylov I.V. Deep-learning-based simulation and inversion of transient electromagnetic sounding signals in permafrost monitoring problem // *Russian Geology and Geophysics*. 2024. Vol. 65 (7). P. 871–879. doi:10.2113/RGG20234697.

Neradovsky L.G. Effect of temperature on specific electrical resistivity of frozen soils: a case study // *Journal of Geophysics*. 2013. No. 1. P. 67–70.

Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Gornostalev D.I. Mathematical Substantiation of Pulsed Electromagnetic Soundings for New Problems of Petroleum Geophysics // *Numerical Analysis and Applications*. 2021. Vol. 14 (2). P. 155–166. doi:10.1134/S1995423921020051.

Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mikhaylov I.V., Fedoseev A.A. Mathematical modeling of transient electromagnetic sounding signals for monitoring the state of permafrost // *Russian Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64 (4). P. 488–494. doi:10.2113/RGG20224514.

Nikitenko M.N., Bredikhin I.A., Mikhaylov I.V., Fedoseev A.A. TEM sounding data transform into apparent electrical resistivity for permafrost monitoring problem // *Geophysical Research*. 2024. Vol. 25 (2). P. 65–78. doi:10.21455/gr2024.2-4.

Yakovlev D.V., Kaplan S.A., Klokova V.P., Sokolova E.Yu., Shpektorov A.L., Slinchuk G.E. Construction of seismic velocity model using electromagnetic data on permafrost layer // *Journal of Geophysics*. 2019. No. 4. P. 2–8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЭПОВ Михаил Иванович – академик РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: теория и моделирование электромагнитных полей в многомасштабных гетерогенных геологических средах, мониторинг верхних частей земной коры в целях экологии, инженерной геологии и археологии, <https://orcid.org/0000-0002-5934-7063>.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решения прямых и обратных задач электродинамики.

МИХАЙЛОВ Игорь Владиславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование и инверсия данных электрокаротажа, нефтепромысловая геофизика, межскважинное электромагнитное просвечивание, <https://orcid.org/0000-0002-0957-8656>.

НИКИТЕНКО Марина Николаевна – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, обоснование новых методов исследования скважин, новые способы интерпретации, разработка программного обеспечения для моделирования и инверсии данных, <https://orcid.org/0000-0002-7276-9199>.

НЕЧАЕВ Олег Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование электромагнитных полей, решение обратных задач (методы глобальной оптимизации).

ДАНИЛОВСКИЙ Кирилл Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геофизические методы исследований в скважинах, каротаж в процессе бурения, обработка и интерпретация данных ГИС, моделирование и инверсия данных электрокаротажа, машинное обучение, искусственные нейронные сети, <https://orcid.org/0000-0002-9197-2061>.

*Статья поступила в редакцию 14 декабря 2023 г.,
одобрена после рецензирования 29 января 2024 г.,
принята к публикации 31 января 2024 г.*