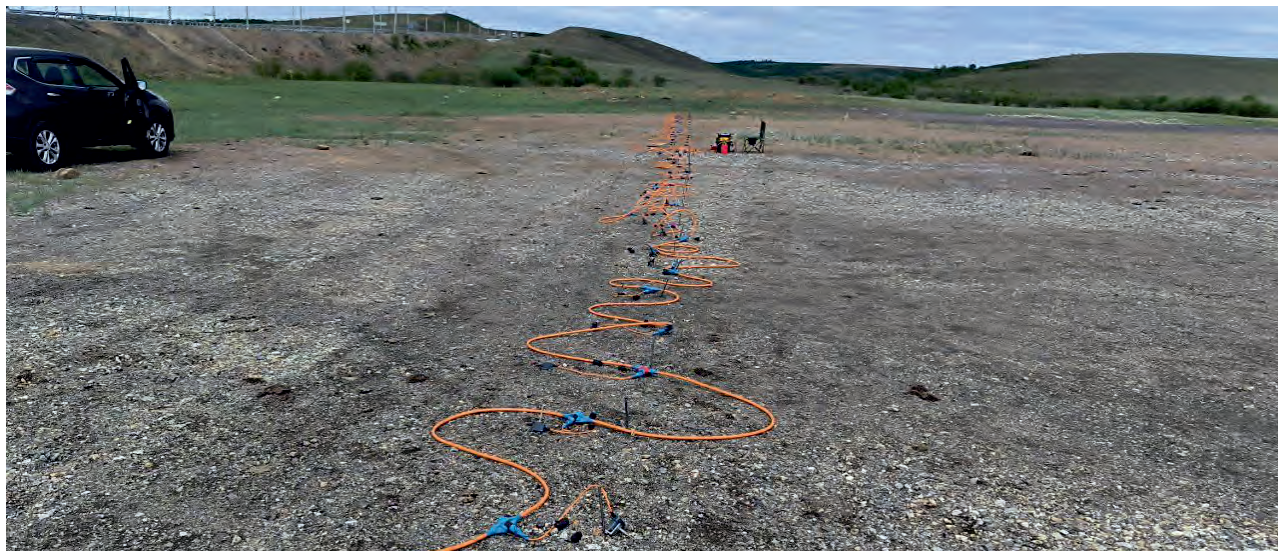


Результаты комплексных инженерно-геофизических исследований на территории поста наблюдения за мерзлотными условиями автодороги Р-297 «АМУР»

- Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.
- Романов В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Кауркин В.Д., НИИОСП им. Н.М. Герсевича, АО «НИЦ «Строительство», г. Москва.



Аннотация: В статье представлены результаты комплексных инженерно-геофизических исследований, проведенных на территории стационарного поста наблюдений за метеорологическими и мерзлотными условиями, расположенного в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (Забайкальский край, 288-й км автодороги Р-297 «Амур»).

Цель работ заключалась в уточнении инженерно-геологических и геокриологических условий для последующей организации мониторинга при помощи инженерно-геофизических методов.

В ходе исследований был выполнен комплекс методов: георадиолокация (ГРЛ), электротомография (ЭТ) и сейсморазведка методом преломленных волн в модификации общей глубинной площадки (МПВ–ОГП). Исследования проводились в различные сезоны 2025 г. (апрель, июнь, сентябрь), что позволило оценить динамику сезонного оттаивания и влияние криогенного состояния грунтов на изучаемые параметры. Выполнен анализ эффективности каждого метода в условиях сезонно- и многолетнемерзлых грунтов. Показано, что в рамках исследуемого участка метод электротомографии обладает максимальной чувствительностью к фазовым переходам и позволяет надежно картировать границы мерзлых (многолетнемерзлых) грунтов, выделять зоны повышенной льдистости и талики. Сейсморазведка на поперечных волнах дает независимую информацию о положении границ и значения скорости, необходимых для сейсмического микрорайонирования. Георадиолокация оказалась малоинформативной, достоверно определяя только первую от поверхности границу мерзлого слоя.

Полученные результаты могут служить основой для разработки дополнительных мероприятий по более детальному инженерно-геологическому мониторингу с применением инженерно-геофизических методов.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, инженерная геофизика, георадиолокация, электротомография, сейсморазведка МПВ–ОГП, сезонное оттаивание, криолитозона, автомобильная дорога, комплексные исследования

Введение

Современное освоение территории криолитозоны требует детального понимания пространственной изменчивости геокриологических условий. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) характеризуются высокой чувствительностью к техногенным воздействиям и климатическим изменениям. Увеличение мощности сезонно-талого слоя, деградация мерзлоты, образование термокарстовых провалов представляют серьезную опасность для линейных сооружений, в том числе автомобильных дорог федерального значения. Для обеспечения безопасной эксплуатации транспортных объектов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов необходимо проведение систематических наблюдений за их состоянием. Наблюдения могут быть выполнены как прямыми (бурение инженерно-геологических скважин, термометрия), так и косвенными методами (инженерно-геофизические методы).

На участках автодороги Р-297 «Амур», наиболее подверженных процессам деградации многолетнемерзлых грунтов, в целях постоянного наблюдения за метеорологическими и мерзлотными условиями, состоянием земляного полотна и основания автомобильной дороги организованы посты наблюдения.

В рамках научных исследований, выполняемых Институтом геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, на стационарном посту наблюдения за метеорологическими и мерзлотными условиями на 288-ом км автодороги Р-297 «Амур» были выполнены детальные инженерно-геофизические исследования. Основными задачами исследования являлись:

- получение количественных параметров скоростей поперечных волн (V_s) для

целей сейсмического микрорайонирования;

- определение мощности рыхлых отложений и положения границ распространения талых и мерзлых (многолетнемерзлых) грунтов;

- выявление аномальных зон различного генезиса (талики, участки повышенной льдистости);

- мониторинг изменения сейсмических и электрических свойств грунтов.

Комплекс инженерно-геофизических методов

Для решения поставленных задач был применен комплекс геофизических методов, включающий георадиолокацию (ГРЛ) [2], электротомографию (ЭТ) [1] и сейсморазведку методом преломленных волн в модификации общей глубинной площадки (МПВ-ОГП).

При изучении криолитозоны эффективность геофизических методов определяется контрастностью физических свойств между мерзлыми и талыми грунтами, а также между грунтами разного литологического состава. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) мерзлых и талых грунтов может отличаться на несколько порядков из-за перехода поровой воды в лед, что делает электроразведку исключительно информативной. Скорости упругих волн также возрастают при переходе грунтов из талого в мерзлое состояние, но этот контраст менее выражен и зависит от литологии и льдистости. Эффективность георадиолокации для изучения мерзлых грунтов обусловлена существенной разницей в диэлектрической проницаемости льда и талых, водонасыщенных грунтов, что создает высокий контраст на границе «мерзлое — талое» и обеспечивает значительно большую глубину зондирования по сравнению с талыми грунтами.



▲ Рис. 1. Схема положения профилей.

Полевые сейсморазведочные работы методом электротомографии выполнялись по шести совмещенным профилям (рисунок 1).

При проведении электротомографии измерения проводились с использованием аппаратурно-программного комплекса «Скала-48» с шагом между электродами 1 м. Применялись установки Шлюмберге и дипольно-дипольная установка.

Сейсморазведочные работы были выполнены методом МПВ-ОГП, при этом: шаг между пунктами приема (ПП) составлял 1 м, пункты возбуждения (ПВ) упругих колебаний располагались на каждом ПП, что позволило повысить детальность расчленения разреза [5, 6].

Георадиолокационные исследования проводились в пешеходном варианте с георадаром ОКО-2 и двухчастотным антенным блоком АБ-150/400 МГц.

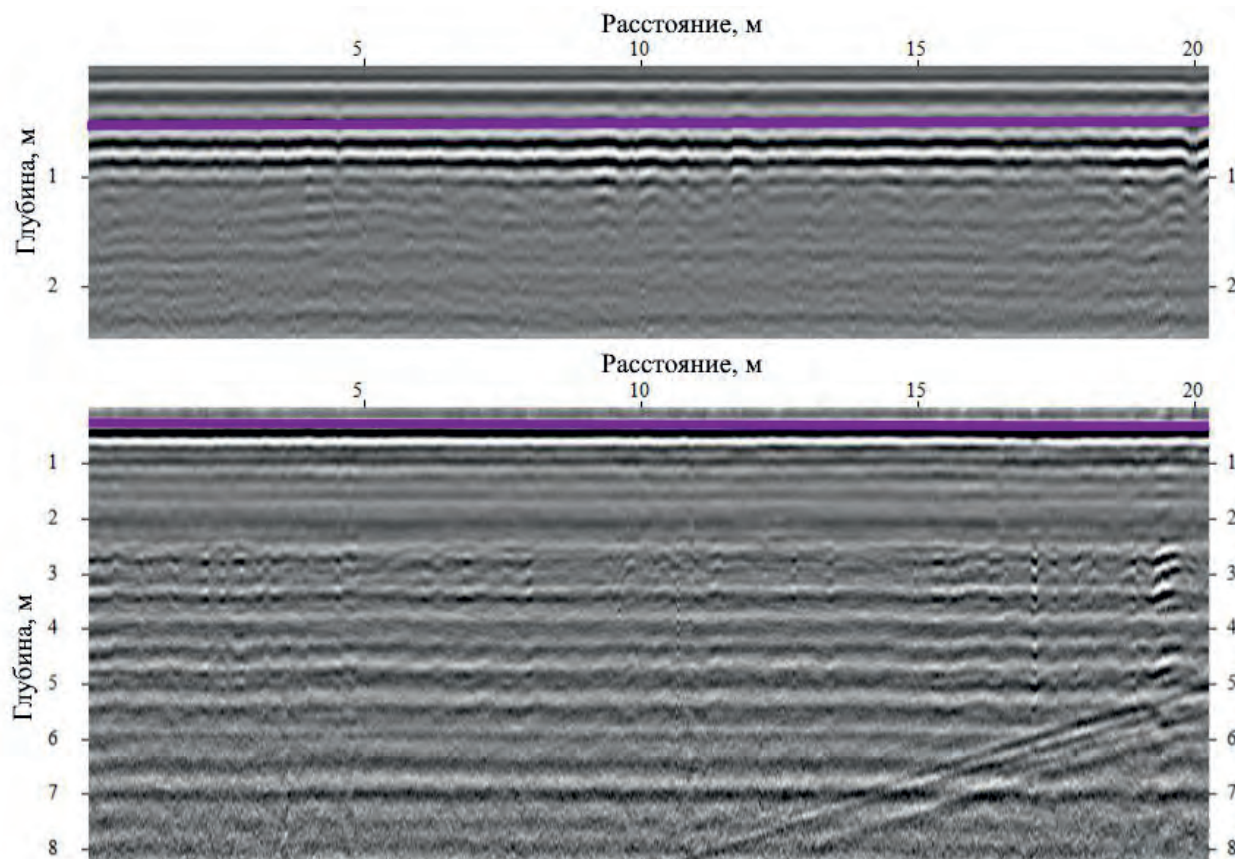
Результаты исследования

Вначале рассмотрим результаты георадиолокационных исследований, выполненных в апреле 2025 г. К сожалению,

на радарограммах возможно проследить только первую от поверхности границу мерзлого слоя (рисунок 2). Для решения задач по определению подошвы сезонно-мерзлого слоя, геологическому строению толщи и положению кровли ММГ, метод в данных инженерно-геологических условиях оказался малоинформативным. Основной причиной этого, по нашему мнению, является наличие пласта суглинков в верхней части разреза, который в момент проведения исследований частично находился в талом состоянии.

Наиболее интересные результаты были получены методами сейсморазведки и электротомографии. Поскольку положение сейсморазведочных и электроразведочных профилей совпадало, то была возможность комплексирования этих методов.

Далее рассмотрим результаты электротомографии. Как известно, переход грунтов из мерзлого состояния в талое сопровождается существенным снижением удельного электрического

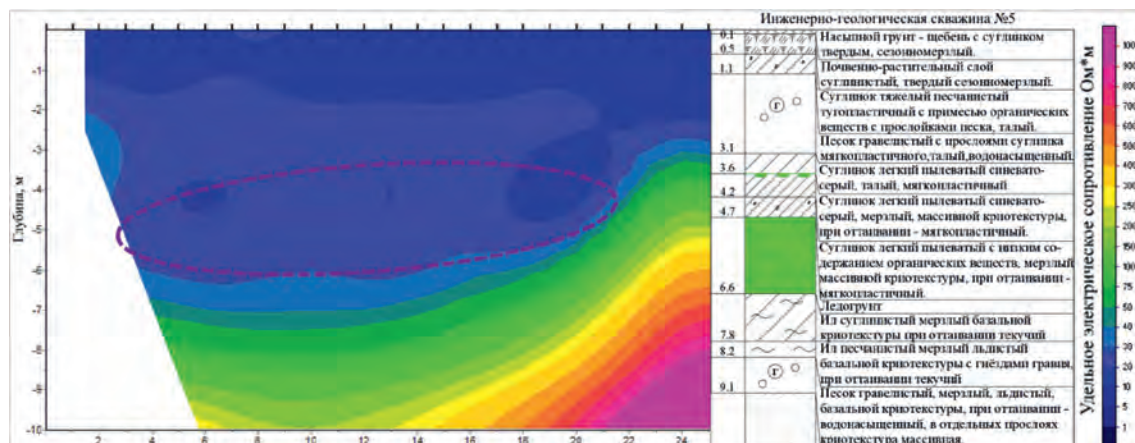


▲ Рис. 2. Фрагмент радарограммы по территории поста наблюдения (сверху антенный блок АБ-400, снизу АБ-150).

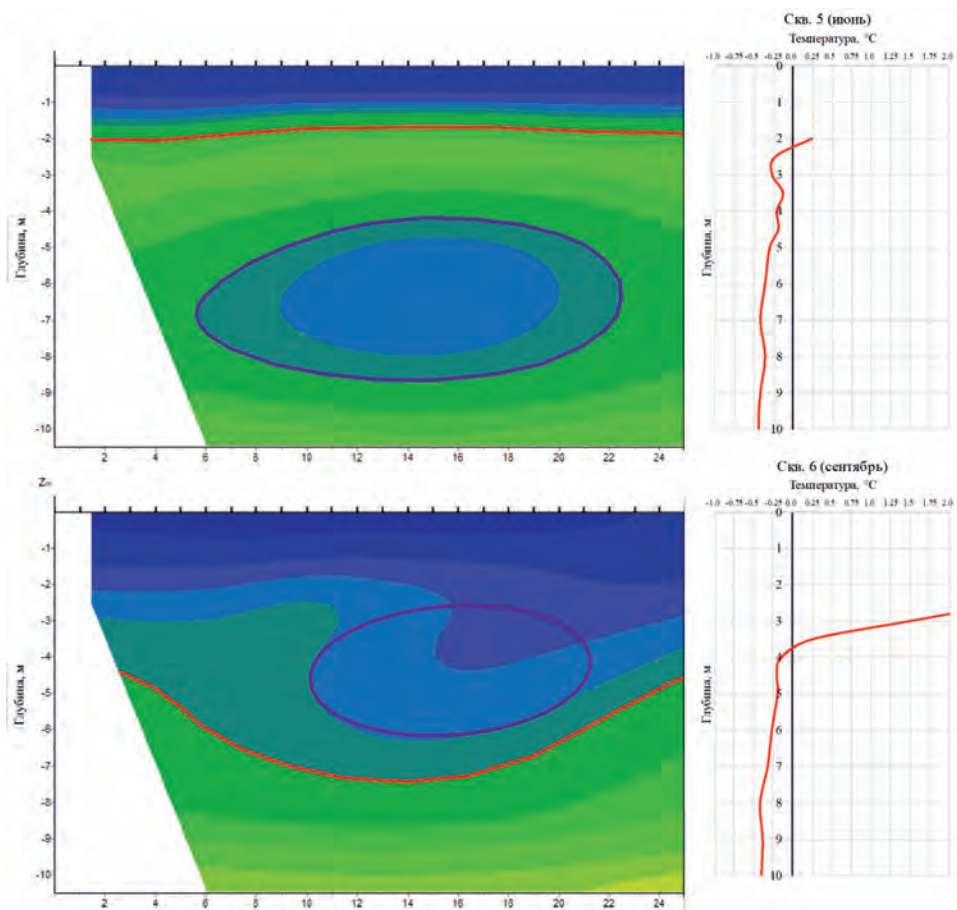
сопротивления (УЭС), тогда как мерзлые грунты обладают высокими показателями УЭС. Эта закономерность отчетливо прослеживается на фрагменте геоэлектрического разреза по профилю ПР-3 (рисунок 3), где результаты электротомографии совмещены с данными инженерно-геологической скважины №5. Высокоомная аномалия (более 1000

Ом·м) приурочена к интервалу залегания ледогрунта, вскрытого скважиной, при этом по разрезу УЭС прослеживается его локальное распространение. В левой части разреза (выделено фиолетовым пунктиром на рисунке 3) фиксируется зона пониженных значений УЭС, что позволяет предположить наличие талых грунтов в этом интервале.

▼ Рис. 3. Фрагмент разреза удельного электрического сопротивления по профилю ПР-3 в сопоставлении с инженерно-геологическими данными.



► Рис. 4. Фрагменты разрезов удельного электрического сопротивления по профилю ПР-2 с нанесенными данными термометрии скважин (сверху – работы выполнены в июне, снизу – в сентябре).



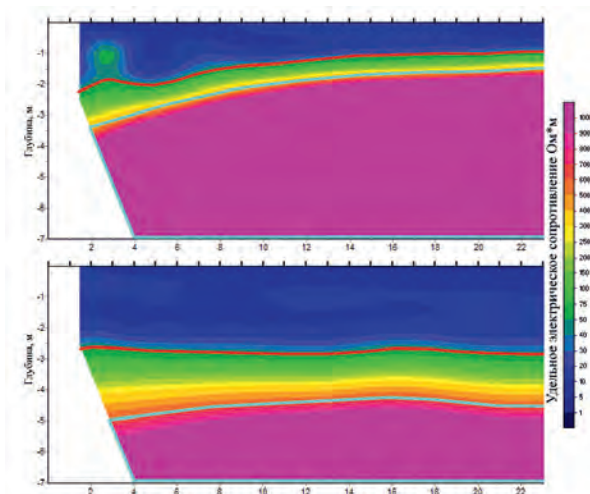
Результаты электротомографии, полученные в разный период года, наглядно иллюстрируют изменения УЭС в различных областях грунтового разреза (рисунок 4), что хорошо коррелируется с данными термометрии в скважинах. Следует отметить, что на разрезе УЭС, полученном в июле под сезонно-талым слоем (рисунок 4, красная линия), в толще многолетнемерзлых грунтов наблюдается зона с низкими значениями УЭС, характерными для таликовых зон (на рисунке 4 выделено фиолетовым).

Неравномерное распространение ММГ в разрезе подтверждается и данными, полученными в сентябре (рисунок 4, нижний разрез), из рассмотрения которых видно, что глубина залегания кровли ММГ изменяется от 4 до 7 м.

Отдельного внимания заслуживают результаты, полученные по профилю ПР-6, расположенному максимально близко к основанию насыпи автодороги. Следует

отметить, что на этом участке для предотвращения оттаивания грунтов основания насыпи на ее откосах предусмотрена каменная наброска. На разрезе по профилю ПР-6 (рисунок 5) четко видна граница сезонно-талого слоя (красная линия, между грунтами с УЭС в интервале 1–75

▼ Рис. 5. Фрагмент разреза удельного электрического сопротивления по профилю ПР-6 (сверху – работы выполнены в июне, снизу – в сентябре).



Ом*м), некая переходная зона (участок между красной и голубой линиями, с УЭС в интервале 75 – 400 Ом*м) и толща с УЭС более 1000 Ом*м, характерными для ММГ.

Учитывая относительную равномерность положения кровли ММГ, можно сделать вывод об эффективности применения каменной наброски на данном участке автодороги для сохранения грунтов в мерзлом состоянии.

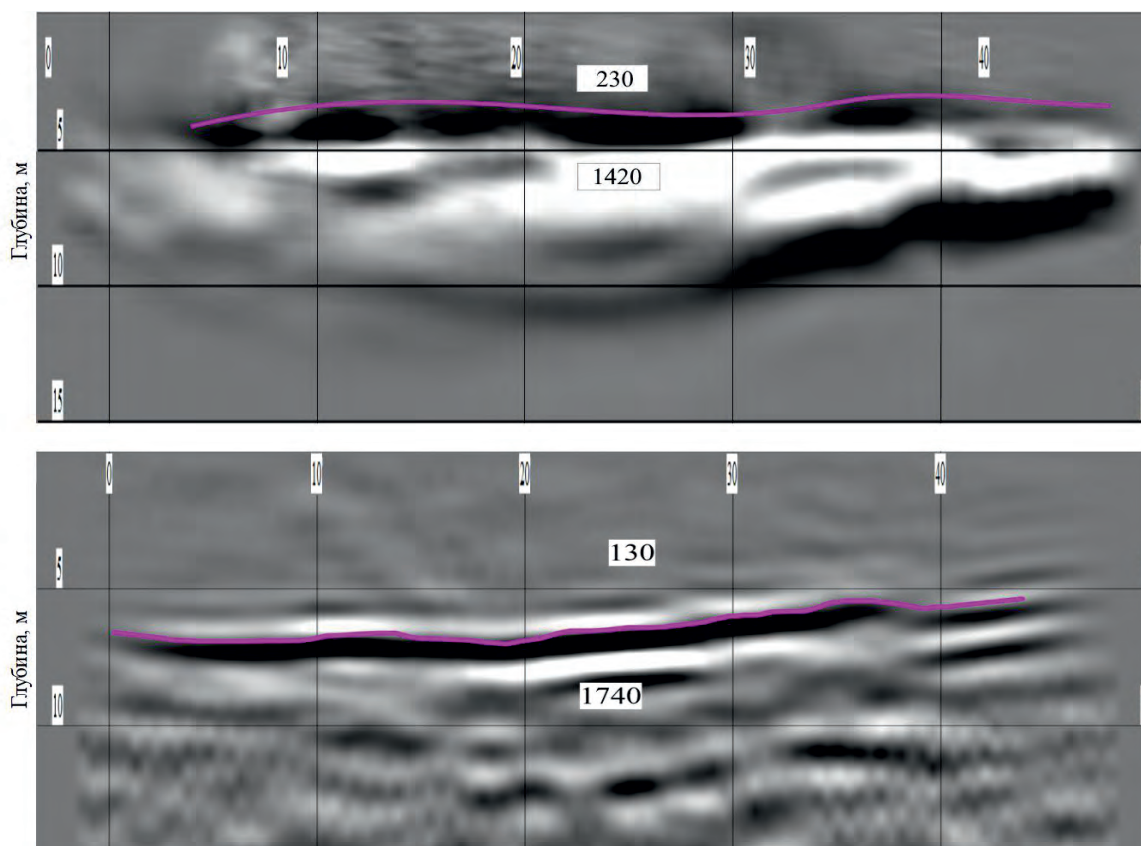
Сейсморазведочные работы выполнены с малым шагом приема, что позволяет повысить детальность расчленения разреза и точность определения скоростей целевых волн [4, 5]. Результаты сейсморазведки в целом коррелируются с данными электротомографии.

Однако вследствие ограничений метода МПВ-ОГП талые грунты, имеющие распространения в толще ММГ (по результатам электротомографии, рису-

нок 4), на соответствующих глубинных разрезах МПВ-ОГП не идентифицируются (рисунки 6).

Из вышеизложенного следует, что выполнение сейсморазведочных работ для целей сейсмического микрорайонирования в условиях неравномерного залегания кровли ММГ и наличия как сезонно-талых, так и сезонно мерзлых грунтов без привлечения данных электротомографии, может привести к существенной ошибке при построении сейсмогеологической модели, а также при последующих расчетах приращения сейсмической интенсивности и моделировании реакции грунтовой толщи на сейсмическое воздействие [3]. Поэтому выполнение работ по сейсмическому микрорайонированию на участках распространения многолетнемерзлых грунтов необходимо дополнять методом электротомографии.

▼ Рис. 5. Глубинный разрез МПВ-ОГП по профилю ПР-3 (сверху работы выполнены в июне, снизу выполнены в сентябре).



Выводы

Результаты выполненных исследований можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Метод георадиолокации следует применять как вспомогательный при благоприятных инженерно-геологических условиях либо для решения задач оценки состояния дорожного полотна или насыпи.

2. Метод электротомографии целесообразно использовать в качестве основного для решения геокриологических задач на подобных объектах. Именно электротомографию рекомендуется применять для мониторинга изменений инженерно-геологических и мерзлотных условий.

3. Результаты сейсморазведочных работ, выполненные в разные сезоны, предоставили информацию для более детального изучения вопроса о сезонности проведения подобных исследований и необходимости обязательного комплексирования с данными электроразведки. В дальнейшем планируется более подробное изучение вопроса повышения достоверности сейсмического микрорайонирования в криолитозоне.

4. Полученные результаты могут служить основой для разработки дополнительных мероприятий по более детальному мониторингу изменения инженерно-геологических и мерзлотных условий на аналогичных участках расположения постов наблюдения автодороги Р-297 «Амур» с применением комплекса инженерно-геофизических методов.

Литература

1. 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.
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: МГУ, 2005.
3. Кауркин М.Д., Кауркин В.Д. О необходимости разработки методики прогноза изменения сейсмичности на участках распространения многолетне-мерзлых грунтов. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 1 (84). С. 72-76.
4. Романов В.В., Кауркин М.Д., Андреев Д.О. Влияние шага приема на результаты преломленных волн в инженерной сейсморазведке. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 3 (86). С. 90-93.
5. Романов В.В., Кауркин М.Д., Крячков И.В., Бабуркин И.А. Опыт реализации инженерной сейсмической томографии со сверхмалым шагом приема. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 1 (84). С. 123-127.