

УДК 550.8+551.34+519.6+504.064.3

ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ КРИОЛИТОЗОНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ И ТОКОВОЙ ЛИНИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

О.В. Нечаев¹, И.В. Михайлов^{1,2,✉}, М.Н. Никитенко¹, В.Н. Глинских^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

Поступила в редакцию: 18.09.2024

Принята в печать: 02.12.2024

Опубликована онлайн: 08.12.2024

DOI: [10.15372/GiG2024176](https://doi.org/10.15372/GiG2024176)

EDN: OOSDAE

Ссылка для цитирования:

Нечаев О.В., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. (2025).

Импульсный электромагнитный мониторинг криолитозоны с применением катушек индуктивности и токовой линии: сравнительный анализ // Геология и геофизика, т. 66, № 5, с. 669–681, DOI: [10.15372/GiG2024176](https://doi.org/10.15372/GiG2024176), EDN: OOSDAE.

© О.В. Нечаев, И.В. Михайлов, М.Н. Никитенко, В.Н. Глинских, 2025

✉ E-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике все большее внимание уделяется вопросам изменения климата и деградации многолетнемерзлых пород, в частности, связанным с разработкой унифицированных подходов [Voike et al., 2022]. Следует отметить, что значительная часть территории России расположена в области наиболее интенсивного изменения климата – в арктических широтах [Мохов, Парфенова, 2021]. Потепление в Арктике происходит в несколько раз быстрее, чем скорость увеличения глобальной приповерхностной температуры, из-за стремительного сокращения площади морского льда в Северном Ледовитом океане [Парфенова и др., 2022].

В связи с таянием многолетнемерзлых пород происходит разрушение северных городов, поселков, объектов инфраструктуры и нефтегазодобывающих производств [Nefedova, Solovuev, 2020; Брушков и др., 2023]. При таянии мерзлоты в атмосферу поднимается большое количество парниковых газов [Xu et al., 2023], что усугубляет ситуацию с глобальным потеплением [Мохов, Смирнов, 2022]. Отмечается незамедлительная реакция растительности тундры на климатические изменения в Арктике [Heijmans et al., 2022]. Кроме этого, при освоении арктических территорий в мерзлые породы проникает большое количество углеводородного топлива и других токсичных

Рассмотрены результаты математического моделирования данных импульсного электромагнитного межскважинного мониторинга гражданских и промышленных объектов криолитозоны, содержащих в своей окрестности зоны растепления – талики. Приведено решение прямой задачи на основе интегрального преобразования Сумуды и векторного метода конечных элементов для двух типов скважинных источников – катушек индуктивности и менее распространенной на практике электрической токовой линии (с учетом частотной дисперсии удельной электропроводности многолетнемерзлых пород). Выполнено численное трехмерное моделирование импульсных сигналов в реалистичных геоэлектрических моделях газодобывающей скважины и жилого дома на сваях. По результатам моделирования выявлены основные особенности и различия импульсного межскважинного мониторинга при использовании катушек или линии в качестве источника.

Импульсное зондирование, электромагнитный мониторинг, криолитозона, геоэлектрическая модель, численное моделирование, векторный метод конечных элементов, преобразование Сумуды, катушка индуктивности, электрическая токовая линия, межскважинное просвечивание

элементов, нанося дополнительный вред уязвимой окружающей среде [Lurachev et al., 2022]. Однако есть и немногочисленные плюсы, связанные с глобальным потеплением: например, существенное увеличение продолжительности навигационного периода на Северном морском пути [Парфенова и др., 2022].

В конце 2023 г. была утверждена Климатическая доктрина России, одними из наиболее важных пунктов которой являются необходимость развития государственной сети мониторинга и актуальность обеспечения научной информацией для упреждающей адаптации к изменению климата и принятия своевременных решений.

Как в России, так и за рубежом наиболее распространенным подходом к мониторингу объектов криосферы Земли является термометрия – как в наземном, так и в скважинном варианте [Sysolyatin et al., 2022; Frolov et al., 2023]. Множество практически значимых результатов для мониторинга мерзлоты получают по данным георадиолокационной съемки [Westermann et al., 2010; Едемский и др., 2024], а также электроразведки на постоянном (электротомография) и переменном (частотные зондирования) токе [Ravoni et al., 2021]. Успешно применяется комплексирование данных термометрии и электротомографии [You et al., 2016; Tourei et al., 2024], включая межскважинное просвечивание [Phillips et al., 2023], с разработкой алгоритмов совместной инверсии [Tomašková,

Ingeman-Nielsen, 2024]. Аналогичным образом выполняется комплексирование георадарных измерений с температурными [Ding et al., 2023] и электро-томографическими [You et al., 2017].

Известны работы по применению сейсмических методов (активные и пассивные сейсмические измерения) [Albaric et al., 2021]. Изучаются изменения в деятельном слое многолетнемерзлых пород методом сейсмоакустической эмиссии [James et al., 2019; Köhler, Weidle, 2019], определяется глубина залегания кровли мерзлой толщи четвертичных отложений [Нерадовский, 2021]. Для повышения достоверности получаемых результатов наряду с сейсмическими вовлекаются данные электротометрии [Wu et al., 2017; Tourei et al., 2024] с оценкой их чувствительности к содержанию воды и льда [Mewes et al., 2017].

Развивается направление по установлению взаимосвязей между распространением мерзлоты и земными ландшафтами [Zotova, 2021]. Измеряются напряжения и деформации [Wen et al., 2016], определяются соотношения между геомеханическими свойствами и температурой мерзлых пород [Wang et al., 2023].

Появляется все больше работ по применению беспилотных летательных аппаратов для мониторинга криолитозоны [Ding et al., 2023], в том числе в модификации тепловой фотограмметрии [Ponti et al., 2024]. Активно используются дистанционные зондирования Земли для картирования стабильности мерзлых отложений [Zhao et al., 2023].

Помимо чисто фундаментальных исследований, изучаются свойства мерзлоты под основаниями гражданских и промышленных объектов, зданий и сооружений: опоры линий электропередач [You et al., 2016], мосты и железные дороги [You et al., 2017], автодорожные насыпи [Tian et al., 2021], зоны растепления вокруг добывающих скважин [Filimonov, Vaganova, 2021], здания на сваях [Shang et al., 2022], нефтегазовые магистральные трубопроводы [Cao et al., 2023], площадки газовых промыслов с их геокриологическим районированием [Брушков и др., 2023].

В последнее время развивается направление по электромагнитным зондированиям криолитозоны методом переходных процессов [Lorentzen et al., 2024], включая вариант межскважинного импульсного просвечивания [Glinskikh et al., 2021, 2024]. Для источника в виде катушки индуктивности разработаны алгоритмы математического моделирования импульсных сигналов на основе интегрального преобразования Сумуду [Эпов и др., 2023] и искусственных нейронных сетей [Эпов и др., 2024], а также экспресс-моделирования посредством численно-аналитического решения [Никитенко и др., 2023]. Развита алгоритмы трансформаций регистрируемых импульсов в значения кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) [Никитенко и др., 2024]. Спроектированы полевые эксперименты с прототи-

пом аппаратуры [Бухтияров, Глинских, 2022; Глинских и др., 2023], выполнено численное моделирование сигналов импульсного межскважинного мониторинга многолетнемерзлых пород под основаниями промышленных объектов [Михайлов и др., 2023]. Разработаны подходы к инверсии данных [Нечаев и др., 2024; Эпов и др., 2025].

Представленное исследование направлено на развитие теории моделирования и инверсии импульсных сигналов с рассмотрением электрической токовой линии в качестве источника. Источник такого типа к настоящему времени рассматривался лишь в отдельных теоретических работах, таких как [Каринский, 2004; Каринский, Даев, 2011; Каринский и др., 2023].

Следует ожидать более высокого уровня сигналов и более простого инженерно-технического решения по сравнению с катушкой индуктивности. Далее рассматривается межскважинный вариант импульсного электромагнитного просвечивания для двух разных типов источников: катушек индуктивности и токовой линии.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

Математическая модель процесса электромагнитного мониторинга описывается при помощи следующей краевой задачи:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{E}(t) + \frac{\partial \sigma(t) * \mathbf{E}(t)}{\partial t} + \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}(t)}{\partial t^2} = - \frac{\partial \mathbf{J}_0(t)}{\partial t},$$

$$\mathbf{E}(t) \Big|_{t=0} = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0,$$

$$\mathbf{E}(t) \times n \Big|_{\partial \Omega} = 0,$$

где $\mathbf{E}(t)$ – вектор напряженности электрического поля, \mathbf{J}_0 – вектор плотности тока в источнике, $\sigma(t)$ – диспергирующая по частоте удельная электрическая проводимость (УЭП), $*$ – операция свертки, ε_0 – диэлектрическая и μ_0 – магнитная проницаемости, $\partial \Omega$ – граница расчетной области Ω , удаленная от источника электрического поля настолько, что напряженностью электрического поля на ней можно пренебречь. Далее предполагаем, что частотная дисперсия УЭП многолетнемерзлых пород в частотной области (Фурье-образ) описывается формулой Коул-Коул [Olhoeft, 1979; Lee, 1981]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \left(1 + \frac{m(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c (1-m)} \right),$$

где σ_0 – УЭП на постоянном токе, m – поляризуемость, $c = 1$ – показатель степени, τ – время релакса-

ции. В средах, отличных от многолетнемерзлых пород, УЭП не зависит от частоты или времени.

Применим к краевой задаче интегральное преобразование Сумуду:

$$S[f(t)] = \int_0^{\infty} \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{t}{u}\right) f(t) dt = f(u).$$

Преобразование Сумуду предложено в [Watugala, 1993] как альтернатива преобразованию Лапласа. Его важное свойство – сохранение масштаба и размерности функции [Belgacem, 2006; Belgacem, Karaballi, 2006]. Сумуду-изображение действительной функции является действительной функцией. В связи с этим, в отличие от преобразования Лапласа или Фурье, не возникает необходимости переходить в комплексную плоскость. Это уменьшает ресурсоемкость вычислительного алгоритма при нахождении Сумуду-изображения. В отличие от преобразования Лапласа, для Сумуду нет явной формулы выполнения соответствующего обратного преобразования, поэтому требуется решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода [Эпов и др., 2023, 2024].

Посредством преобразования Сумуду по времени приведем математическую модель электромагнитного мониторинга к следующему виду:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{E}(u) + \left(\sigma(u) + \frac{\varepsilon_0}{u^2} \right) \mathbf{E}(u) = -\frac{1}{u} \mathbf{J}_0(u), \quad (1)$$

$$\mathbf{E}(u) \times \mathbf{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0. \quad (2)$$

Сумуду-образ формулы Коул-Коул представляется следующим образом:

$$\sigma(u) = \frac{\sigma_0}{u} \left(1 + \frac{m \left(\frac{\tau}{u} \right)^c}{1 + \left(\frac{\tau}{u} \right)^c (1-m)} \right).$$

Для решения краевой задачи в частных производных относительно Сумуду-образа вектора электрического поля применяется векторный метод конечных элементов.

ВЕКТОРНАЯ ВАРИАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА

Пусть Ω – трехмерная, возможно, неоднородная по физическим свойствам область с липшиц-непрерывной границей $\partial\Omega$. Введем функциональные пространства [Nedelec, 1980, 1986]:

$$H(\operatorname{rot}; \Omega) = \left\{ \mathbf{v} \in [L^2(\Omega)]^3 : \operatorname{rot} \mathbf{v} \in [L^2(\Omega)]^3 \right\},$$

$$H_0(\operatorname{rot}; \Omega) = \left\{ \mathbf{v} \in H(\operatorname{rot}; \Omega) : \mathbf{v} \times \mathbf{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0 \right\}$$

с нормой

$$\|\mathbf{v}\|_{\operatorname{rot}; \Omega}^2 = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{rot} \mathbf{v} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{v} \, d\Omega.$$

Скалярное произведение определяется как

$$(\mathbf{w}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega.$$

Для задачи (1)–(2) формулируется вариационная постановка [Hiptmair, 2002]: для $\mathbf{J}_0 \in L^2(\Omega)$ найти $\mathbf{E} \in H_0(\operatorname{rot}; \Omega)$ такое, что для $\forall \mathbf{v} \in H_0(\operatorname{rot}; \Omega)$:

$$\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{E}, \operatorname{rot} \mathbf{v} \right) + \left(\left(\sigma(u) + \frac{\varepsilon_0}{u^2} \right) \mathbf{E}, \mathbf{v} \right) = -\frac{1}{u} (\mathbf{J}_0, \mathbf{v}).$$

Для введенного пространства имеет место свойство вложения:

$$\operatorname{grad} \phi \in H(\operatorname{rot}; \Omega), \forall \phi \in H^1(\Omega).$$

Благодаря этому свойству, электрическое поле, удовлетворяющее векторной вариационной постановке, удовлетворяет и закону сохранения зарядов в слабом смысле [Nechaev et al., 2008]. Поэтому при решении задачи мониторинга учет типа источника – петля или токовая линия – происходит естественным образом и не требует специальных процедур. Задается только различная геометрия источника.

Традиционно базисные функции, образующие дискретное подпространство $H^h(\operatorname{rot}; \Omega)$, делятся на два типа. Первый тип базисных функций введен в [Nedelec, 1980], второй – в [Nedelec, 1986]. Согласно свойству вложения, часть пространства $H^h(\operatorname{rot}; \Omega)$ состоит из функций, являющихся градиентами скалярных функций. Если для определения базиса порядка p используют скалярные функции порядка не выше p , то результирующий базис является базисом первого типа, а если скалярные функции имеют порядок не выше $p + 1$ – это базис второго типа. Таким образом, базис второго типа можно получить из базиса первого типа, пополнив его базисными функциями, являющимися градиентами скалярных функций порядка $p + 1$.

Для построения дискретного аналога вариационной задачи элементы пространства $H(\operatorname{rot}; \Omega)$ аппроксимируются элементами дискретного подпространства $H^h(\operatorname{rot}; \Omega)$. В качестве базисных функций берутся векторные элементы второго типа третьего порядка на тетраэдральной сетке [Webb, 1999]. Для улучшения спектральных свойств матриц, получаемых после дискретизации исходной задачи, можно ортогонализировать базисные функции; полная ортогонализация привела бы к резкому увеличению количества ненулевых элементов матрицы. В работе

[Webb, 1999] предлагается проводить частичную ортогонализацию – разбивать базисные функции на множество групп, а затем выполнять ортогонализацию внутри каждой группы. Векторные базисные функции высоких порядков могут быть ассоциированы с ребром, гранью или с самим тетраэдром. Это зависит от того, как определяется степень свободы конкретной базисной функции: интегралом вдоль ребра, интегралом по грани или интегралом по всему геометрическому элементу соответственно. Поскольку одно ребро, грань или элемент для базисов высоких порядков ассоциированы с несколькими функциями, это свойство используется в качестве разделителя на группы. Определение групп ортогонализации подобным образом не приводит к увеличению количества ненулевых элементов матрицы, а также к изменению ее портрета. В [Webb, 1999] для ортогонализации применяется стандартное скалярное произведение, в представленной же работе базисные функции внутри одной группы ортогонализуются относительно билинейной формы, которая используется для построения вариационной постановки.

Введем дискретный аналог вариационной задачи: для $\mathbf{J}_0 \in L^2(\Omega)$ найти $\mathbf{E}^h \in H_0^h(\text{rot}; \Omega)$ такое, что $\forall v^h \in H_0^h(\text{rot}; \Omega)$ выполняется:

$$\left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{E}^h, \text{rot } v^h \right) + \left(\left(\sigma(u) + \frac{\varepsilon_0}{u^2} \right) \mathbf{E}^h, v^h \right) = -\frac{1}{u} (\mathbf{J}_0, v^h).$$

Раскладывая векторы напряженности электрического поля \mathbf{E}^h по базису дискретного подпространства $H_0^h(\text{rot}; \Omega)$ и выбирая в качестве функции v^h базисные функции w_m^h , выполняется переход от дискретной вариационной задачи к эквивалентной системе линейных алгебраических уравнений:

$$[A + B] \mathbf{X} = \mathbf{f},$$

где \mathbf{X} – это вектор весов в разложении по базису \mathbf{E}^h , а элементы матриц A , B и вектора правой части \mathbf{f} определяются соотношениями:

$$[A]_{i,j} = \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } w_i^h, \text{rot } w_j^h \right)_{\Omega},$$

$$[B]_{i,j} = \left(\left(\sigma(u) + \frac{\varepsilon_0}{u^2} \right) w_i^h, w_j^h \right)_{\Omega},$$

$$[f]_i = \frac{1}{u} (\mathbf{J}_0, w_i^h)_{\Omega},$$

где w_i^h – базисные функции пространства $H^h(\text{rot}; \Omega)$. Для решения результирующей системы линейных уравнений применяется модифицированный мультипликативный алгоритм [Glinskikh et al., 2021].

РЕАЛИСТИЧНЫЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

На основе анализа специализированных научных публикаций выбраны типичные геокриологические параметры многолетнемерзлых пород для ряда регионов России, в которых находятся гражданские и промышленные объекты, здания и сооружения, подвергающиеся воздействию процессов растепления–промерзания многолетнемерзлых пород.

В данном исследовании рассматриваются разрезы Ямало-Ненецкого автономного округа на п-ове Ямал и в г. Салехард [Мисюркеева и др., 2021; Буддо и др., 2022]. Отмечается сильная изменчивость разреза многолетнемерзлых пород по латерали, включая их нижнюю границу. Толщина слоя мерзлоты меняется примерно от 70 до 180 м, УЭС мерзлых пород изменяется от 1500 Ом·м в верхней части до примерно 50 Ом·м в нижней части. Толщина сезонно-талого слоя составляет около 2 м. Модель может содержать локальные проводящие талики с типичным УЭС, не превышающим нескольких десятков Ом·м.

На следующем шаге для получения детального представления об особенностях образования и строения таликовых зон в окрестности гражданских и промышленных объектов, зданий и сооружений на территории криолитозоны России проанализирован представительный ряд открытых публикаций. Среди изученных объектов: здания [Заплавнова и др., 2022; Косякина и др., 2023] и сооружения [Ермаков и др., 2021] на свайном фундаменте, нефтегазовые месторождения [Сергеев и др., 2015; Черепанов, 2018; Мариненко и др., 2019], крупные объекты топливно-энергетического комплекса [Васильев и др., 2021], разномасштабные сооружения в многолетнемерзлых породах [Hjort et al., 2022].

По результатам анализа открытых публикаций и материалов полевых электроразведочных исследований созданы реалистичные геоэлектрические модели, включающие в себя элементы конструкций зданий и сооружений, зоны растепления и образования таликов. Учитываются параметры поляризации в мерзлых породах.

Далее рассматриваются две модели:

- 1) добывающая скважина газового месторождения на п-ове Ямал;
- 2) пятиэтажный панельный жилой дом на сваях в г. Салехард.

Геоэлектрическая модель добывающей скважины газового месторождения на п-ове Ямал. Геоэлектрическая модель добывающей скважины газового месторождения на п-ове Ямал (рис. 1) включает многолетнемерзлые породы с УЭС $\rho_0 = 1500$ Ом·м (УЭП $\sigma_0 = 1/1500$ См/м) и воздухом с УЭС $= 10^6$ Ом·м (УЭП $= 1/10^6$ См/м) выше земной поверхности. До-

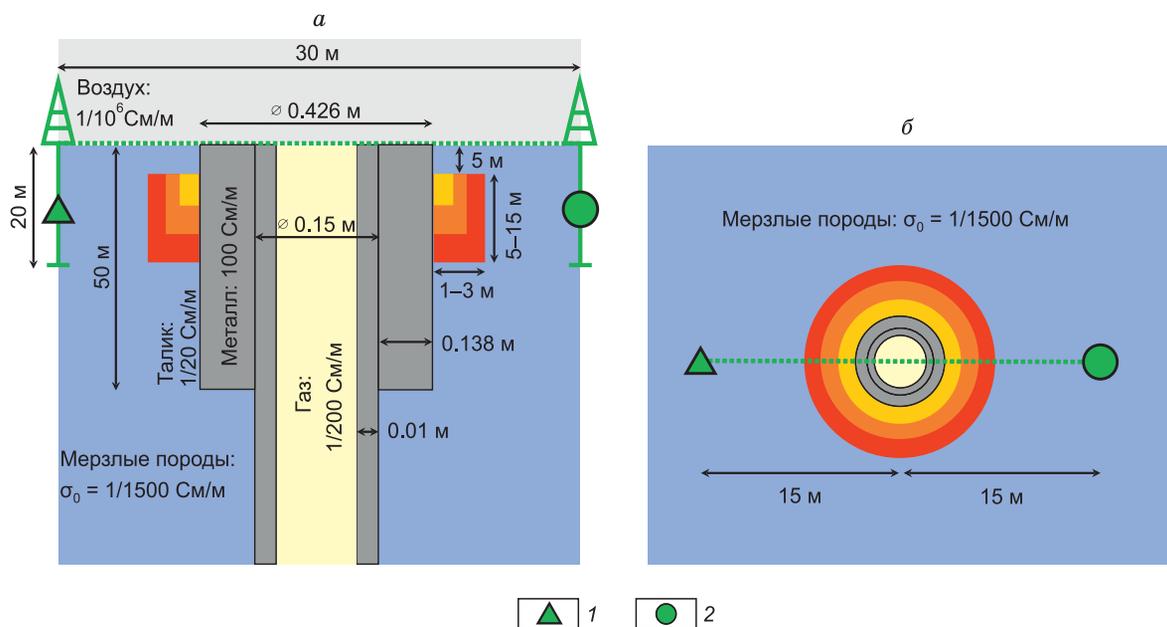


Рис. 1. Геоэлектрическая модель добывающей скважины газового месторождения на п-ове Ямал с таликом малого (1×5), среднего (2×10) и большого размера (3×15) вокруг обсадных колонн и система импульсного межскважинного просвечивания: вид в разрезе (а), вид сверху (б). 1 – источник, 2 – приемник.

бывающая скважина содержит природный газ с УЭС = 200 Ом·м (УЭП = 1/200 См/м).

Внешний диаметр первой (наружной) обсадной колонны составляет 0.426 м (для упрощения модели несколько реально используемых обсадных колонн с цементным камнем между ними объединены в одну, толщина стенки которой 0.138 м). Высота колонны от земной поверхности 50 м. Внешний диаметр второй (внутренней, эксплуатационной) обсадной колонны бесконечной протяженности составляет 0.15 м, толщина стенки 0.01 м. УЭС металла обсадных колонн – 0.01 Ом·м (УЭП = 100 См/м, выбрана компромиссной с точки зрения времени расчетов и получаемых результатов моделирования). На глубине 5 м, за счет растепления многолетнемерзлых пород при добыче теплого природного газа, вокруг верхней обсадной колонны образовался талик с УЭС = 20 Ом·м (УЭП = 1/20 См/м). Далее анализируются три случая: малый (1×5 м), средний (2×10 м) и большой талик (3×15 м). Земная поверхность показана зеленой пунктирной линией (см. рис. 1). Все объекты в модели характеризуются осевой симметрией. Для мерзлых пород п-ова Ямал характерны следующие значения параметров в формуле Коул-Коул: $m = 0.7$, $c = 1$, $\tau = 2.5 \cdot 10^{-4}$ с.

Ниже приводятся результаты численных экспериментов по расчету сигналов импульсного электромагнитного мониторинга для последовательной оценки влияния таликов:

– в референтной мерзлой среде (1/1500 См/м) с двумя обсадными колоннами (100 См/м), природным газом в скважине (1/200 См/м) и воздухом (1/10⁶ См/м) без талика;

- с добавлением малого талика (20 Ом·м, 1×5 м);
- со средним таликом (20 Ом·м, 2×10 м);
- с большим таликом (20 Ом·м, 3×15 м).

Для возбуждения сигналов отдельно применяются два типа источника – катушки индуктивности и линия с электрическим током. Тип импульса – прямоугольный «выключение».

Используется следующая измерительная конфигурация межскважинного просвечивания. Расстояние между мониторинговыми скважинами 30 м, между мониторинговой и газодобывающей скважиной 15 м, глубина мониторинговых скважин 20 м (см. рис. 1).

В случае катушек индуктивности источники и приемники расположены в разных мониторинговых скважинах на одинаковых глубинах от 1 до 20 м с шагом 0.5 м. Магнитный момент генераторной катушки равен 1 А·м²; анализируется z-компонента напряженности магнитного поля H_z в центре измерительной катушки.

В случае использования токовой линии конфигурация межскважинного просвечивания следующая: линия расположена вертикально в первой мониторинговой скважине на глубинах от 1 до 20 м. В измерительной скважине на глубинах от 1 до 20 м через каждые 0.5 м анализируется z-компонента напряженности электрического поля E_z на оси второй скважины. Сила тока в линии составляет 1 А.

В обоих случаях воображаемая линия, соединяющая мониторинговые скважины, проходит через центр газовой скважины (см. рис. 1).

Геоэлектрическая модель пятиэтажного панельного жилого дома на сваях в г. Салехард. Геоэлектрическая модель содержит пятиэтажный па-

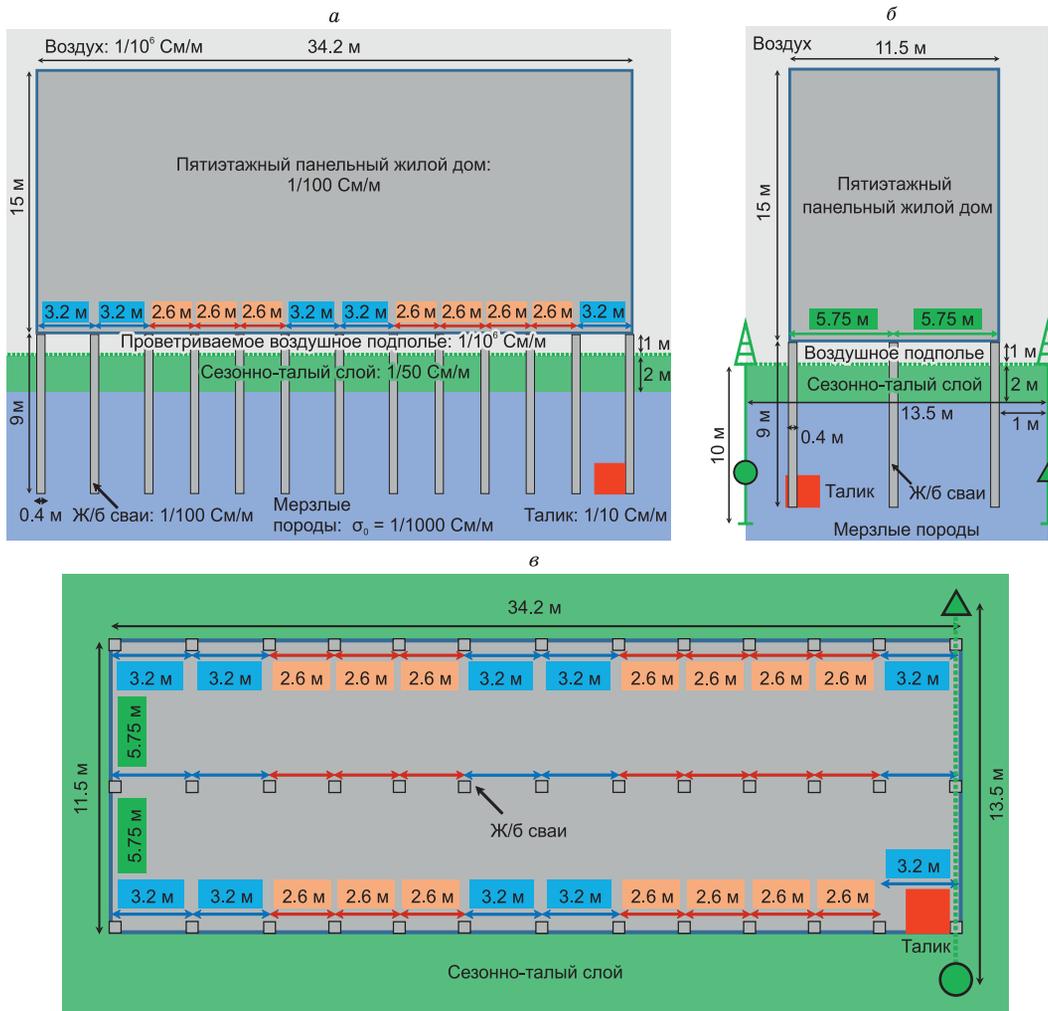


Рис. 2. Геоэлектрическая модель жилого пятиэтажного дома на железобетонных сваях в г. Салехард с сезонно-талым слоем и таликом кубической формы у боковой сваи на глубине. Виды в разрезе: сбоку вдоль длинной стороны дома (а), сбоку вдоль короткой стороны дома (б), сверху (в). Усл. обозн. см. на рис. 1.

нельный жилой дом на сваях, многолетнемерзлые породы с УЭС $\rho_0 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $\sigma_0 = 1/1000 \text{ См/м}$) и воздух с УЭС $= 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $= 1/10^6 \text{ См/м}$) выше земной поверхности (рис. 2). В модели присутствует сезонно-талый слой толщиной 2 м с УЭС $= 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $= 1/50 \text{ См/м}$). Пятиэтажный панельный дом имеет высоту 15 м, ширину 11.5 м, длину 34.2 м, УЭС $= 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $= 1/100 \text{ См/м}$). Дом стоит на 39 железобетонных сваях длиной 9 м (3 ряда по 13 свай), 1 м из которых находится над землей, создавая проветриваемое воздушное подполье высотой 1 м с УЭС $= 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $= 1/10^6 \text{ См/м}$). Расстояния между сваями вдоль длинной стороны дома – 2.6 либо 3.2 м, вдоль короткой стороны – 5.75 м. Железобетонная свая в срезе – квадрат со стороной 0.4 м, УЭС $= 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $= 1/100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Вплотную к угловой свае вровень с ее концом образовался талик кубической формы с УЭС $= 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (УЭП $= 1/10 \text{ См/м}$). Рассматриваются талики трех размеров: ма-

лый – со стороной 1 м, средний – со стороной 2 м и большой – со стороной 3 м. Для мерзлых пород г. Салехард характерны следующие значения параметров в формуле Коул-Коул: $m = 0.6$, $c = 1$, $\tau = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

Для прямоугольного импульса «выключение» моделируются импульсные электромагнитные сигналы для последовательной оценки влияния талика:

- в референтной мерзлой среде (1/1000 См/м) с сезонно-талым слоем (1/50 См/м), воздухом и проветриваемым воздушным подпольем (1/10⁶ См/м), пятиэтажным панельным домом и железобетонными сваями (1/100 См/м);
- с добавлением малого кубического талика (10 Ом·м, 1 × 1 × 1 м);
- со средним таликом (10 Ом·м, 2 × 2 × 2 м);
- с большим таликом (10 Ом·м, 3 × 3 × 3 м).

Расстояние между мониторинговыми скважинами 13.5 м, глубина скважин 10 м. Расстояние от мониторинговой скважины до края дома 1 м. Катушки ин-

дуктивности расположены на одинаковых глубинах в двух скважинах от 1 до 10 м с шагом 0.5 м. Линия с током расположена вертикально в первой мониторинговой скважине на глубинах от 1 до 10 м. Измерения во второй скважине производятся на глубинах от 1 до 10 м через каждые 0.5 м. Воображаемая линия, соединяющая мониторинговые скважины, проходит через боковую грань короткой стороны дома (см. рис. 2, в).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ И ТОКОВОЙ ЛИНИИ

Добывающая скважина газового месторождения на п-ове Ямал. Изучаются абсолютные значения вертикальной компоненты магнитного поля $|H_z|$ при импульсном электромагнитном мониторинге с катушками индуктивности (рис. 3). Ключевая сложность мониторинга в данном случае состоит в выделении таликовых зон на фоне высокопроводящего металла обсадных колонн.

Диапазон времен регистрации: от $5 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ с, основной диапазон $|H_z|$: от 10^{-7} до 10^{-6} А/м. Отмечается дифференциация сигналов в зависимости от времени (в горизонтальном направлении). На диаграмме без талика (см. рис. 3, а) наблюдается переход H_z через ноль в окрестности времени $3 \cdot 10^{-7}$ с в нижней части скважины до примерно $2 \cdot 10^{-7}$ с в ее верхней части. При появлении талика и увеличении его размеров область перехода H_z через ноль сдвигается в сторону увеличения времени – до $4 \cdot 10^{-7}$ с на забое и до $3 \cdot 10^{-7}$ с вблизи земной поверхности. При этом область максимальных значений сигналов расширяется левее перехода через ноль и сужается правее него. Характерный изгиб перехода через ноль на глубинах 0–5 м соответствует области выше талика и обусловлен влиянием воздуха. В диапазоне больших времен ($2-5 \cdot 10^{-6}$ с) изменения диаграмм мониторинга пренебрежимо малы. Кроме того, из сравнения рис. 3, а и 3, б следует вывод, что талик с размерами 1×5 м идентифицировать по мониторинговым диаграммам затруднительно.

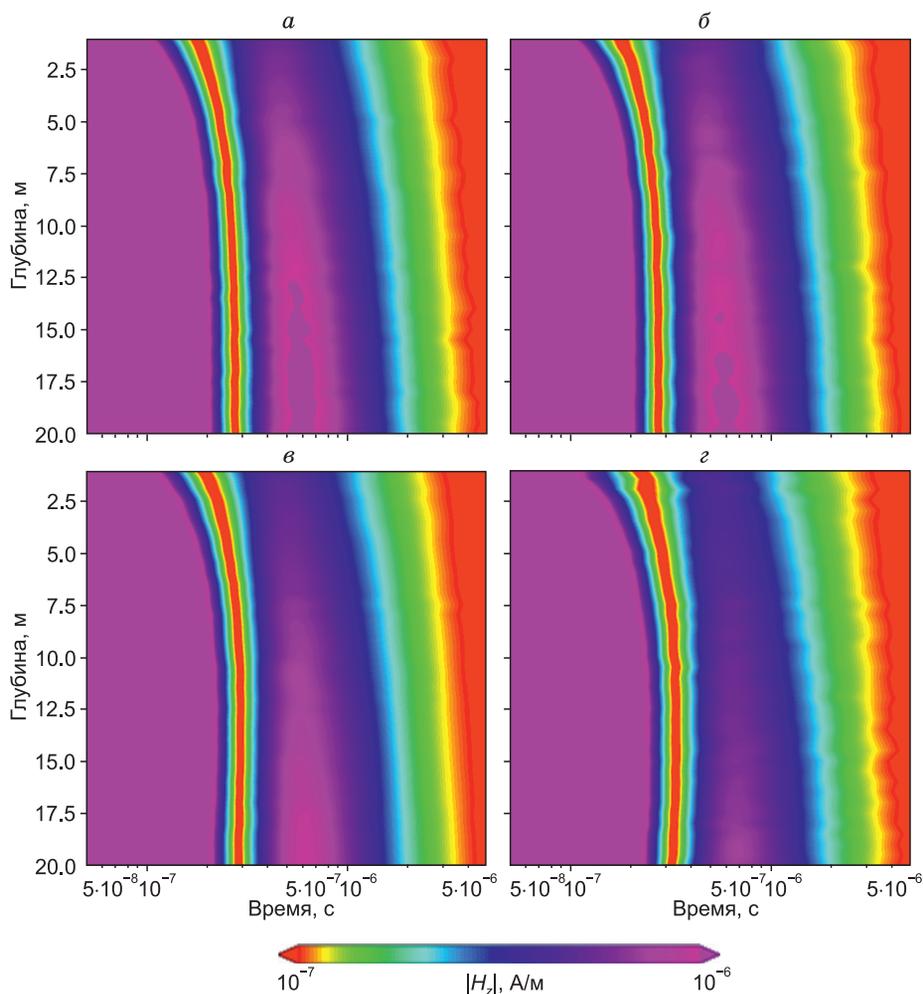


Рис. 3. Абсолютные значения вертикальной компоненты магнитного поля $|H_z|$ при импульсном электромагнитном мониторинге газодобывающей скважины на п-ове Ямал. Межскважинное просвечивание с катушками индуктивности: без талика (а), талик 1×5 м (б), талик 2×10 м (в), талик 3×15 м (г).

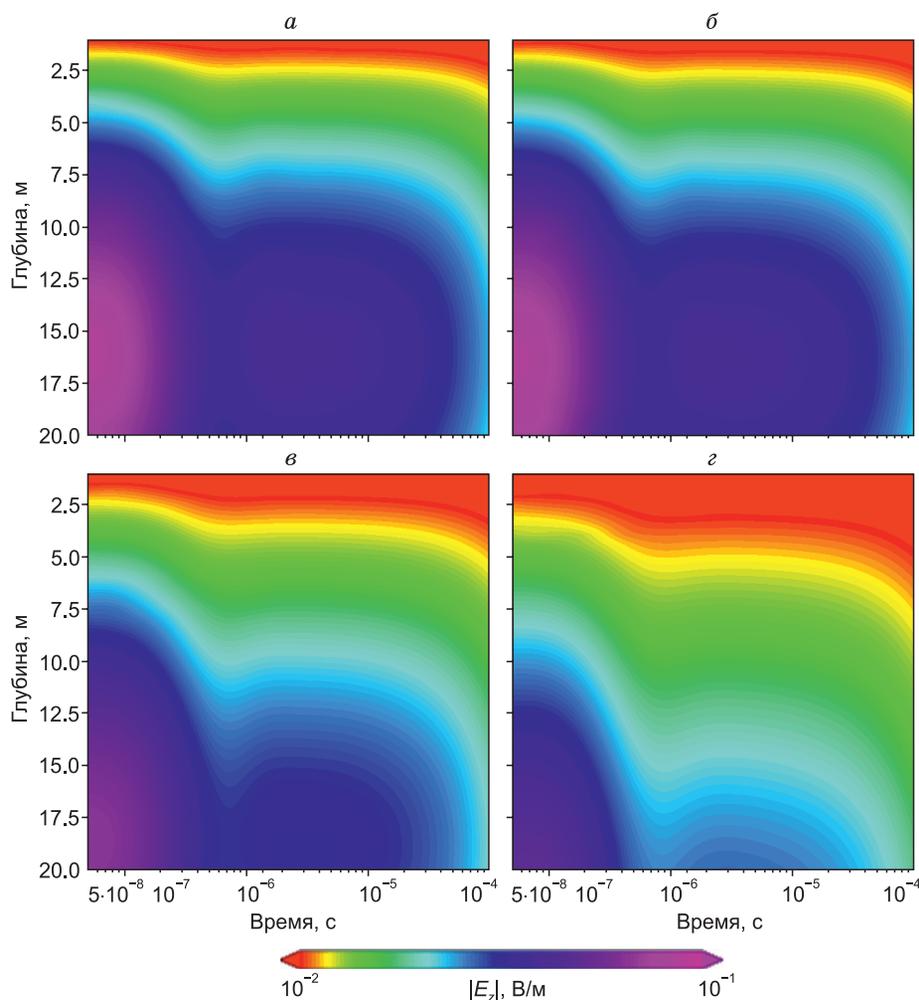


Рис. 4. Абсолютные значения вертикальной компоненты электрического поля $|E_z|$ при импульсном электромагнитном мониторинге газодобывающей скважины на п-ове Ямал. Межскважинное просвечивание с токовой линией: без талика (а), талик 1×5 м (б), талик 2×10 м (в), талик 3×15 м (г).

Общая картина импульсного мониторинга существенно меняется при использовании электрической линии в качестве источника (рис. 4). Диапазон времен регистрации более широкий: от $5 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-4} с, основной диапазон абсолютных значений вертикальной компоненты электрического поля $|E_z|$ – от 10^{-2} до 10^{-1} В/м.

Из анализа диаграмм мониторинга следует, что дифференциация сигналов становится более выраженной в вертикальном направлении, чем в горизонтальном. При отсутствии талика на ранних временах (до $4 \cdot 10^{-7}$ с) наблюдается овальная область максимальных значений сигналов. При увеличении времени регистрации выделяется область концентрической формы со значениями сигналов до $4 \cdot 10^{-2}$ В/м. При образовании талика и увеличении его размеров происходит расширение области наименьших значений сигналов (порядка 10^{-2} В/м) сверху вниз. Кроме того, на последовательных диаграммах мониторинга происходит смещение овальной и концентрической

областей в зону забоя скважины с одновременным уменьшением сигналов до $2.5 \cdot 10^{-2}$ В/м на средних и больших временах регистрации. Стоит отметить, что наименьший рассмотренный талик (1×5 м) выделяется по диаграммам для электрической линии несколько отчетливей, чем для катушек индуктивности. Для линии, в сравнении с катушками, талики большего размера проявляются более выражено, переход сигналов через ноль отсутствует. Добавим также, что сигнал электрической линии затухает со временем значительно медленнее.

Пятиэтажный панельный жилой дом на сваях в г. Салехард. Рассмотрим аналогичные диаграммы мониторинга жилого дома в г. Салехард: для катушек индуктивности (рис. 5) и электрической линии (рис. 6). Основная проблема мониторинга здесь заключается в возможности идентификации формирующегося талика на фоне плотного свайного поля.

В случае катушек индуктивности (см. рис. 5) диапазон времен регистрации $5 \cdot 10^{-8}$ – $5 \cdot 10^{-7}$ с, сигнал $|H_z|$

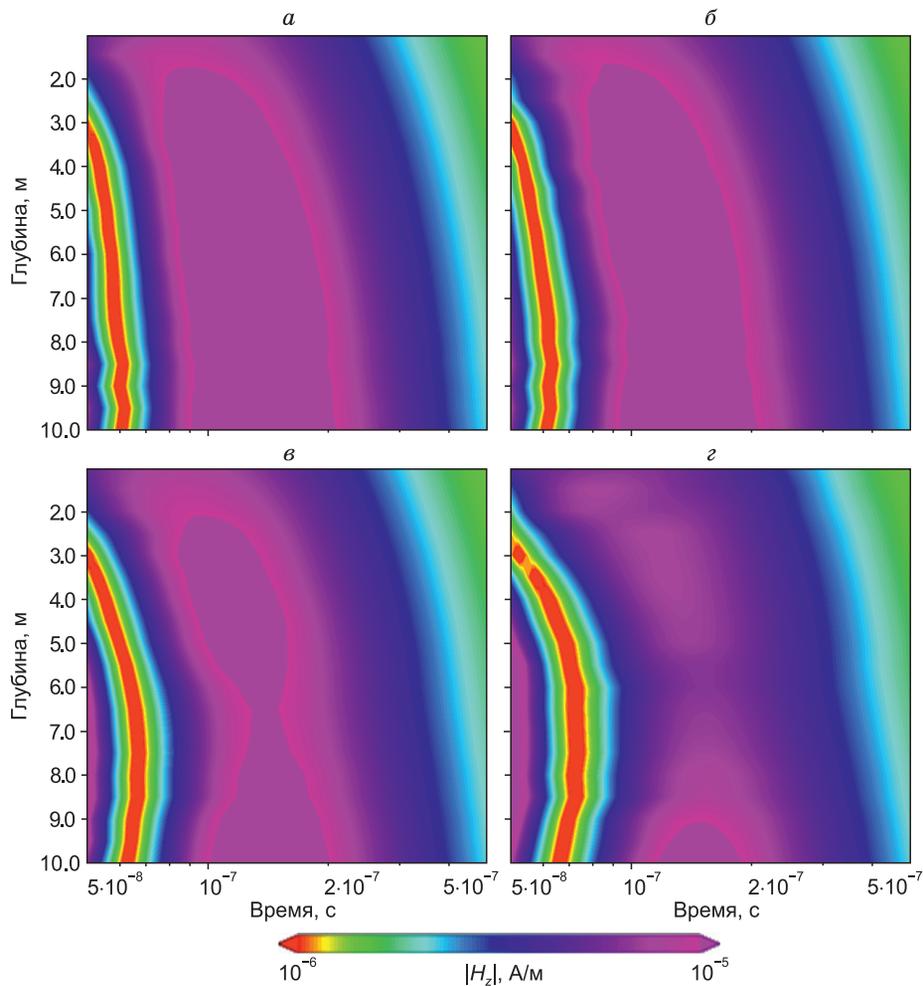


Рис. 5. Абсолютные значения вертикальной компоненты магнитного поля $|H_z|$ при импульсном электромагнитном мониторинге жилого дома в г. Салехард. Межскважинное просвечивание с катушками индуктивности: без талика (а), талик $1 \times 1 \times 1$ м (б), талик $2 \times 2 \times 2$ м (в), талик $3 \times 3 \times 3$ м (г).

изменяется от 10^{-6} до 10^{-5} А/м. Ключевые особенности диаграмм мониторинга схожи со случаем добывающей скважины: отмечается переход H_z через ноль, но в окрестности меньшего времени $6 \cdot 10^{-8}$ с. При образовании талика и увеличении его размеров переход смещается ко времени $8 \cdot 10^{-8}$ с. В целом с ростом талика область наибольших значений $|H_z|$ левее перехода H_z через ноль расширяется, а справа от него сужается, особенно в области средних глубин и времен. Кроме того, при временах регистрации порядка $4\text{--}5 \cdot 10^{-7}$ с анализируемый сигнал несколько падает.

При использовании электрической линии в качестве источника (см. рис. 6) диапазон времен регистрации $5 \cdot 10^{-8}\text{--}10^{-4}$ с, а сигнал $|E_z|$ изменяется от 10^{-2} до 10^{-1} В/м. Основные тренды изменения $|E_z|$ происходят в вертикальном направлении, а не в горизонтальном, как в предыдущем случае. Характерная особенность всех диаграмм мониторинга заключается в линзовидной форме аномалии в диапазоне всех времен на глубинах примерно от 2 до 8 м, что вызва-

но существенной трехмерной неоднородностью геоэлектрической модели. При отсутствии талика наибольшие значения сигналов порядка 10^{-1} В/м отмечаются на глубинах 5–8 м. С ростом размеров талика эта область становится все менее выраженной. При этом в нижней части скважины (8–10 м) сигнал заметно уменьшается до $3\text{--}4 \cdot 10^{-2}$ В/м, а в верхней части скважины происходит еще большее снижение сигнала до 10^{-2} В/м. В отличие от радиальной изменчивости при катушках индуктивности, расширение талика в целом характеризуется вертикальной дифференциацией.

Итак, из анализа результатов трехмерного численного моделирования следует, во-первых, что образование таликовых зон проявляется на диаграммах импульсных сигналов существенно по-разному при использовании в качестве источника катушек индуктивности или электрической линии. Во-вторых, для линии сигналы затухают во времени на несколько порядков медленней, что может являться ключевым

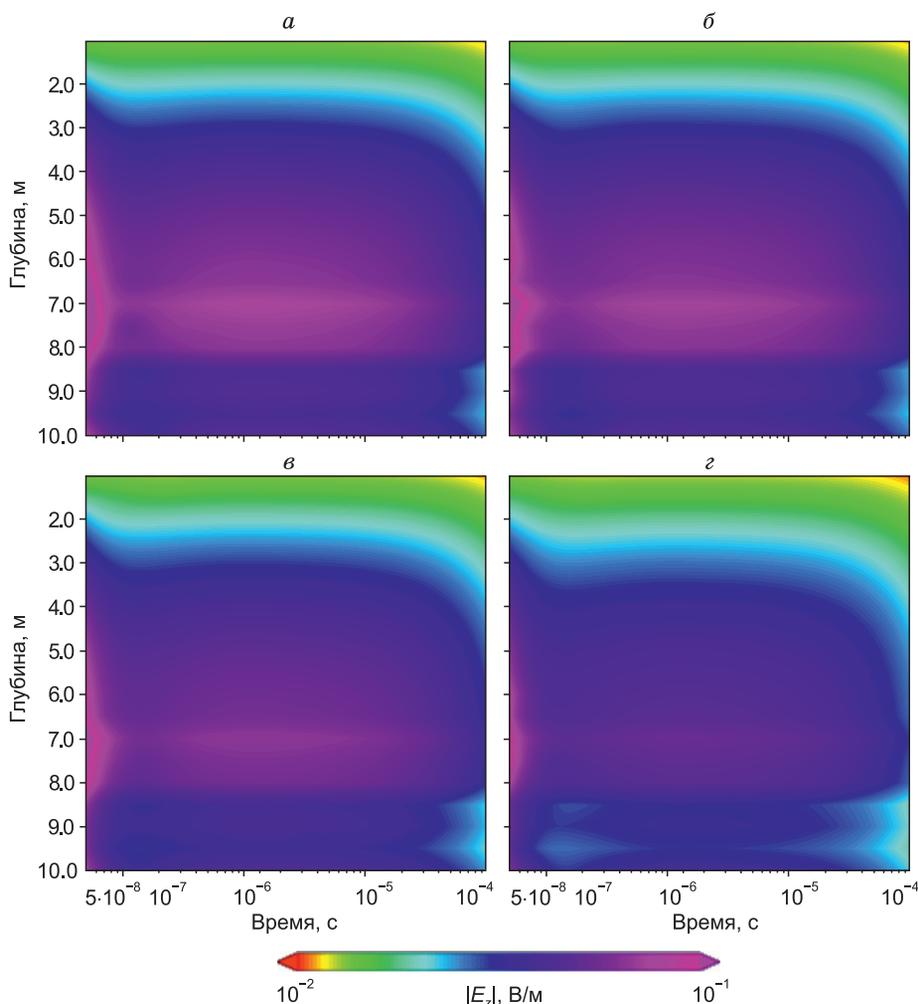


Рис. 6. Абсолютные значения вертикальной компоненты электрического поля $|E_z|$ при импульсном электромагнитном мониторинге жилого дома в г. Салехард. Межскважинное просвечивание с токовой линией: без талика (а), талик $1 \times 1 \times 1$ м (б), талик $2 \times 2 \times 2$ м (в), талик $3 \times 3 \times 3$ м (з).

фактором при значительных расстояниях между мониторинговыми скважинами. В-третьих, несмотря на то, что токовая линия является интегральным источником по сравнению с набором катушек индуктивности, с помощью этого источника достигается не меньшая разрешающая способность по отношению к целевым объектам импульсного электромагнитного мониторинга криолитозоны в варианте межскважинного просвечивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках исследования разработаны программно-алгоритмические средства численного моделирования сигналов импульсных межскважинных зондирований при возбуждении электромагнитного поля катушками индуктивности либо токовой линией в скважине. В основе алгоритмов лежит сочетание интегрального преобразования Сумуду с векторным методом конечных элементов. По

результатам анализа как открытых публикаций, так и материалов полевых электроразведочных исследований созданы две реалистичные геоэлектрические модели криолитозоны России: добывающей скважины газового месторождения на п-ове Ямал и пятиэтажного панельного жилого дома на сваях в г. Салехард. Существенно трехмерно-неоднородные модели детально описывают как элементы конструкций, так и зоны растепления и образования таликов, при этом учитываются параметры поляризации в многолетнемерзлых породах. Выполнено численное моделирование сигналов межскважинного импульсного электромагнитного мониторинга в указанных геоэлектрических моделях. Показано, что диаграммы мониторинга таликовых зон с помощью катушек индуктивности и электрической линии существенно различаются. Так, для катушек характерен переход сигнала через ноль, а основные изменения происходят вдоль шкалы времен регистрации. Для линии отсутствует переход через ноль, а наибольшая динамика

ка прослеживается вдоль шкалы глубин по скважине. Показано, что импульсный электромагнитный межскважинный мониторинг гражданских и промышленных объектов криолитозоны возможен как с применением катушек индуктивности в обеих скважинах, так и при использовании в качестве источника электрической линии: появление и изменение размеров талика визуально прослеживается по разновременным диаграммам сигналов, построенным в зависимости от времени и глубины регистрации. Применение токовой линии может оказаться более предпочтительным при выделении таликов малых размеров на фоне высокопроводящих объектов мониторинга (например, обсадная колонна газодобывающей скважины). Сигнал от линии затухает со временем значительно медленнее, что дает преимущество при электромагнитном мониторинге с сильно разнесенными скважинами. Кроме того, ожидается более простая в инженерном плане и экономически выгодная реализация токовой линии в скважине по сравнению с большим набором катушек индуктивности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 «Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны» (<https://rscf.ru/project/22-17-00181/>).

ЛИТЕРАТУРА

- Брушков А.В., Алексеев А.Г., Багина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданев О.В., Железняк М.Н., Мельников В.П., Окунев С.Н., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н. (2023). Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института, т. 263, с. 742–756.
- Буддо И.В., Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Семинский И.К., Шенин А.Н. (2022). Текущее состояние, проблемы и перспективы в комплексировании геофизических методов при изучении криолитозоны Арктики // Материалы научной конференции «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». Иркутск, Институт земной коры СО РАН, вып. 20, с. 33–35.
- Бухтияров Д.А., Глинских В.Н. (2022). Предварительные результаты мониторинга состояния глинистых грунтов при помощи установки импульсного электромагнитного зондирования // Геофизические технологии, № 2, с. 44–64, DOI: 10.18303/2619-1563-2022-2-44.
- Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А. (2021). Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне // Записки Горного института, т. 249, с. 377–385, DOI: 10.31897/PMI.2021.3.6.
- Глинских В.Н., Федосеев А.А., Никитенко М.Н., Михайлов И.В., Бухтияров Д.А. (2023). Проектирование полевых экспериментов для обоснования технологии мониторинга мерзлых пород // Криосфера Земли, т. 27, № 4, с. 45–53, DOI: 10.15372/KZ20230405.
- Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В. (2024). Гео-радарное обследование арктических полигонально-жилых структур // Геология и геофизика, т. 65, № 6, с. 886–898, DOI: 10.15372/GIG2023186, EDN: MSWCUU.
- Ермаков А.А., Захарова А.С., Бегинина В.А., Чухлатый М.С. (2021). Особенности строительства свайных фундаментов в зонах вечной мерзлоты на объектах нефтегазовой отрасли // Инженерный вестник Дона, № 5, с. 1–12.
- Заплавнова А.А., Оленченко В.В., Дергач П.А., Федин К.В., Осипова П.С., Шенин А.Н. (2022). Апробация комплекса сейсмических и электрических методов геофизики для решения задач мониторинга состояния мерзлых пород в основании здания на свайном фундаменте // Геофизические технологии, № 3, с. 46–63, DOI: 10.18303/2619-1563-2022-3-49.
- Каринский А.Д. (2004). Поле кабеля и линии АВ переменного тока в анизотропной среде // Геофизика, № 1, с. 40–48.
- Каринский А.Д., Даев Д.С. (2011). Результаты 2D-моделирования для зондов электромагнитного и электрического каротажа при различной толщине прослоев в макроанизотропных пластах // Геофизика, № 3, с. 32–42.
- Каринский А.Д., Иванов А.А., Зуденков И.А., Матюшенко А.А., Новиков П.В. (2023). Обоснование новой методики при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, № 4, с. 27–36, DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-4-27-36.
- Косякина Е.Э., Лисейкин А.В., Громыко П.В., Селезнев В.С. (2023). Контроль технического состояния зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах по изменению частот собственных колебаний (по данным сейсмического мониторинга здания свайного типа – Дворца культуры г. Норильска) // Российский сейсмологический журнал, т. 5, № 3, с. 45–58, DOI: 10.35540/2686-7907.2023.3.03.
- Мариненко А.В., Эпов М.И., Оленченко В.В. (2019). Решение прямых задач электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы на примере кустовой площадки месторождения // Сибирский журнал индустриальной математики, т. 22, № 1, с. 63–73, DOI: 10.33048/sibjim.2019.22.107.
- Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Агафонов Ю.А. (2021). Внутреннее строение многолетнемерзлых пород севера Западной Сибири по данным современных геофизических исследований // Материалы международной конференции «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике». Салехард, Наука, с. 296–299, DOI: 10.7868/9785604610848080.
- Михайлов И.В., Нечаев О.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Федосеев А.А. (2023). Численное моделирование сигналов импульсного электромагнитного межскважинного мониторинга многолетнемерзлых пород под основаниями промышленных объектов // Геофизические исследования, т. 24, № 3, с. 87–102, DOI: 10.21455/gr2023.3-5.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. (2021). Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // Докл. РАН. Науки о Земле, т. 496, № 1, с. 71–77, DOI: 10.31857/S2686739721010151.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А. (2022). Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Докл. РАН. Науки о Земле, т. 503, № 1, с. 53–59, DOI: 10.31857/S2686739722030082.
- Нерадовский Л.Г. (2021). Изучение четвертичных отложений и коренных пород в криолитозоне центральной Якутии по ре-

- троспективным материалам методом преломленных волн // Геофизика, № 3, с. 44–55.
- Нечаев О.В., Даниловский К.Н., Михайлов И.В. (2024).** Моделирование и инверсия сигналов импульсных электромагнитных зондирований в задаче мониторинга многолетнемерзлых пород с применением методов глубокого обучения // Геология и геофизика, т. 65, № 7, с. 1012–1022, DOI: [10.15372/GiG2023211](https://doi.org/10.15372/GiG2023211), EDN: URNUUF.
- Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В., Федосеев А.А. (2023).** Математическое моделирование сигналов импульсного электромагнитного зондирования для мониторинга состояния многолетнемерзлых пород // Геология и геофизика, т. 64, № 4, с. 591–600, DOI: [10.15372/GiG2022132](https://doi.org/10.15372/GiG2022132), EDN: ZZWUBJ.
- Никитенко М.Н., Бредихин И.А., Михайлов И.В., Федосеев А.А. (2024).** Трансформация данных импульсных зондирований в кажущиеся электросопротивления для задачи мониторинга криолитозоны // Геофизические исследования, т. 25, № 2, с. 65–78, DOI: [10.21455/gr2024.2-4](https://doi.org/10.21455/gr2024.2-4).
- Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. (2022).** Изменения периода навигации в арктических морях на Северном морском пути в 21 веке: байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // Докл. РАН. Науки о Земле, т. 507, № 1, с. 118–125, DOI: [10.31857/S2686739722601454](https://doi.org/10.31857/S2686739722601454).
- Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В., Бобачев А.А., Сафиуллин Р.И. (2015).** Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) // Инженерные изыскания, № 10–11, с. 46–53.
- Черепанов А.О. (2018).** Комплекс радиоволновых исследований для решения геокриологических задач в районах развития ММП // Геофизика, № 1, с. 52–59.
- Эпов М.И., Нечаев О.В., Глинских В.Н. (2023).** Численная инверсия интегрального преобразования Сумуду при моделировании электромагнитного зондирования земных недр // Геология и геофизика, т. 64, № 7, с. 1033–1045, DOI: [10.15372/GiG2023104](https://doi.org/10.15372/GiG2023104), EDN: BOLZUV.
- Эпов М.И., Даниловский К.Н., Нечаев О.В., Михайлов И.В. (2024).** Вычислительный алгоритм обратного преобразования Сумуду на основе искусственной нейронной сети в задаче наземного электромагнитного зондирования методом переходных процессов // Геология и геофизика, т. 65, № 5, с. 757–765, DOI: [10.15372/GiG2023190](https://doi.org/10.15372/GiG2023190), EDN: TLDXQB.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Нечаев О.В., Даниловский К.Н., Михайлов И.В. (2025).** Импульсный электромагнитный мониторинг криолитозоны: математическое моделирование // Геология и геофизика, т. 66, № 1, с. 124–130, DOI: [10.15372/GiG2024143](https://doi.org/10.15372/GiG2024143), EDN: UJOY GK.
- Albaric J., Kühn D., Ohrnberger M., Langet N., Harris D., Polom U., Lecomte I., Hillers G. (2021).** Seismic monitoring of permafrost in Svalbard, Arctic Norway // Seismol. Res. Lett., v. 92 (5), p. 2891–2904, DOI: [10.1785/0220200470](https://doi.org/10.1785/0220200470).
- Belgacem F.M. (2006).** Introducing and analysing deeper Sumudu properties // Nonlinear Stud., v. 13 (1), p. 23–41.
- Belgacem F.M., Karaballi A.A. (2006).** Sumudu transform fundamental properties investigations and applications // J. Appl. Math. Stochastic Anal., v. 2006, p. 1–23, DOI: [10.1155/JAMSA/2006/91083](https://doi.org/10.1155/JAMSA/2006/91083).
- Boike J., Chadburn S., Martin J., Zwieback S., Althuizen I.H.J., Anselm N., Cai L., Coulombe S., Lee H., Liljedahl A.K., Schneebeli M., Sjöberg Y., Smith N., Smith S.L., Streletskiy D.A., Stuenzi S.M., Westermann S., Wilcox E.J. (2022).** Standardized monitoring of permafrost thaw: a user-friendly, multiparameter protocol // Arct. Sci., v. 8 (1), p. 153–182, DOI: [10.1139/as-2021-0007](https://doi.org/10.1139/as-2021-0007).
- Cao Y., Li G., Ma W., Chen D., Shang Y., Wu G., Gao K., Ying S. (2023).** Permafrost degradation induced by warm-oil pipelines and analytical results of thermosyphon-based thawing mitigation // Energy, v. 269 (2), 126836, p. 1–15, DOI: [10.1016/j.energy.2023.126836](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126836).
- Ding Z., Niu F., Mu Y., He P., Gao Z., Fan X. (2023).** Primarily investigation with multiple methods on permafrost state around a rapid change lake in the interior of the Tibet Plateau // Environ. Res. Lett., v. 18 (11), p. 1–11, DOI: [10.1088/1748-9326/ad0063](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0063).
- Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. (2021).** Thawing of permafrost during the operation of wells of North-Mukerkamyl oil and gas field // J. Sib. Fed. Univ. – Math. Phys., v. 14 (6), p. 795–804, DOI: [10.17516/1997-1397-2021-14-6-795-804](https://doi.org/10.17516/1997-1397-2021-14-6-795-804).
- Frolov D., Koshurnikov A., Gagarin V., Nabiev I., Dodoboev E. (2023).** Methodology of ground temperature monitoring system development // E3S Web Conf., v. 420, p. 1–5, DOI: [10.1051/e3sconf/202342003008](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342003008).
- Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. (2021).** Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // Geosciences, v. 11 (2), 60, p. 1–15, DOI: [10.3390/geosciences11020060](https://doi.org/10.3390/geosciences11020060).
- Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Nikitenko M., Danilovskiy K. (2024).** Transient electromagnetic monitoring of permafrost: mathematical modeling based on Sumudu integral transform and artificial neural networks // Mathematics, v. 12 (4), 585, p. 1–24, DOI: [10.3390/math12040585](https://doi.org/10.3390/math12040585).
- Heijmans M.M.P.D., Magnússon R.Í., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgensen M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J. (2022).** Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nat. Rev. Earth Environ., v. 3 (1), p. 68–84, DOI: [10.1038/s43017-021-00233-0](https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0).
- Hiptmair R. (2002).** Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numer., v. 11, p. 237–339, DOI: [10.1017/S0962492902000041](https://doi.org/10.1017/S0962492902000041).
- Hjort J., Streletskiy D., Doré G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. (2022).** Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nat. Rev. Earth Environ., v. 3 (1), p. 24–38, DOI: [10.1038/s43017-021-00247-8](https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8).
- James S.R., Knox H.A., Abbott R.E., Panning M.P., Screaton E.J. (2019).** Insights into permafrost and seasonal active-layer dynamics from ambient seismic noise monitoring // J. Geophys. Res. F: Earth Surf., v. 124 (7), p. 1798–1816, DOI: [10.1029/2019JF005051](https://doi.org/10.1029/2019JF005051).
- Köhler A., Weidle C. (2019).** Potentials and pitfalls of permafrost active layer monitoring using the HVSR method: a case study in Svalbard // Earth Surf. Dyn., v. 7 (1), p. 1–16, DOI: [10.5194/esurf-7-1-2019](https://doi.org/10.5194/esurf-7-1-2019).
- Lee T. (1981).** Transient electromagnetic response of a polarizable ground // Geophysics, v. 46 (7), p. 1037–1041, DOI: [10.1190/1.1441241](https://doi.org/10.1190/1.1441241).
- Lorentzen T.H., Kass M.A., Scheer J., Tomašková S., Christiansen A.V., Maurya P.K., Ingeman-Nielsen T. (2024).** Exploring the challenges of interpreting near-surface towed TEM data on saline permafrost // Geophysics, v. 89 (3), p. E113–E128, DOI: [10.1190/geo2023-0221.1](https://doi.org/10.1190/geo2023-0221.1).
- Lupachev A., Danilov P., Lodygin E., Tikhonravova Ya., Butakov V., Usacheva A., Ksenofontova M. (2022).** Approaches for the complex assessment of polychemical pollution of permafrost-affected soils and the upper layer of permafrost // Environ. Monit. Assess., v. 194 (9), 594, p. 1–21, DOI: [10.1007/s10661-022-10270-x](https://doi.org/10.1007/s10661-022-10270-x).
- Mewes B., Hilbich C., Delaloye R., Hauck C. (2017).** Resolution capacity of geophysical monitoring regarding permafrost degradation induced by hydrological processes // Cryosphere, v. 11 (6), p. 2957–2974, DOI: [10.5194/tc-11-2957-2017](https://doi.org/10.5194/tc-11-2957-2017).

- Nechaev O.V., Shurina E.P., Botchev M.A. (2008).** Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // *Comput. Math. Appl.*, v. 55 (10), p. 2346–2362, DOI: [10.1016/j.camwa.2007.11.003](https://doi.org/10.1016/j.camwa.2007.11.003).
- Nedelec J.C. (1980).** Mixed finite elements in R^3 // *Numer. Math.*, v. 35 (3), p. 315–341, DOI: [10.1007/BF01396415](https://doi.org/10.1007/BF01396415).
- Nédélec J.C. (1986).** A new family of mixed finite elements in R^3 // *Numer. Math.*, v. 50 (1), p. 57–81, DOI: [10.1007/BF01389668](https://doi.org/10.1007/BF01389668).
- Nefedova L.V., Solovyev D.A. (2020).** Assessment of the global climate change impact on Fuel and Energy Complex infrastructure and adaptation opportunities in the Russian Arctic // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, v. 606 (1), 012040, p. 1–11, DOI: [10.1088/1755-1315/606/1/012040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012040).
- Olhoeft G.R. (1979).** Electrical properties, in: Hunt, G.R., Johnson, G.R., Olhoeft, G.R., Watson, D.E. (Eds.), *Initial Report of the Petrophysics Laboratory: Geological Survey Circular 789*. United States Department of the Interior, v. 74, p. 1–26, DOI: [10.3133/cir789](https://doi.org/10.3133/cir789).
- Pavoni M., Sirch F., Boaga J. (2021).** Electrical and electromagnetic geophysical prospecting for the monitoring of rock glaciers in the Dolomites, Northeast Italy // *Sensors*, v. 21 (4), 1294, p. 1–17, DOI: [10.3390/s21041294](https://doi.org/10.3390/s21041294).
- Phillips M., Buchli C., Weber S., Boaga J., Pavoni M., Bast A. (2023).** Brief communication: Combining borehole temperature, borehole piezometer and cross-borehole electrical resistivity tomography measurements to investigate seasonal changes in ice-rich mountain permafrost // *Cryosphere*, v. 17 (2), p. 753–760, DOI: [10.5194/tc-17-753-2023](https://doi.org/10.5194/tc-17-753-2023).
- Ponti S., Girola I., Guglielmin M. (2024).** Thermal photogrammetry on a permafrost rock wall for the active layer monitoring // *Sci. Total Environ.*, v. 917, 170391, p. 1–15, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.170391](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170391).
- Shang Y., Niu F., Fang J., Wu L. (2022).** Experimental study on thermal regime and frost jacking of pile foundation during operation period in permafrost regions // *Front. Earth Sci.*, v. 10, p. 1–11, DOI: [10.3389/feart.2022.821305](https://doi.org/10.3389/feart.2022.821305).
- Sysolyatin R., Serikov S., Zheleznyak M., Shatz M., Tikhonravova Ya. (2022).** Temperature regime of mountain permafrost in the Russian Altai Mountains // *J. Mt. Sci.*, v. 19 (1), p. 33–45, DOI: [10.1007/s11629-021-6902-4](https://doi.org/10.1007/s11629-021-6902-4).
- Tian Y., Yang Z., Liu Y., Cai X., Shen Y. (2021).** Long-term thermal stability and settlement of heat pipe-protected highway embankment in warm permafrost regions // *Eng. Geol.*, v. 292 (3), 106269, p. 1–15, DOI: [10.1016/j.enggeo.2021.106269](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106269).
- Tomaškovičová S., Ingeman-Nielsen T. (2024).** Coupled thermogeophysical inversion for permafrost monitoring // *Cryosphere*, v. 18 (1), p. 321–340, DOI: [10.5194/tc-18-321-2024](https://doi.org/10.5194/tc-18-321-2024).
- Tourei A., Ji X., dos Santos G.R., Czarny R., Rybakov S., Wang Z., Hallsley M., Martin E.R., Xiao M., Zhu T., Nicolsky D., Jensen A. (2024).** Mapping permafrost variability and degradation using seismic surface waves, electrical resistivity, and temperature sensing: A case study in Arctic Alaska // *J. Geophys. Res. F: Earth Surf.*, v. 129 (3), p. 1–22, DOI: [10.1029/2023JF007352](https://doi.org/10.1029/2023JF007352).
- Wang F., Wu G., Chen D., Li G., Qian Y., Xi F., Wang L. (2023).** Mechanical response of a buried pipeline to permafrost thawing based on sequential coupling method // *Atmosphere*, v. 14 (4), 620, p. 1–13, DOI: [10.3390/atmos14040620](https://doi.org/10.3390/atmos14040620).
- Watugala G.K. (1993).** Sumudu transform: a new integral transform to solve differential equations and control engineering problems // *Int. J. Math. Educ. Sci. Technol.*, v. 24 (1), p. 35–43, DOI: [10.1080/0020739930240105](https://doi.org/10.1080/0020739930240105).
- Webb J.P. (1999).** Hierarchical vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, v. 47 (8), p. 1244–1253, DOI: [10.1109/8.791939](https://doi.org/10.1109/8.791939).
- Wen Z., Yu Q., Zhang M., Xue K., Chen L., Li D. (2016).** Stress and deformation characteristics of transmission tower foundations in permafrost regions along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line // *Cold Reg. Sci. Technol.*, v. 121, p. 214–225, DOI: [10.1016/j.coldregions.2015.06.007](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.06.007).
- Westermann S., Wollschläger U., Boike J. (2010).** Monitoring of active layer dynamics at a permafrost site on Svalbard using multi-channel ground-penetrating radar // *Cryosphere*, v. 4 (4), p. 475–487, DOI: [10.5194/tc-4-475-2010](https://doi.org/10.5194/tc-4-475-2010).
- Wu Y., Nakagawa S., Kneafsey T.J., Dafflon B., Hubbard S. (2017).** Electrical and seismic response of saline permafrost soil during freeze - Thaw transition // *J. Appl. Geophys.*, v. 146 (1), p. 16–26, DOI: [10.1016/j.jappgeo.2017.08.008](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.08.008).
- Xu Z., Chen Y., Shan W., Deng C., Ma M., Wu Y., Mao Y., Ding X., Ji J. (2023).** Study of methane emission and geological sources in Northeast China permafrost area related to engineering construction and climate disturbance based on ground monitoring and AIRS // *Atmosphere*, v. 14 (8), 1298, p. 1–20, DOI: [10.3390/atmos14081298](https://doi.org/10.3390/atmos14081298).
- You Y., Yang M., Yu Q., Wang X., Li X., Yue Y. (2016).** Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line // *Cold Reg. Sci. Technol.*, v. 121, p. 250–257, DOI: [10.1016/j.coldregions.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.05.005).
- You Y., Wang J., Wu Q., Yu Q., Pan X., Wang X., Guo L. (2017).** Causes of pile foundation failure in permafrost regions: The case study of a dry bridge of the Qinghai–Tibet Railway // *Eng. Geol.*, v. 230, p. 95–103, DOI: [10.1016/j.enggeo.2017.10.004](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.004).
- Zhao F., Gong W., Ren T., Chen J., Tang H., Li T. (2023).** Permafrost stability mapping on the Tibetan Plateau by integrating time-series InSAR and the random forest method // *Remote Sens.*, v. 15 (9), 2294, p. 1–28, DOI: [10.3390/rs15092294](https://doi.org/10.3390/rs15092294).
- Zotova L.I. (2021).** Landscape indication of permafrost conditions for geoecological assessment and mapping at various scales // *Geogr. Environ. Sustainability*, v. 14 (4), p. 33–40, DOI: [10.24057/2071-9388-2021-039](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-039).