

УДК 550.837

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-4-107-113

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ТАЛЫХ И МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПО ПЛОЩАДНЫМ ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Владимир Сергеевич Степченков¹✉, Дмитрий Константинович Большаков²,
Игорь Николаевич Модин³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; v-stepchenkov@list.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; dkbolshakov@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; imodin@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования пространственного распределения талых и мерзлых грунтов в зоне многолетней мерзлоты с использованием трехмерной электротомографии. Цель работы заключалась в определении границ между мерзлыми и талыми породами, а также в установлении уровня грунтовых вод. В исследовании использованы данные электротомографии, бурения и скважинной термометрии. На основе полученных данных построена объемная геоэлектрическая модель, которая хорошо согласуется с имеющейся геологической информацией. Выявлено, что аномальные зоны с повышенной температурой соответствуют областям пониженного удельного сопротивления, что указывает на наличие таликов. Построены карты уровня грунтовых вод и кровли многолетнемерзлых пород, отражающие особенности геологического строения изучаемого участка. Результаты подтверждают эффективность трехмерной модели для интерпретации данных в условиях сложного геологического строения и могут быть применены для решения аналогичных задач.

Ключевые слова: электротомография, многолетняя мерзлота, талики, 3D-инверсия, уровень грунтовых вод, термометрия

Для цитирования: Степченков В.С., Большаков Д.К., Модин И.Н. Пространственное положение талых и мерзлых грунтов по площадным данным электротомографии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 4. С. 107–113.

SPATIAL DISTRIBUTION OF THAWED AND FROZEN GROUND BASED ON AREAL ELECTRICAL TOMOGRAPHY DATA

Vladimir S. Stepchenov¹✉, Dmitriy K. Bolshakov²,
Igor N. Modin³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; v-stepchenkov@list.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dkbolshakov@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; imodin@yandex.ru

Abstract: The article presents the results of a study on the spatial distribution of thawed and frozen grounds in the permafrost zone using three-dimensional electrical resistivity tomography. The aim of the research was to determine the boundaries between frozen and thawed rocks, as well as to identify the groundwater level. The study utilized data from electrical resistivity tomography, drilling, and borehole thermometry. Based on the obtained data, a three-dimensional geoelectrical model was constructed, which aligns well with the available geological information. It was found that anomalous zones with elevated temperatures correlate with areas of reduced electrical resistivity, indicating the presence of taliks. Maps of the groundwater level and the top of permafrost were created, reflecting the geological features of the studied area. The results confirm the effectiveness of the three-dimensional model for data interpretation in complex geological conditions and can be applied to solve similar problems.

Keywords: electrical resistivity, permafrost, taliks, 3D inversion, groundwater level, thermometry

For citation: Stepchenov V.S., Bolshakov D.K., Modin I.N. Spatial distribution of thawed and frozen ground based on areal electrical tomography data. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 4: 107–113. (In Russ.).

Введение. Исследование приповерхностной части геологической среды в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) с применением электротомографии (ЭТ) является одной из наиболее сложных задач инженерной геологии. Основные трудности связаны с высоким удельным электрическим сопротивлением (УЭС) мерзлых грунтов, что осложняет проведение полевых работ. В частности,

возникают проблемы с размещением многоэлектродных установок и обеспечением удовлетворительных переходных сопротивлений заземлений при подаче низкочастотного тока.

Интерпретация данных ЭТ также сопряжена с неоднозначностью из-за множества факторов, влияющих на геоэлектрическую модель. Значения УЭС и границы неоднородностей в районах распро-

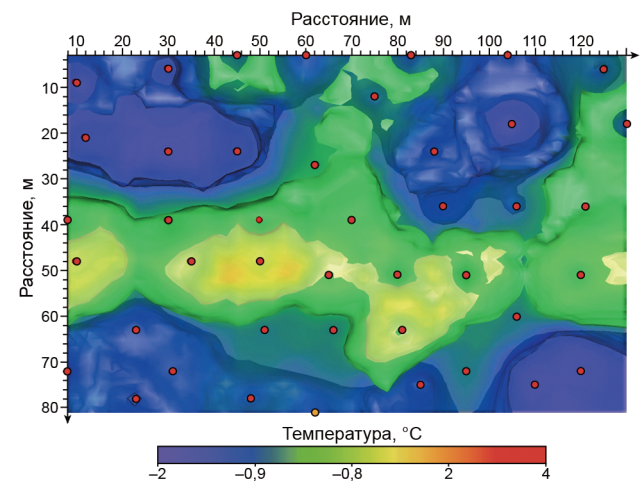


Рис. 1. Карта значений температуры грунтов на глубине 10 м (точки — положения скважин)

странения ММП определяются литологией грунтов, степенью их увлажнения, температурным режимом и условиями залегания. Ключевая особенность — комплексное воздействие этих факторов, которое варьируется в зависимости от сезонных изменений, рельефа, глубины промерзания или оттаивания, количества осадков и мощности снежного покрова.

Дополнительные сложности обусловлены изменчивостью свойств дневной поверхности и приповерхностных грунтов, вызванной как естественными процессами, так и антропогенной деятельностью [Брушков и др., 2024]. Эти изменения формируют многочисленные приповерхностные неоднородности УЭС, что затрудняет сбор данных, их обработку и построение достоверной геоэлектрической модели [Павлова, Шевнин, 2013]. Таким образом, мерзлые породы, изучаемые методом ЭТ, представляют собой геологическую среду со сложной и динамичной структурой, параметры которой могут существенно меняться даже в пределах небольших участков.

В подобных условиях метод ЭТ традиционно применяется для изучения геологии, картирования уровня грунтовых вод, границ талых и мерзлых пород. В литературе описаны успешные примеры использования профильной технологии с получением двумерных (2D) данных и их последующей инверсией [Бобачев и др., 2006].

Настоящее исследование направлено на построение 3D-моделей по площадным (псевдотрехмерным) данным ЭТ с целью выявления пространственных границ между талыми и мерзлыми породами и сравнения результатов с результатами двумерной инверсии.

Особенности участка исследований. Исследуемый участок расположен в г. Якутске на правом берегу р. Лена и представляет собой строительную площадку размером 90 × 140 м. Ключевая особенность территории — наличие 43 скважин (глубиной 25 м), в которых проведены температурные измерения с шагом 1 м. Работы методом ЭТ, при данной плотности скважин, были призваны детализировать

уже известное к началу работ геологическое строение, выявить и обозначить уровень грунтовых вод (УГВ) и границу кровли многолетней мерзлоты.

Геологическое строение и термодинамические условия. Участок характеризуется высокой плотностью скважин (рис. 1), в которых были сделаны температурные измерения. Данные температуры были объединены в трехмерных куб, для выявления аномальных зон. Анализ получившегося температурного куба выявил в центральной части участка линейную аномалию субширотного простирания шириной 20–25 м, где температура достигает +1,5 °C на фоне средних значений около –1 °C (рис. 1). Эта аномалия прослеживается от поверхности до глубины 17 м. Сопоставление с космоснимками показало, что ее границы частично совпадают с контурами ранее существовавших сооружений.

По данным бурения, разрез сложен преимущественно песчаными отложениями, переходящими с глубиной из талого состояния в мерзлое. Пески залегают в трех фазах: **талые ненасыщенные** (0–3–5 м) — выше уровня грунтовых вод, **талые насыщенные** (3–5–10–15 м) — ниже уровня грунтовых вод, **мерзлые** (глубже 10–15 м).

Согласно классификации [Романовский и др., 2001], мерзлые грунты разделяются на: «вялую мерзлоту» (температура близка к 0 °C), пластично-мерзлые (высокотемпературные) и твердомерзлые (температура ниже –1...–1,5 °C). «Вялая мерзлота» по физико-механическим свойствам (например, по скоростям сейсмических волн) близка к талым породам [Романовский и др., 2003]. Для мерзлых грунтов установлена корреляция между УЭС и скоростями упругих волн, что отражает связь электрических и механических свойств. Переход песков из талого в мерзлое состояние происходит при температурах на 0,3–0,5 °C ниже нуля (с запаздыванием фазового перехода). В нашем разрезе преобладают температуры –0,5...–1 °C, что затрудняет идентификацию границ по температурным данным. Корреляция УЭС и температуры на глубине 7,5 м позволила выделить три диапазона: ниже 300 Ом·м — талые грунты, 300–3000 Ом·м — переходная зона (0...–1 °C), 1000–7000 Ом·м — мерзлые грунты (–1...–2 °C).

Особенности электротомографических исследований. При планировании сети ЭТ данные по скважинам не были доступны, что привело к неоптимальному выбору направления профилей (субширотному, вдоль длинной стороны участка). Это направление совпало с простиранием выявленной тепловой аномалии, снизив чувствительность метода к ее детектированию. Дополнительные сложности вызваны наличием строительного мусора, металлоконструкций и бетонных плит (особенно в южной части), что ограничивало размещение электродов, а также необходимостью отклонения от прямолинейной схемы установки в некоторых точках.

Обработка и результаты инверсии данных электротомографии. Основной объем двумерных

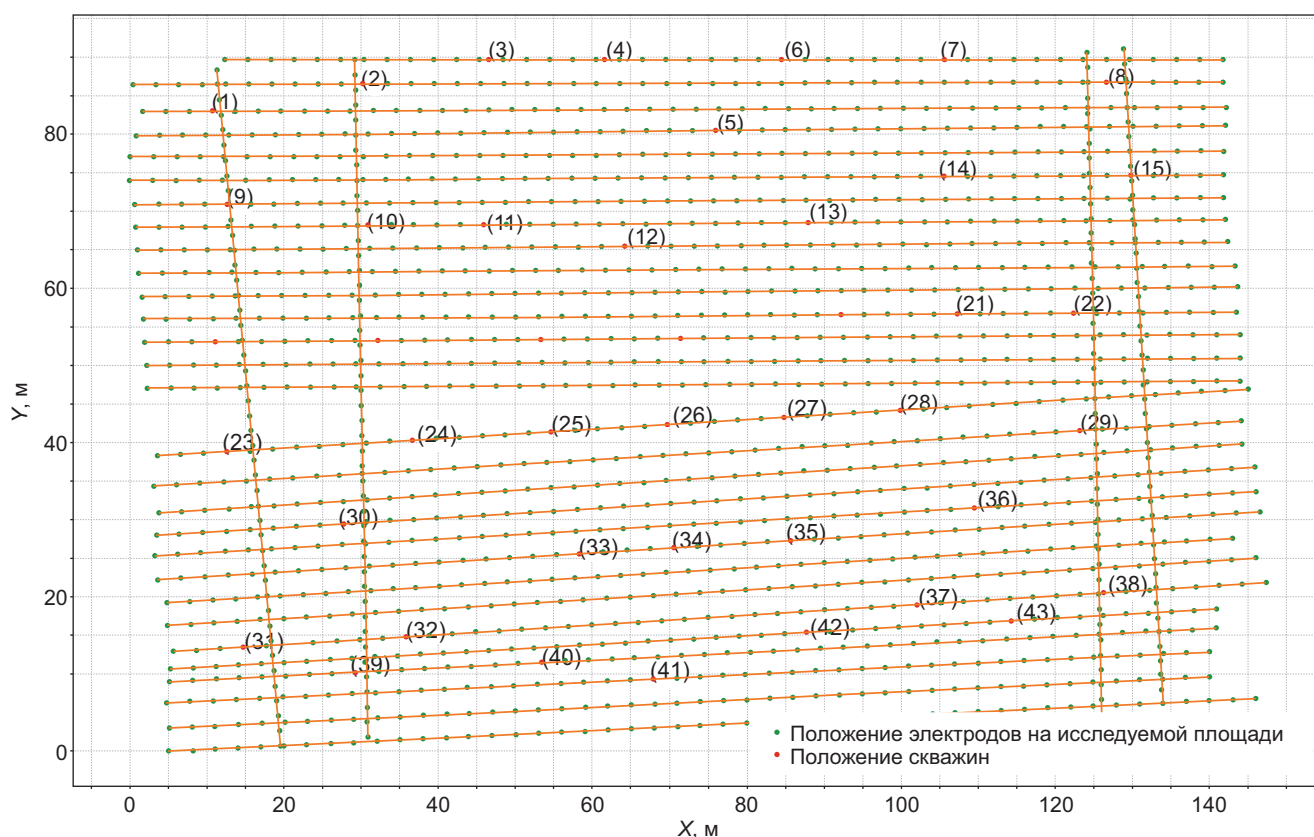


Рис. 2. Схема расположения профилей (цифры в скобках — номера скважин)

данных электротомографии получен на участке исследований вдоль 29 профилей запад-восточного направления с межпрофильным расстоянием около 3 м (рис. 2). Дополнительные измерения выполнены на четырех профилях север-южного направления. Работы проводились с использованием электро-разведочной станции «Омега-48». В работе применялась с трехэлектродная установка (Pole-Dipole) с шагом между электродами 3 м. Первичная обработка данных выполнена с применением программы *x2ipr* и собственных алгоритмов, реализованных на языке Python. Двумерная инверсия данных проведена в программе *Res2Dinv* для каждого профиля отдельно.

Наименьшие значения невязки (менее 4,5 %) характерны для профилей № 9–14. Профили № 1–8 и № 20–26 демонстрируют приемлемые значения невязки (5–8 %). Наибольшие расхождения (более 10 %) отмечены для профилей центральной (№ 16–18) и южной (№ 27–29) частей участка, с максимумом 19 % на профиле № 17, пересекающем зону растепления грунтов (рис. 3).

Трехмерная инверсия выполнена в программе *ZondRes3D* по совокупности всех двумерных данных. Невязка для объемной модели составила 2,4 %, что значительно ниже аналогичных показателей для двумерных моделей (рис. 3). Наиболее существенные различия между 2D и 3D моделями наблюдаются в значениях удельного электрического сопротивления высокоомных зон, достигающие 20-кратного рас-

хождения для глубинных интервалов, что наглядно продемонстрировано на разрезах УЭС сделанных вдоль (рис. 4) и поперек (рис. 5) исследуемого участка.

Сравнение результатов двумерной и трехмерной инверсий выявило наличие в 3D-модели низкоомной аномалии (100–200 Ом·м) в центральной части участка на глубинах 5–25 м, отсутствующей в двумерных решениях (рис. 6). Эти различия обусловлены влиянием объемных неоднородностей геологической среды, эффекты от которых не учитываются при двумерной инверсии.

Полученная объемная геоэлектрическая модель демонстрирует удовлетворительную корреляцию с данными скважинной термометрии. Установлены следующие зависимости между температурой грунтов и их удельным сопротивлением на глубине 7,5 м: менее 300 Ом·м — положительные температуры, 300–3000 Ом·м — температуры от 0 до -1°C , 1000–7000 Ом·м — температуры от -1 до -2°C .

По результатам интерпретации выделены три зоны участка: северная зона с глубиной залегания кровли мерзлых пород 1–5 м; центральная зона с максимальной мощностью таликов (6,5–12 м); южная зона с положением кровли мерзлых отложений 4,0–6,5 м.

Построена карта уровня грунтовых вод (рис. 7), показывающая общий наклон водоносного горизонта к реке Лена с перенаправлением основного потока в юго-западном направлении из-за наличия мерзлого блока в юго-восточной части участка.

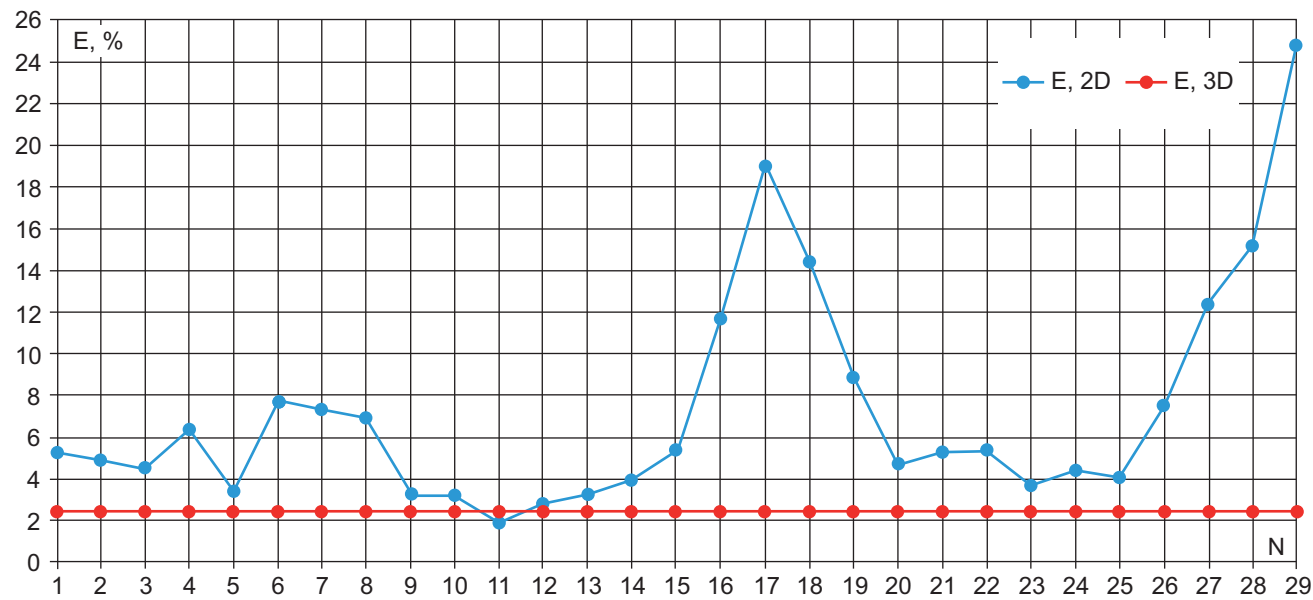


Рис. 3. Графики значений невязки (E , %) для результатов 2D (синий цвет) и 3D (красный цвет) инверсии двумерных данных электро- томографии (N — номера профилей)

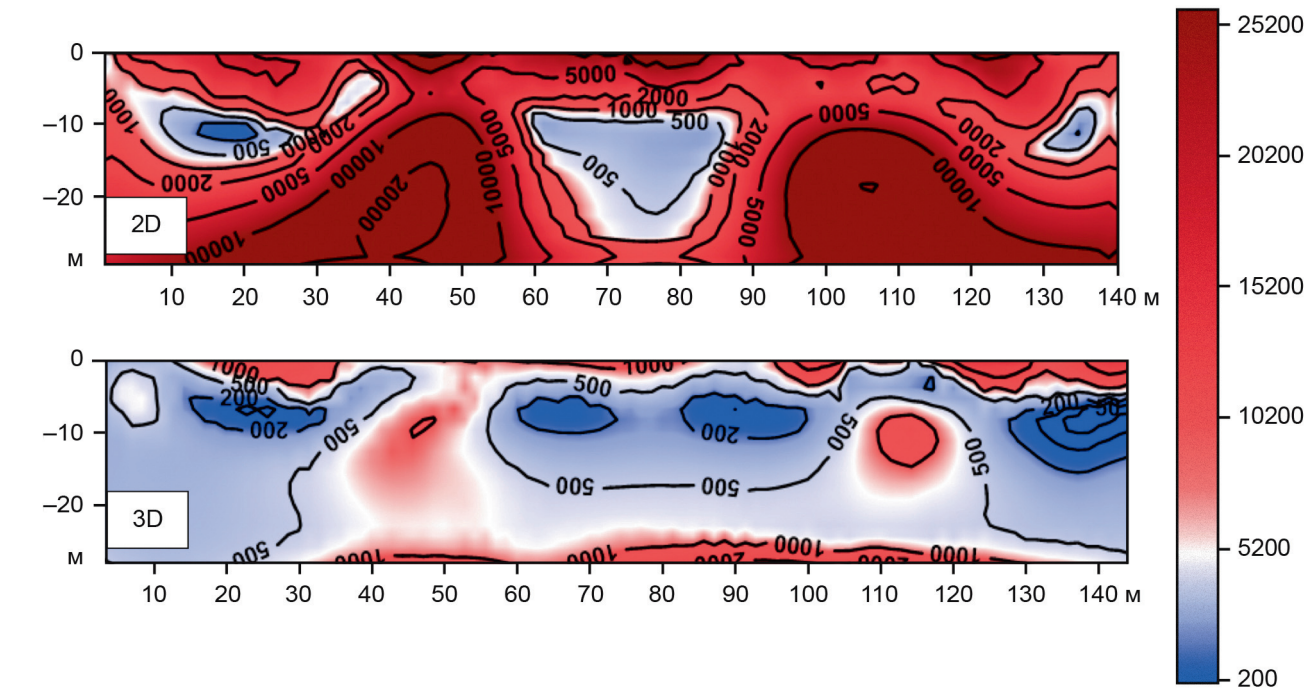


Рис. 4. Распределение УЭС вдоль профиля № 17 по результатам двумерной (вверху) и трехмерной (внизу) инверсии двумерных данных метода электротомографии

Выводы. Для изучения геологического строения участка и выявления пространственного расположения талых и мерзлых пород использован метод электротомографии, данные бурения и скважинной термометрии. По результатам профильных измерений на площади участка получены двумерные данные, по которым выполнена двумерная инверсия. Также выполнена трехмерная инверсия всей совокупности двумерных данных метода электротомографии и построена объемная геоэлектрическая модель (трехмерный куб удельных электрических сопротивлений) участка исследований. Полученная трех-

мерная модель существенно отличается по своему строению от геоэлектрических моделей по результатам двумерной инверсии. Результаты представлены в виде нескольких карт УЭС по глубинам (слайсов) и в виде разрезов УЭС, которые были выбраны по направлениям проектных профилей наблюдения методом ЭТ. Построенные дополнительно с использованием электростратиграфии [Модин и др., 2024] карты положения уровня грунтовых вод и кровли мерзлых грунтов (рис. 8) удовлетворительно совпадают с результатами бурения и хорошо согласуются с температурными измерениями в скважинах.

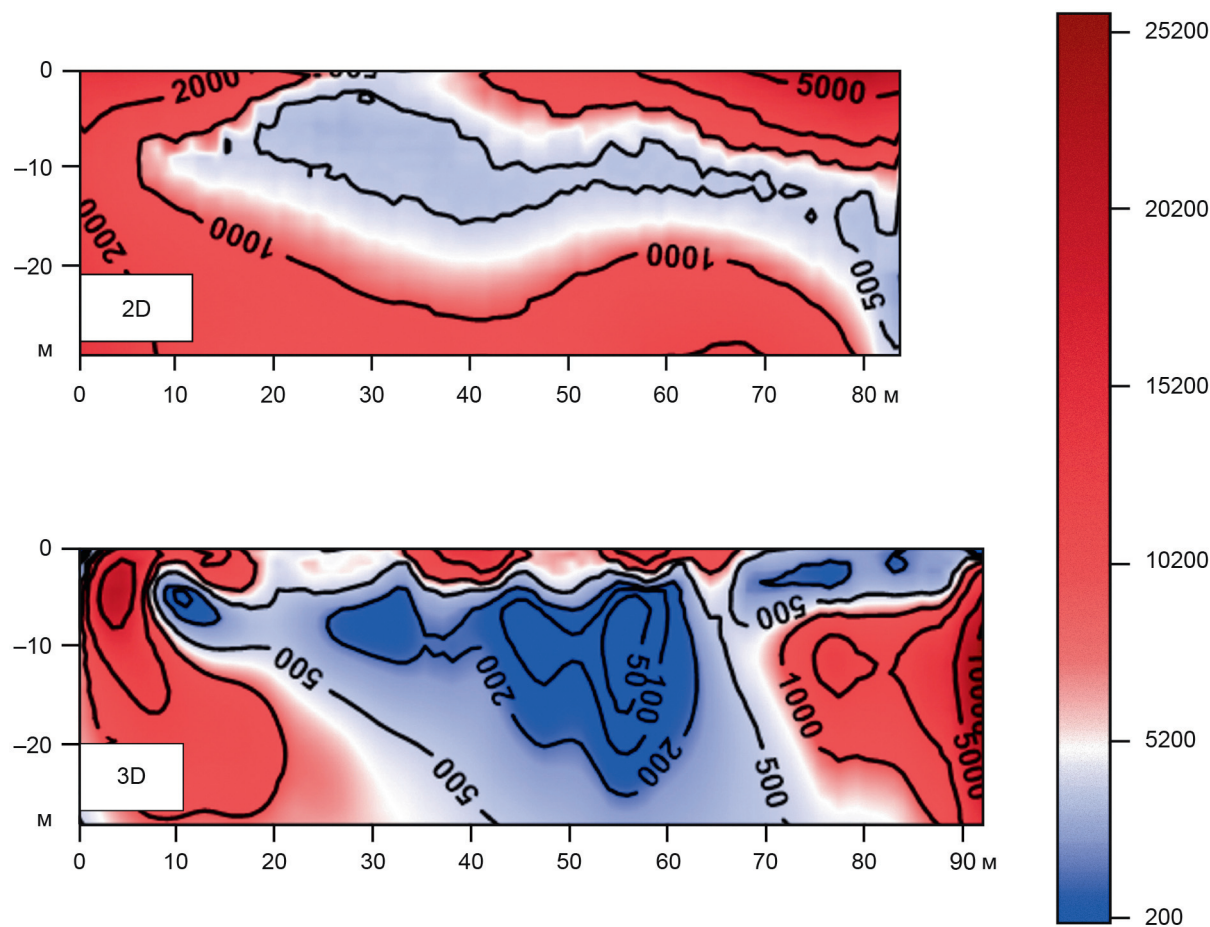


Рис. 5. Распределение УЭС вдоль поперечного сечения участка (ПК 70 м) по результатам двумерной (вверху) и трехмерной (внизу) инверсии двумерных данных ЭТ

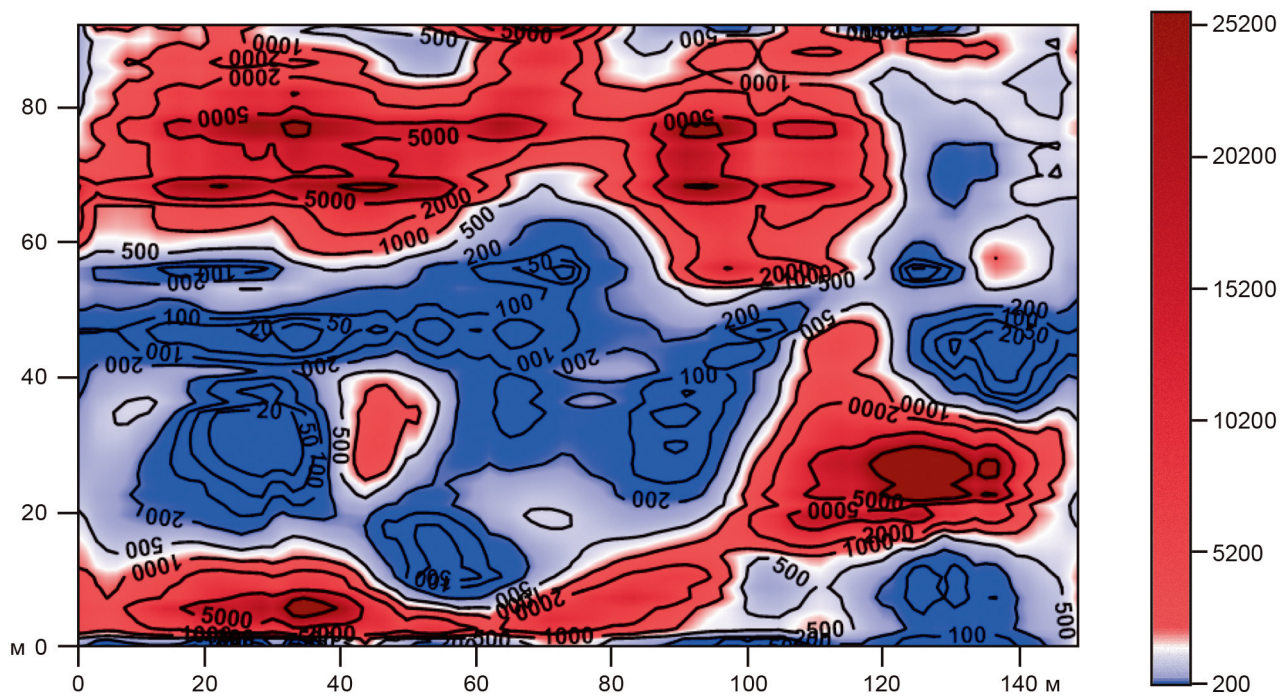


Рис. 6. Карта значений удельного электрического сопротивления на глубине 10 м

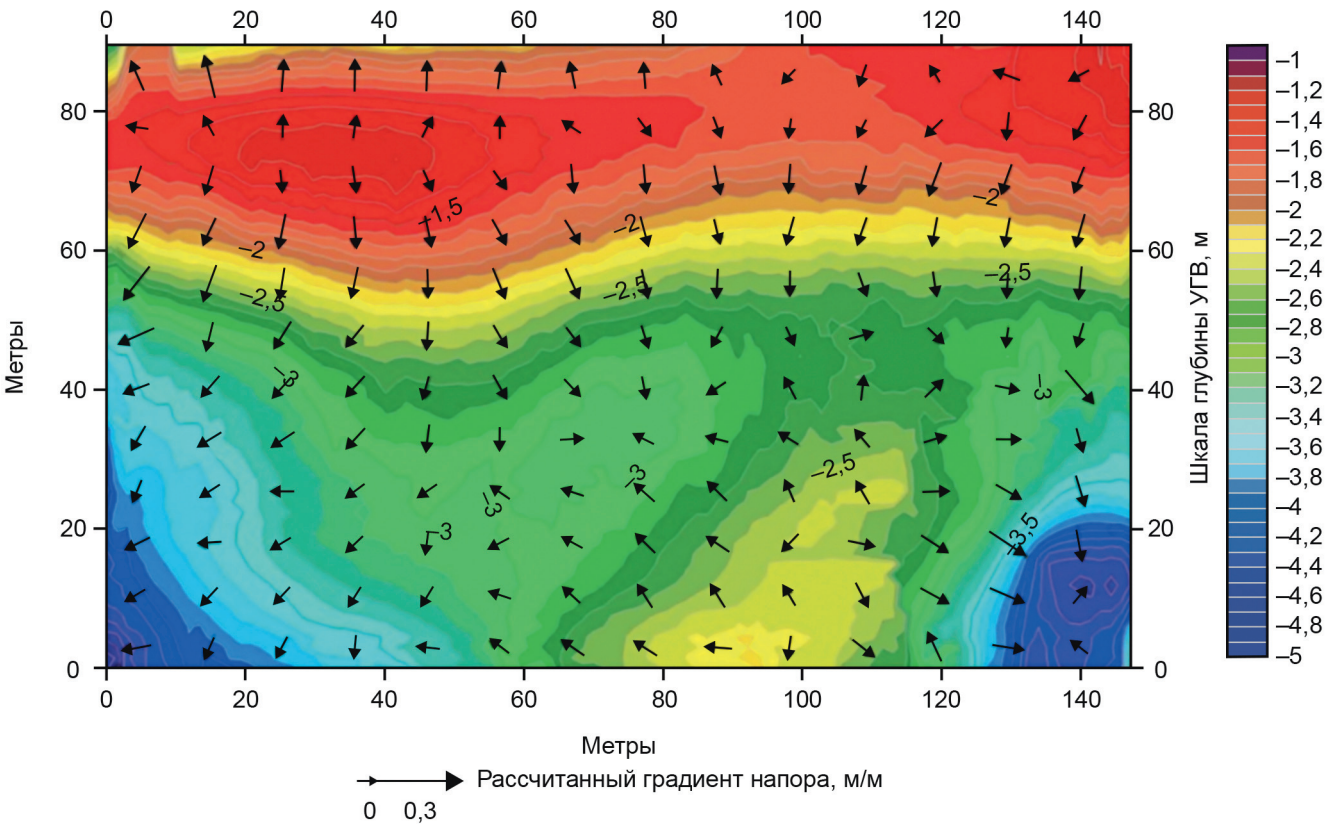


Рис. 7. Карта кровли многолетнемерзлых грунтов по результатам трехмерной инверсии двумерных данных метода электротомографии

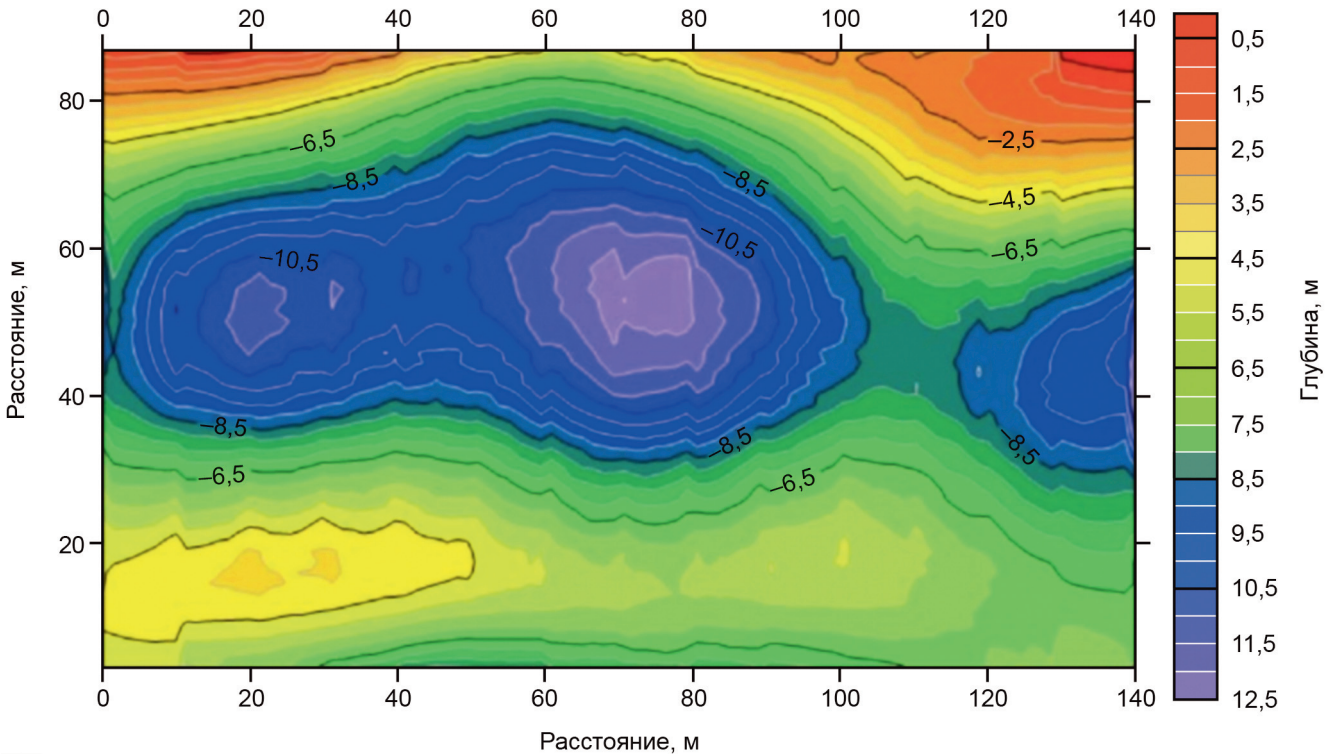


Рис. 8. Карта положения уровня грунтовых вод. Стрелками показаны направления водных потоков в верхней части талого слоя

Заключение. Проведенные площадные исследования методом трехмерной электротомографии позволили выделить четырехслойную структуру геоэлектрического и геологического разрезов. Верхняя часть разреза представлена маловлажным слоем мощностью до 5 м, включающим насыпные грунты (3–3,5 м) и сухие высокоомные пески с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от 300–500 до 2000–3000 Ом·м. Ниже залегает талый обводненный слой песков и супесей мощностью от 1–2 до 13 м с УЭС менее 300–500 Ом·м. Третий слой образован мерзлыми песками, супесями и песчаниками с УЭС от 500 до 7000 Ом·м, где выделяются линзы высокотемпературной мерзлоты (500–2000 Ом·м) и более холодные мерзлые грунты (2000–7000 Ом·м). На глубинах 17,5–19 м начинается четвертый слой мерзлых алевритов с УЭС 500–1000 Ом·м.

Анализ объемной геоэлектрической модели свидетельствует о наличии пойменной палеодолины (рис. 8), ориентированной параллельно современному берегу реки в центральной части участка. Карта градиента поверхности уровня грунтовых вод демонстрирует преимущественное направление потоков подземных вод к базису эрозии (уровню

реки), с основной зоной разгрузки в юго-западном направлении, что связано с желобом палеодолины (рис. 7). Установлено, что на формирование границ талых и мерзлых грунтов существенное влияние оказала историческая застройка участка, вытянутая вдоль речного берега.

Несмотря на субширотную ориентацию профилей, которая изначально считалась неоптимальной из-за совпадения с направлением тепловой аномалии, трехмерная инверсия данных электротомографии позволила получить детальную и достоверную геоэлектрическую модель. Это свидетельствует о высокой устойчивости 3D-подхода к вариациям в планировании измерений. Результаты показывают, что даже при неидеальной схеме расположения профилей (например, при ограничениях, связанных с инфраструктурой или рельефом) метод 3D-электротомографии сохраняет свою эффективность. Таким образом, в условиях сложной геологической среды или антропогенных помех трехмерная инверсия может компенсировать недостатки первичной сети измерений, что расширяет ее практическую применимость для изучения многолетней мерзлоты и других динамических геологических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.

Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. Много-сегментная технология измерений методом электротомографии // Тезисы докладов Научной конференции «Ломоносовские чтения — 2019». Секция «Геология». Москва: МГУ, 2019. 15–25 апреля. 7 с. URL: <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/> (дата обращения: 16.04.2019).

Брушков А.В., Васина А.И., Кияшко Н.В. и др. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. Т. 63, № 6. С. 4–11.

Григорьев Д.В., Ведерников А.С. Результаты применения 3D-электротомографии для поисков карстовых пустот в условиях соленотвала // Проблемы недропользования. 2019. № 4(23). С. 137–143.

Модин И.Н., Лубнина Н.В., Скобелев А.Д., Крылов О.В. Электростратиграфия западной части Херсонеса Таврического // Геофизика. 2024. № 1. С. 40–50.

Модин И.Н., Скобелев А.Д., Валиулина А.М., Степаченков В.С. Электротомографические исследования в кальдере Узон на гейзере Шаман (полуостров Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 60, № 4. С. 22–34.

Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследованиях ледниковых отложений // Геофизика. 2013. № 6. С. 32–37.

Павлова А.М. Применение малоглубинной электро-разведки для изучения трехмерно неоднородных сред: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014. 27 с.

Романовский Н.Н., Хуббертен Г.В., Холодов А.Л., Тиненко Г.С. Состояние толщ многолетнемерзлых пород на шельфе морей восточного сектора российской Арктики // Криосфера Земли. 2001. Т. V, № 2. С. 3–10.

Романовский Н.Н., Хуббертен Г.В., Гаврилов А.А. и др. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части евразийской Арктики // Криосфера Земли. 2003. Т. VII, № 4. С. 51–64.

Bermejo L., Ortega A.I., Guérin R., et al. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain) // Quaternary International. 2017. Vol. 433. P. 393–401.

Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 2018. Part 8. P. 137–138. URL: www.geotomosoft.com

Pasierb B. The application of the 2D/3D electrical resistivity tomography (ERT) method in investigating the carbonate karst of the Zakrzówek Horst // Geology, Geophysics and Environment. 2022. Vol. 48, № 3. P. 319–327.

Pasierb B., Nawrocki W. Integrated Geophysical Search for 19th-Century Underground Tanks in Krakow (Poland): Analysis of 2D, 2.5D and 3D ERT Surveys // Archaeological Prospection. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/arp.1974>

Yang X., Lagmanson M. Comparison of 2D and 3D electrical resistivity imaging methods // SAGEEP. 2006. P. 585–594.

Статья поступила в редакцию 07.03.2025,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 28.08.2025