

РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

Проявление трехмерной чаши протаивания под полотном автодороги на геоэлектрических разрезах по данным 2D-инверсии электротомографии при различном расположении системы наблюдения

З. Я. Кузина (ООО ИНГГ СО РАН), В. В. Оленченко (ИНГГ СО РАН)

При инженерно-геофизических исследованиях автодорог в криолитозоне методом электротомографии чаще всего ограничиваются проведением одиночных профилей и 2D-инверсией данных, однако чаша протаивания под насыпью имеет трехмерную структуру. Выполнено численное 3D-моделирование для двух систем наблюдения: профили поперек и вдоль дороги. Установлено, что глубина протаивания чаши на 2D-разрезах занижается на 30–40 %, независимо от ориентации профилей. При расположении профилей вдоль дороги форма аномалии искажается до изометричной, а в случае поперечного расположения профилей рельеф насыпи завышает УЭС мерзлых грунтов с 500 до 950 Ом·м. Проведение измерений вдоль дороги менее трудоемко и в целом допустимо, но при интерпретации необходимо учитывать занижение глубины протаивания чаши и искажение ее формы в плане.

Ключевые слова: электротомография (ЭТ), 3D-моделирование, криолитозона, термокарст.

Manifestation of a 3D thaw bulb beneath a road embankment on geoelectrical sections obtained from 2D inversion of electrical resistivity tomography data with different observation system layouts

Z. Y. Kuzina (IPGG SB RAS), V. V. Olenchenko (IPGG SB RAS)

In engineering geophysical surveys of roads in permafrost using electrical resistivity tomography, the common practice is limited to single profiles and 2D data inversion, although the thaw bulb beneath the embankment has a three-dimensional structure. Numerical 3D modeling was performed for two observation systems: profiles located across and along the road. It was found that the thaw depth of the bulb on 2D sections is underestimated by 30–40 %, regardless of profile orientation. When profiles are located along the road, the anomaly shape is distorted to isometric, whereas in the case of transverse profile orientation, the embankment relief overestimates the resistivity of frozen soils from 500 to 950 Ohm·m. Measurements along the road are less labor-intensive and generally acceptable, but interpretation must account for

the underestimation of the thaw depth of the bulb and the distortion of its plan-view shape.

Keywords: electrical resistivity tomography (ERT), 3D modeling, permafrost, thermokarst.

Введение

За многие годы строительства и эксплуатации автодорог в криолитозоне выявлены повторяющиеся проблемы, связанные с деформациями дорожного полотна. Дорожная насыпь формирует новую геотехническую систему, которая существенно изменяет мерзлотные условия, что приводит к ряду разрушительных для сооружения криогенных процессов, таких как протаивание, термокарст и пучение [1, 2]. Для прогноза устойчивости таких систем необходимы достоверные данные о строении и свойствах мерзлых толщ, получаемые в ходе инженерно-геологических изысканий. В связи с чем активно применяются геофизические методы, среди которых ключевую роль играют электротомография (ЭТ) и георадиолокация [3, 5].

Чаще всего при исследованиях методом ЭТ применяется профильная методика измерений и двумерная (2D) инверсия данных [6]. Однако одним из основных объектов изучения на дорогах в криолитозоне является чаша протаивания под полотном дороги, имеющая трехмерную структуру. Применение математического аппарата двумерной инверсии для трехмерного объекта может приводить к тому, что восстановленная модель не будет адекватно отражать реальные свойства и форму объекта исследований. Поскольку знание об удельном электрическом сопротивлении (УЭС) критически важно для определения гранулометрического и температурного состояния пород, ошибка в его оценке ведет к некорректной геологической интерпретации и, как следствие, к ошибочным инженерным прогнозам. Важным вопросом является и ориентировка профилей по отношению к объекту исследований. При изучении двумерных структур профили должны быть ориентированы ортогонально по отношению к объекту для того, чтобы точнее восстановить геоэлектрическую модель разреза. Однако на автодорогах с интенсивным движением практически не бывает возможности расположить профиль поперек дороги. Поэтому геоэлектрическое строение разреза в основании дороги может быть оценено только путем зондирования по профилям, расположенным вдоль обочины и подошвы дорожной насыпи.

Таким образом, целью данного исследования является оценка проявления трехмерного объекта (чаши протаивания) на геоэлектрических разрезах, полученных по результатам 2D-инверсии при разных системах наблюдения. Задачей было определить, насколько геоэлектрические границы и восстановленное значение УЭС отличаются от реальных для различных систем наблюдений.

Материалы и методы

Поставленная цель решалась с помощью проведения численного трехмерного моделирования, которое проводилось в программе ZondRes3D (автор Каминский А. Е.). Прямая задача в данной программе решается с помощью метода конечных элементов, который, по мнению автора, дает лучшие результаты, нежели сеточные методы. В результате решения прямой задачи получаем распределение потенциала от точечного источника в узлах сетки.

Геоэлектрическая модель составлена на основе реальных данных инженерно-геофизических исследований, полученных на участке реконструкции 5-го километра подъезда от федеральной трассы «Амур» к п. Песчанка и г. Чите в Забайкальском крае (рис. 1) [7].

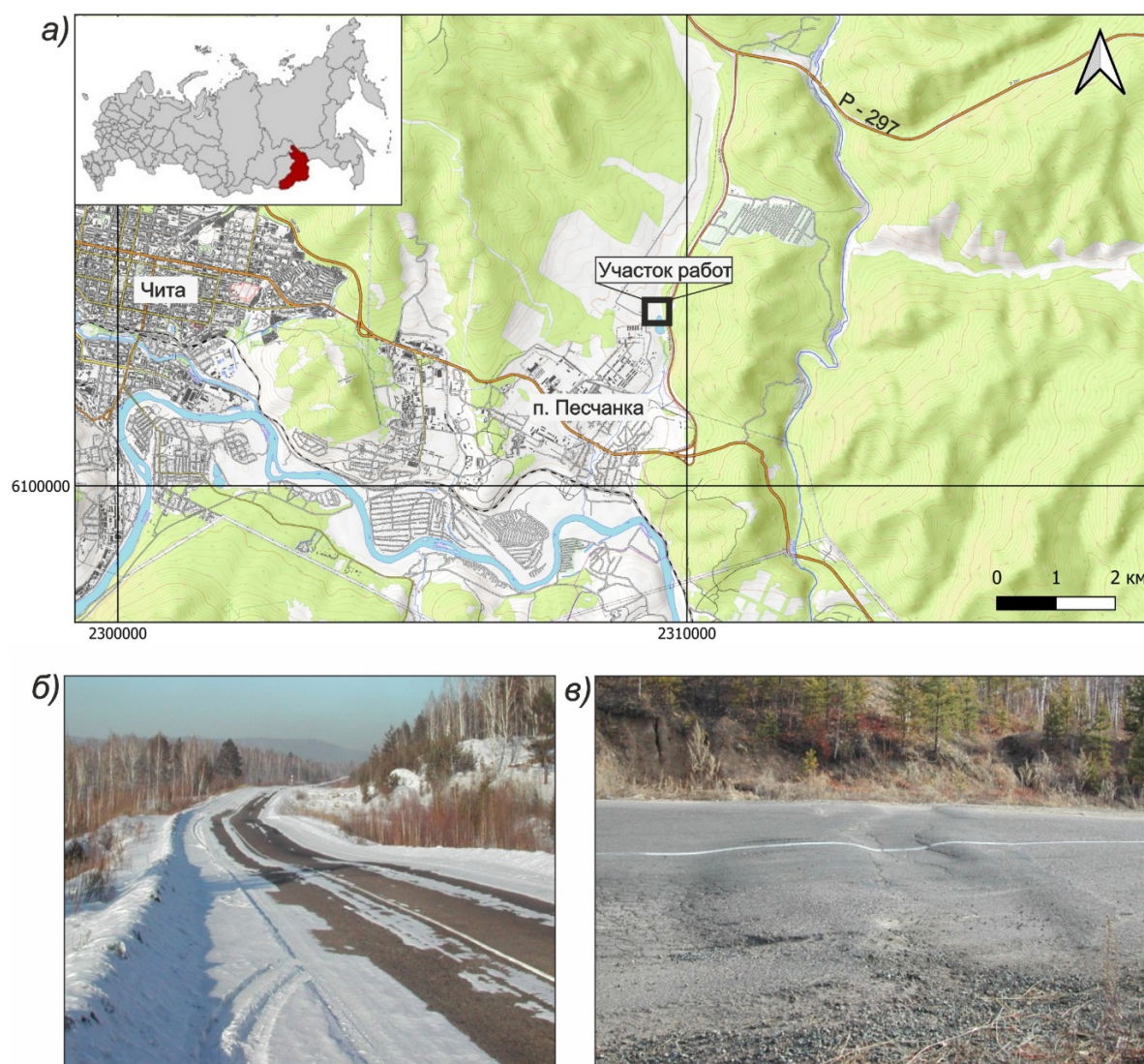


Рисунок 1. Характеристика участка исследований 2012 г.: а) схема расположения участка полевых работ (п. Песчанка, Забайкальский край); б) термокарстовые просадки на полотне автодороги; в) трещины отрыва

Обследуемый участок автодороги подвержен просадкам и оползневым деформациям, происходящим практически с начала эксплуатации в 80-х годах прошлого века. Участок автомобильной дороги проходит по левому борту ручья Песчанка. Район работ относится к островному типу распространения высокотемпературной многолетнемерзлой толщи (ММТ) сливающегося и несливающегося типов. В редкой сети скважин верхняя граница ММТ подсечена бурением в интервале глубин 3,9–11,2 м. Нижняя граница ММТ до глубины 15 м не подсечена. В геологическом строении принимают участие аллювиальные, делювиально-элювиальные и элювиальные отложения четвертичного возраста, подстилаемые нижнепалеозойскими образованиями — разномерными гранитами. Элювий представлен песками, супесями, суглинками, глинами.

На рисунке 2 представлены примеры проявления чаши протаивания под дорожным полотном на двумерном геоэлектрическом разрезе (слева) и в плане, на карте распределения УЭС на глубине 15 м (справа), построенные по результатам полевых исследований. Предполагаемые контуры обводненных оттаявших пород, отвечающие областям термокарстового процесса, выделены по изолинии 45 Ом·м.

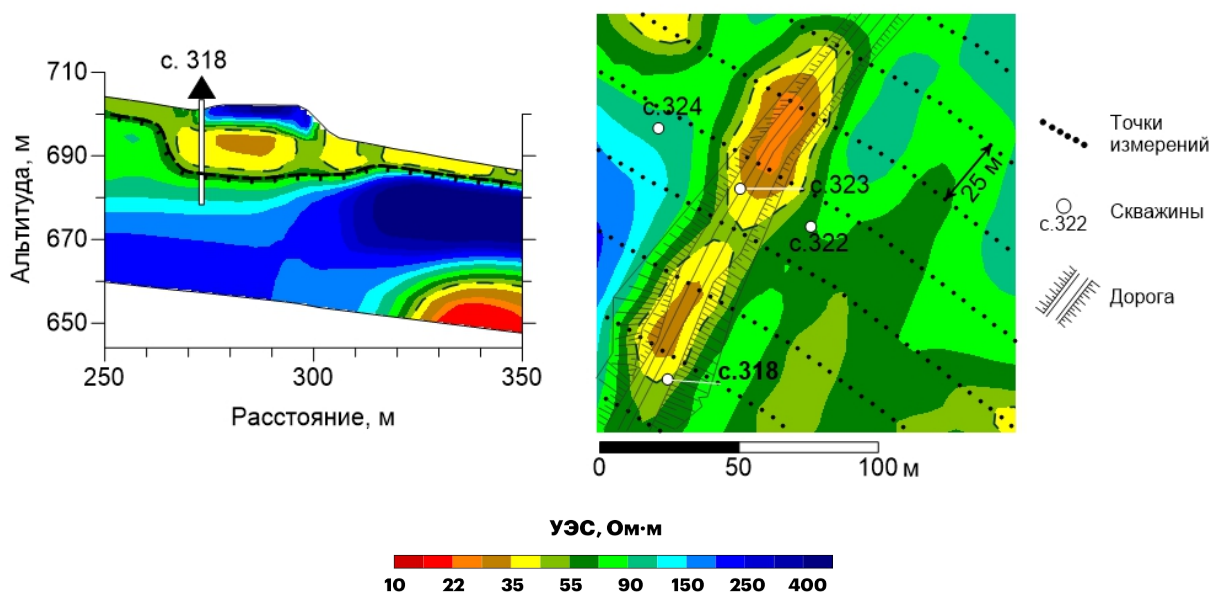


Рисунок 2. Пример результатов полевых работ: геоэлектрический разрез по профилю (слева); карта распределения УЭС на глубине 15 м (справа). Предполагаемые контуры обводненных оттаявших пород (термокарст) оконтурены по изолинии 45 Ом·м

На основе представленных полевых данных и результатов бурения была построена трехмерная геоэлектрическая модель чаши протаивания. Значения УЭС мерзлых и талых грунтов приняты в соответствии с приближенной зависимостью сопротивления грунтов от гранулометрического состава, влажности и температуры [8]. Модель

включает дорожную насыпь высотой 3 м с УЭС 300 Ом·м. Насыпь расположена на слое сезонноталых песков до глубины 3 м с УЭС 150 Ом·м. Ниже до глубины 20 м залегают многолетнемерзлые супеси с УЭС 500 Ом·м (температура $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). В основании модели залегают суглинки талые с УЭС 50 Ом·м. Под дорожной насыпью смоделирована овальная чаша протаивания размером $50 \times 30 \times 12$ м с УЭС 70 Ом·м, что соответствует обводненным супесям. В ходе проведения численного трехмерного моделирования было рассмотрено два случая расположения системы наблюдения: профили ЭТ расположены ортогонально (модель № 1) и параллельно дороге (модель № 2) (рис. 3).

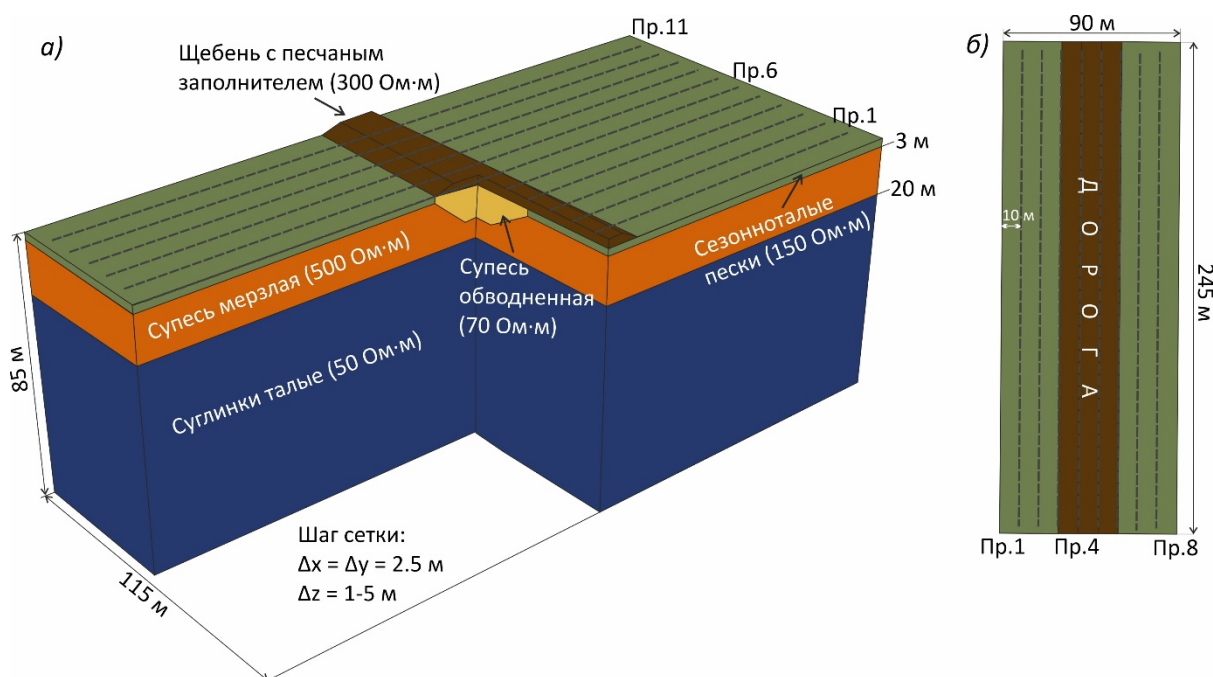


Рисунок 3. Трехмерная модель участка исследования для случая перпендикулярного расположения профилей к дороге (а) и план расположения профилей вдоль дороги (б)

Для первого случая система наблюдения состояла из 11 профилей ЭТ длиной 235 м с межпрофильным расстоянием 10 м. Использовалась установка прямая и обратная трехэлектродная с шагом измерений по профилю 5 м. Таким образом, область моделирования составила $245 \times 120 \times 70$ м. Для второго же случая прямая задача решалась для набора из 8 профилей, что уменьшило область моделирования до размеров $245 \times 90 \times 70$ м. При поперечной ориентации профилей шаг 5 м обеспечивает 7 электродов на малую ось чаши (30 м), а межпрофильное расстояние 10 м — пересечение 5 профилями ее большой оси. При продольной ориентации профилей шаг 5 м обеспечивает 11 электродов на большую ось, а межпрофильное расстояние 10 м — пересечение 3–4 профилями малой оси. В обоих случаях детальность достаточна для оконтуривания аномалии. Максимальный разнос 215 м (следствие шага 5 м и 48 электродов)

обеспечивает глубинность исследования до примерно 70 м, что более чем в 5 раз превышает глубину чаши (12 м).

Для двумерной и трехмерной инверсии модельных данных применялись программы Res2Dinv и Res3Dinv (автор М. Н. Локе). При решении обратной задачи был использован робастный метод инверсии, после четырех итераций среднеквадратичное отклонение не превышало 10 % для 2D- и 7 % для 3D-инверсии.

Результаты

Для анализа результатов 2D-инверсии (рис. 2 а, б) были построены геоэлектрические разрезы по профилю № 6 (центральный профиль для модели № 1) и профилю № 4 (профиль вдоль обочины дороги для модели № 2). Результаты 3D-инверсии представлены в виде карт распределения УЭС на глубине 6 м. На разрезах сплошными линиями показаны границы слоев исходной модели. Также проведено сопоставление восстановленных значений УЭС каждого слоя с модельными значениями, диапазон которых указан скобках на рисунке 4.

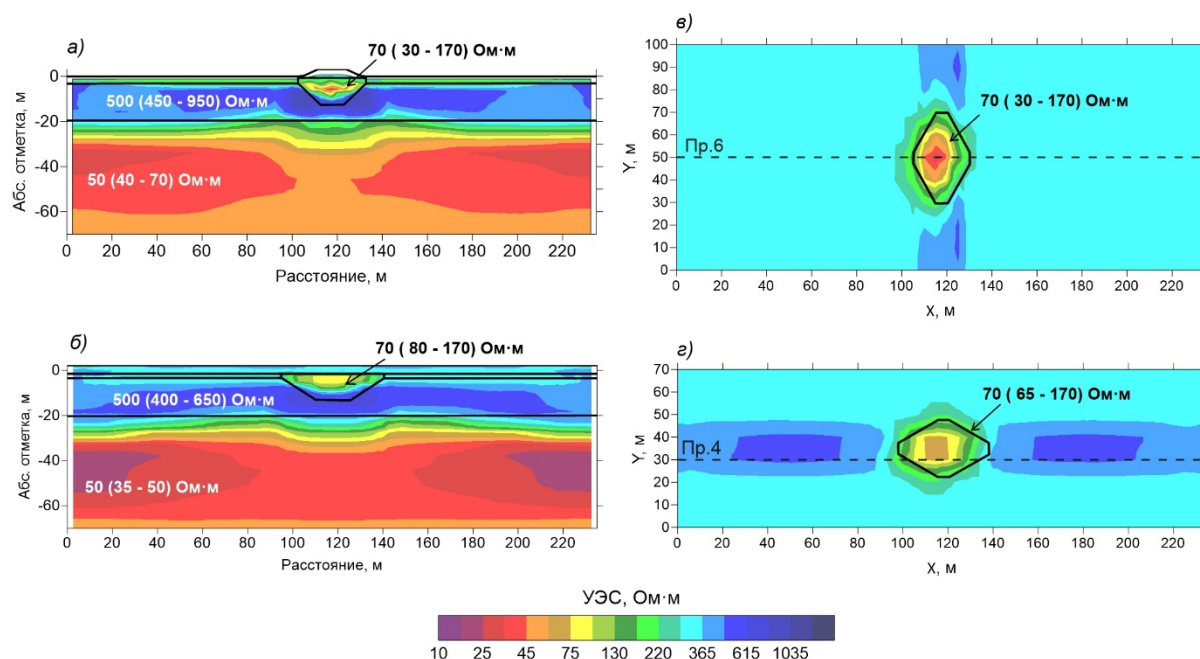


Рисунок 4. Геоэлектрические разрезы: а) профиль № 6 (модель № 1), б) профиль № 4 (модель № 2). Карты распределения УЭС на глубине 6 м: в) для модели № 1; г) для модели № 2

Из сопоставления геоэлектрических разрезов по результатам 2D-инверсии (рис. 4 а, б) следует, что мощность низкоомной аномалии, соответствующей чаше протаивания, занижена относительно стартовой на 4–5 м для каждой смоделированной ситуации. Подошва слоя мерзлых супесей отбивается корректно и располагается на глубине 20 м. Значения

восстановленных сопротивлений в чаше протаивания и нижнем слое достаточно схожи между собой и близки к модельным. Различие наблюдается в оценке УЭС слоя мерзлых грунтов. Для модели № 1 максимальное восстановленное УЭС достигает 950 Ом·м при исходном значении 500 Ом·м, что соответствует завышению на 90 %. По справочным данным [8], такое сопротивление для мерзлых супесей соответствует более низкой температуре (-1...-1,5 °С), чем заложено в модели. Это может привести к ошибочным выводам о стабильности мерзлого основания. В то время как на разрезе по профилю № 4 (модели № 2) значения УЭС не превышают 650 Ом·м, что лишь на 30 % выше исходных 500 Ом·м и ближе к справочным значениям для температуры -0,5 °С. Это расхождение может быть объяснено разным положением профилей относительно насыпи, ведь профиль № 6 пересекает ее локально, в отличие от профиля № 4, который расположен полностью в пределах насыпи, что дает более однородную картину. Однако необходимо учитывать и влияние рельефа на данные, измеренные методом ЭТ. Насыпь дороги является положительной формой рельефа, которая в местах перегибов может вызывать появление аномалий завышенных значений кажущихся сопротивлений [9]. Однако на геоэлектрическом разрезе полевых данных (рис. 2, слева) такого эффекта не наблюдается. Вероятно, завышение УЭС связано с артефактами численных расчетов, поскольку в синтетической модели перегибы насыпи достаточно резкие, тогда как в реальности они сглажены.

При анализе карт распределения УЭС на глубине 6 м (рис. 4 в, г) следует отметить, что значения УЭС на обеих картах сопоставимы и близки к модельным. Однако форма низкоомной аномалии, соответствующей чаше протаивания, отличается: в случае расположения профилей вдоль дороги она приобретает изометричную форму, в то время как ортогональная система наблюдения позволяет восстановить форму, более близкую к исходной модели, которая вытянута вдоль дороги. Количественная оценка формы чаши протаивания выполнена по изолинии 170 Ом·м на картах УЭС на глубине 6 м. Истинное отношение осей в модели составляет $40/25 = 1,6$. При поперечном расположении профилей (модель № 1) восстановленное отношение осей равно 1,6 (отклонение 0 %). При продольном расположении (модель № 2) отношение осей снизилось до 1,3, что соответствует отклонению 19 %, рассчитанному как $\frac{|k_{\text{восст}} - k_{\text{мод}}|}{k_{\text{мод}}} \cdot 100\%$. Полученные количественные оценки подтверждают вывод, сформулированный на качественном уровне выше.

Модель чаши протаивания с заданной геометрией и системой наблюдения представляет собой трехмерную неоднородность. Ее длина вдоль большей оси составляет 50 м при максимальном разносе АО = 215 м. Согласно [10], результаты 2D-инверсии будут корректными лишь при условии, что тело расположено перпендикулярно профилю и

вытянуто на расстояние, много большее АО. В нашем случае это условие не выполняется, чем и объясняются выявленные искажения глубины и формы.

Выводы

Результаты моделирования показали, что на геоэлектрических разрезах по результатам 2D-инверсии глубина чаши протаивания будет занижена на 4–5 м, что составляет 30–40 % от реальной (12 м). Выявлена зависимость восстановленной формы аномалии от ориентации профилей: при расположении профилей вдоль дороги аномалия приближается к изометричной форме, (отношение осей изменяется с 1,6 до 1,3, искажение 19 %), ортогональное же расположение сохраняет исходную вытянутость объекта исследования. Рельеф дорожной насыпи влияет на результаты 2D-инверсии, завышая УЭС мерзлых грунтов, что особенно выражается на результатах для модели № 1: восстановленное УЭС увеличивается на 90 %. Такое завышение УЭС может повлечь за собой ложные выводы о температурном состоянии мерзлых пород. При инженерно-геологических изысканиях на автодорогах в криолитозоне надо не ограничиваться одиночными профилями и 2D-инверсией, а осуществить измерения по сети параллельных профилей для последующего проведения 3D-инверсии. Если проведение площадных исследований невозможно, то при интерпретации одиночных разрезов по результатам 2D-инверсии следует учитывать возможные искажения модели влиянием рельефа насыпи. С практической точки зрения, учитывая сложность организации поперечных профилей на дороге с интенсивным движением, измерения вдоль дорожного полотна являются приемлемым компромиссным вариантом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках исследований по теме № FWZZ-2026–0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоемких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ».

Список литературы

1. Хименков А. Н. Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород / Хименков А. Н., Сергеев Д. О., Кулаков А. П., Романов А. В. // Арктика и Антарктика. — 2023. — № 4. — С. 125–157. — <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.68814>.
2. Кондратьев В. Г. Инженерно-геокриологические проблемы федеральной автодороги «Амур» Чита — Хабаровск / Кондратьев В. Г., Соболева С. В. // Записки Горного института. — 2009. — Т. 183. — С. 205–209.
3. Судакова М. С. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге / Судакова М. С., Брушков А. В., Великин С. А., Владов М. Л., Зыков Ю. Д., Неклюдов В. В., Оленченко В. В., Пушкарев П. Ю., Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. М. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. — 2022. — № 6. — С. 141–151. — <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151>.
4. Христофоров И. И. Изучение таликов Бестяхской террасы центральной Якутии комплексом геофизических методов / Христофоров И. И., Бажин К. И., Оленченко В. В., Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. М., Ефремов В. Н., Данилов К. П., Иванов Ю. Г., Якимов А. С., Омельяненко А. В., Омельяненко П. А., Железняк М. Н., Лебедева Л. С., Гагарин Л. А. // Инженерная сейсморазведка и сейсмология — 2020. Георадар-2020. Теперь вместе: Сборник тезисов научно-практической конференции. — М.: Академия Естествознания, 2020. — С. 132–136.
5. Пушкарев В. Е. Методы и методология мониторинга линейных объектов в криолитозоне / Пушкарев В. Е., Плесовских К. А., Лебедев А. А., Вакулин А. А. // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2025. — Т. 11. — № 3(43). — С. 18–39. — <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-18-39>.
6. Oldenborger G. A. Geophysical imaging of permafrost conditions along the northern Yukon Alaska Highway / Oldenborger G. A. [et al.] // Proceedings from the 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference. — 2015. — P. 21–23.
7. Оленченко В. В. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании / Оленченко В. В., Кондратьев В. Г. // Вестник Северо-Восточного государственного университета. — 2017. — № 27. — С. 116–119.

8. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка) / ПНИИИС. — М.: Стройиздат, 1984.
9. Баранчук К. И. Физическое моделирование электрической томографии на поверхности земли со сложным рельефом / Баранчук К. И., Миргаликызы Т. М., Модин И. Н., Муканова Б. Г. // Инженерные изыскания. — 2017. — № 11. — С. 56–65. — <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2017-11-56-65>.
10. Павлова А. М. Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред / Павлова А. М. // М.: Типография ООО «Ай-клуб», 2014.

References

1. Himenkov A. N. Peculiarities of organizing engineering-geocryological monitoring of highways operated in permafrost areas / Himenkov A. N., Sergeev D. O., Kulakov A. P., Romanov A. V. // Arctic and Antarctic. — 2023. — No. 4. — P. 125–157. — <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.68814>.
2. Kondrat'ev V. G. Engineering-geocryological problems of the federal highway "Amur" Chita — Khabarovsk / Kondrat'ev V. G., Soboleva S. V. // Zapiski Gornogo instituta/ — 2009/ — Vol. 183. — Pp. 205–209.
3. Sudakova M. S. Geophysical methods in geocryological monitoring // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 4. Geologiya / Sudakova M. S., Brushkov A. V., Velikin S. A., Vladov M. L., Zikov Yu. D., Nekliudov V. V., Olenchenko V. V., Pushkarev P. Yu., Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Tsarev A. M. // Moscow University Geology Bulletin. — 2022. — No. 6. — P. 141–151. — <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151>.
4. Hristoforov I. I. Study of alas taliks of the Bestiakh terrace in Central Yakutia by a complex of geophysical methods / Hristoforov I. I., Bazhin K. I., Olenchenko V. V., Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Carev A. M., Efremov V. N., Danilov K. P., Ivanov Yu. G., Yakimov A. S., Omel'yanenko A. V., Omel'yanenko P. A., Zheleznyak M. N., Lebedeva L. S., Gagarin L. A. // Engineering Seismic Survey and Seismology — 2020. GPR-2020. Now Together: Collection of abstracts of the scientific-practical conference. — M.: Akademiia Estestvoznaniia, 2020. — P. 132–136.
5. Pushkarev V. E. Methods and methodology for monitoring linear objects in the permafrost zone / Pushkarev V. E., Plesovskikh K. A., Lebedev A. A., Vakulin A. A. // Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy. — 2025. — Vol. 11. — No. 3(43). — P. 18–39. — <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-18-39>.

6. Oldenborger G. A. Geophysical imaging of permafrost conditions along the northern Yukon Alaska Highway / Oldenborger G. A. [et al.] // Proceedings from the 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference. — 2015. — P. 21–23.
7. Olenchenko V. V. Geophysical investigations within a section of road deformation built on a frozen base / Olenchenko V. V., Kondrat'ev V. G. // Vestnik of North-Eastern State University. — 2017. — No. 27. — P. 116–119.
8. Guidelines for geophysical work in engineering surveys for construction (electrical prospecting) / PNIIS. — Moscow: Stroyizdat, 1984 [in Russ.].
9. Baranchuk K. I. Physical modeling of electrical tomography on the earth's surface with complex topography / Baranchuk K. I., Mirgalikyzy T. M., Modin I. N., Mukanova B. G. Physical // Engineering surveys. — 2017. — No. 11. — P. 56–65. — <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2017-11-56-65>.
10. Pavlova A. M. Application of shallow-depth electrical prospecting for the study of three-dimensionally inhomogeneous media / Pavlova A. M. — M.: Printing house of OOO "Ai-klub", 2014.