

ГЕОРАДАРЫ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО «РЕНГЕНА» АРКТИЧЕСКИХ ДОРОГ

А. М. КУЛИЖНИКОВ,
д. т. н., профессор ФАУ «РОСДОРНИИ»

СТРОИТЕЛЬСТВО И СОДЕРЖАНИЕ ДОРОГ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ — ЭТО НЕПРЕРЫВАЮЩАЯСЯ БОРЬБА С РАСТЕПЛЯЮЩИМИСЯ ГРУНТАМИ, РАЗМЫВАМИ, НАЛЕДЯМИ И ПРОСАДКАМИ. СУЩЕСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА, ОСНОВАННАЯ НА РЕДКИХ ТОЧЕЧНЫХ ЗАМЕРАХ, НЕСПОСОБНА ПРЕДСКАЗАТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗВИТИЕ ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ. ОДНАКО ГЕОРАДАРНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ, АКТИВНО ВНЕДРЯЕМОЕ ФАУ «РОСДОРНИИ», ОБЕЩАЕТ СОВЕРШИТЬ ПЕРЕВОРОТ В ЭТОМ ВОПРОСЕ — ЗА СЧЕТ ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧИТЬ НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ И ТОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА.

В Российской Федерации продолжается активное освоение Арктической зоны. Строительство автомобильных дорог в данном макрорегионе сопряжено со значительными трудностями, обусловленными комплексом природно-климатических факторов, значительной удаленностью территорий от промышленных и экономических центров, а также многообразием и сложностью инженерно-геологических, гидрогеологических и мерзлотных условий.

В таких экстремальных условиях крайне сложно поддерживать надежность дорожных конструкций при эксплуатации, поскольку процессы тепломассообмена провоцируют развитие специфических криогенных процессов, связанных с деградацией многолетнемерзлых пород, формированием таликов, пластическими деформациями слабых водонасыщенных льдистых мерзлых грунтов, что проявляется в виде деформаций, просадок основания и размывов земляного полотна. Помимо этого, для районов распространения многолетнемерзлых грунтов типичен дефицит местных качественных дорожно-строительных материалов, а также преобладание в основании насыпей высокольдистых, слабых и переувлажненных грунтов.

В этих условиях ключевую роль в обеспечении долговременной устойчивости дорожных конструкций играет внедрение передовых технологий. ФАУ «РОСДОРНИИ» с конца прошлого века активно использует в дорожной отрасли инновационные георадарные технологии, доказавшие свою результативность и в условиях Арктики.

При значениях относительной диэлектрической проницаемости в интервале от 2 до 5 удельное электрическое сопротивление многолетнемерзлых пород чрезвычайно высоко, что обеспечивает значительную глубину радиолокационного зондирования. Проведение георадарных исследований наиболее эффективно в Арктической зоне даже в период отрицательных температур и в темное время суток. Высокопроизводительные неразрушающие непрерывные методы позволяют эффективно решать задачу по сохранению уникальной экосистемы Арктики.

Глубокие исследования по применению георадиолокационного метода на многолетнемерзлых грунтах проводили с конца прошлого века А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова, Л. Г. Нерадовский, К. О. Соколов и многие другие [1-7]. А. В. Омеляненко [1] выполнил исследования по применению георадаров в инженерно-геологических изысканиях с целью определения мощности и детального строения мерзлых рыхлых отложений, обнаружения и локализация подземных льдов, картирования таликов и криопэгов (имеющих отрицательную температуру подземных соленых вод).

Известны также георадарные исследования С. И. Голубина, И. В. Шишкина по обеспечению устойчивости газопроводов на многолетнемерзлых грунтах [8-9]. Детальные исследования и методика расчета дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах также выполнялись в прошлом столетии [10-11]. Но исследований по применению георадаров по решению обеспечению устойчивости дорожных конструкций ав-

томобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах, проведенных в период потепления климата, по всей видимости, недостаточно [12-14].

Проведенные исследования позволили прийти к выводу [14], что чем раньше будет создана система инженерно-геокриологического мониторинга, как это сделано на автомобильной дороге «Амур», тем она будет более надежной и безопасной, при этом значительно уменьшатся расходы по ее содержанию.

Следует отметить, что на сегодняшний день не оценено в требуемой степени влияние различных факторов (климатических, геологических, гидрогеологических, гидрологических, криогенных, рельефных и т. д.) на устойчивость дорожных сооружений на многолетнемерзлых грунтах и не выполнено их ранжирование.

В условиях современного изменения климата дорожные конструкции, в основном запроектированные и возведенные по I принципу, исключаящему протаивание многолетнемерзлых грунтов основания, в настоящее время функционируют в режиме, соответствующем II принципу, который допускает частичное оттаивание. Это приводит к потере устойчивости основания земляного полотна и просадкам дорожного покрытия. В связи с этим существует потребность на основе мониторинговых наблюдений научиться определять пространственно-временные изменения водно-теплового режима в годовом цикле, миграцию подземных надмерзлотных вод и прогнозировать возникновение деформаций дорожных конструкций для разработки адаптационных мер.

В РФ решение этой задачи реализуется Федеральным дорожным агентством силами своих подведомственных учреждений через оснащение участков автомобильных дорог метеорологическими станциями и постами мониторинга состояния дорожных сооружений, предназначенными для многолетнего периода наблюдений.

В настоящее время на мониторинговых постах фиксируются часовые и суточные изменения ряда параметров. В их числе — температура и относительная влажность воздуха, температура и объемная влажность грунта основания земляного полотна, атмосферное давление, скорость и направление ветра, количество осадков, метеорологическая дальность видимости, температура на поверхности дорожного покрытия, состояние поверхности дороги.

Кроме этого — температура дорожной одежды и грунта земляного полотна, объемная влажность материалов дорожной одежды и грунта земляного полотна, толщина слоя воды, льда и снега на поверхности, влажность грунта за пределами земляного полотна, плот-

ность теплового потока, уровень воды, температура и минерализация подземных вод. Также используются результаты дистанционного зондирования. Все эти параметры в большей степени относятся к фоновому мониторингу.

Однако замеры на проблемных участках чаще всего производятся по 1-3 поперечным профилям трассы в дискретных точках [15], и это не дает возможности получить детальную пространственную картину изменения водно-мерзлотного режима как по длине дороги, так и по ширине полосы отвода.

Восполнить недостаток информации между точками, количество которых ограничено из-за дороговизны датчиков, позволяют георадиолокационные технологии. ФАУ «РОСДОРНИИ» обладает многолетним успешным опытом применения инновационных неразрушающих георадарных технологий на дорожных объектах Арктического региона в Мурманской и Архангельской областях, Республике Коми и Бурятии, Ямало-Ненецком округе и Магаданской области [12, 17].

Перечислим ряд преимуществ применения георадарного оборудования на основе опыта ФАУ «РОСДОРНИИ».

1. Глубина промерзания и оттаивания дорожной конструкции и грунта определяется непрерывно по всей длине георадарного профиля (профили выполняются как в продольном, так и в поперечном направлениях), а не в отдельных точках.

Определение глубины промерзания, полученной при выполнении работ по поверхности земли на территории Ямало-Ненецкого округа при разведке запасов дорожно-строительных материалов, представлено на рис. 1 и фото 1.

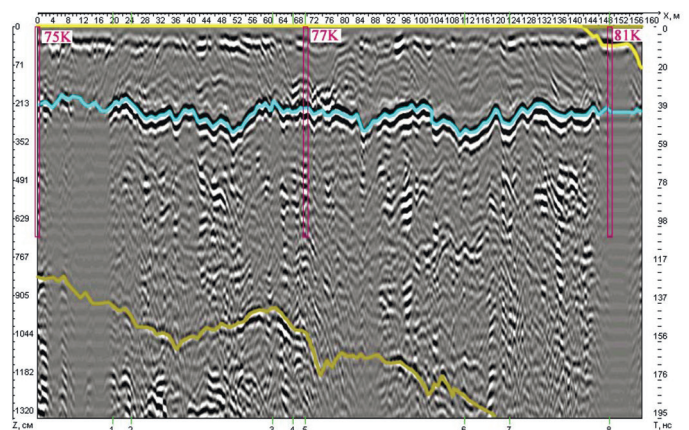


Рис. 1. Георадиолокационный профиль протяженностью 160 м на территории Ямало-Ненецкого округа. Голубым цветом — зафиксированная граница многолетнемерзлого грунта



Фото 1. Георадарные обследования на территории Ямало-Ненецкого округа контактными антенным блоком АБ-250

На данной радиограмме голубым цветом четко просматривается граница многолетнемерзлого грунта по всей длине георадарного профиля на глубине около 2–3 м.

2. Объемная влажность грунта определяется непрерывно по всей длине георадарного профиля по корреляционной кривой зависимости диэлектрической проницаемости грунта от объемной влажности.

Возможности определения объемной влажности грунта по диэлектрической проницаемости путем построения зависимости по результатам измерений в точках мониторинга указаны в работе [16]. Диэлектрическая проницаемость рассчитывается по известной глубине промерзания (оттаивания) в отдельных закрепленных мониторинговых точках.

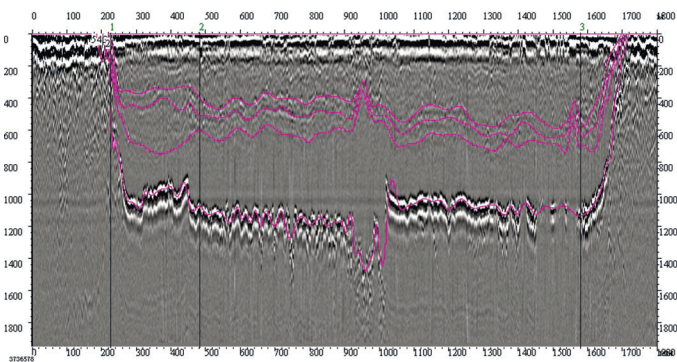


Рис. 2. Границы послойного намораживания льда (просматривается как минимум три границы) и низ естественного льда на ледовой переправе через р. Северную Двину граница многолетнемерзлого грунта

3. Толщина слоя льда, например, на участках наледей на поверхности также определяется не в отдельных точках, а непрерывно по всей длине георадарного профиля; таким же образом может быть определена толщина слоя воды на поверхности по всей длине георадарного профиля.

Пример определения толщины льда на реке Северной Двине в Архангельской области георадаром приведен на рис. 2, 3 и фото 2. Толщина льда составляет от 1,0 до 1,2 м (см. рис. 2), при этом на радарограмме просматриваются три границы намороженного рыхлосвязанного льда (сиреневые линии). На рис. 3 приведен фрагмент радарограммы, полученный по длине

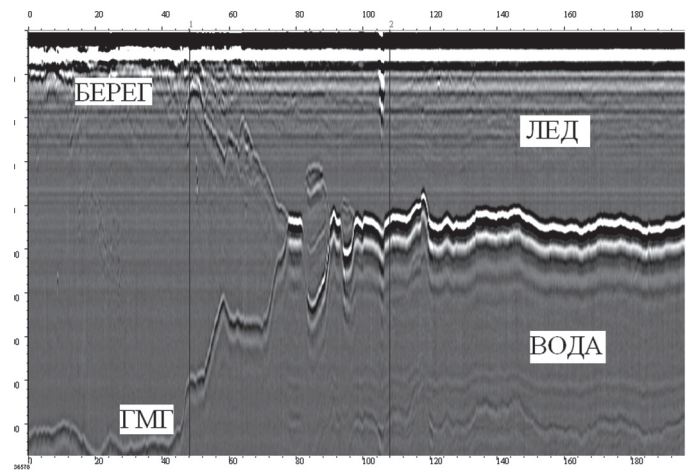


Рис. 3. Фрагмент определения толщины льда у берега Северной Двины с контрастной границей, разделяющей лед от воды



Фото 2. Георадарные обследования ледовой переправы через Северную Двину рупорным антенным блоком АБ-1700Р

ледовой переправы рядом с берегом, где четко просматривается граница сначала берегового, а затем монолитного льда и воды, контур берегового склона и граница мерзлого грунта (ГМГ) [17].

4. Состояние материалов и грунтов дорожной конструкции (наличие разуплотненных и переувлажненных зон) непрерывно контролируется по всей длине георадарного профиля. Профили выполняются как в продольном, так и в поперечном направлениях. Например, по радарограмме и зависимости изменения частоты сигнала по длине участка на рис. 4 можно определить геологическое строение и глубину залегания многолетнемерзлых грунтов, выявить местоположение ослабленных зон, выделенных синим цветом (они представляют собой участки переувлажненных и разуплотненных грунтов, обнаруженные на основе

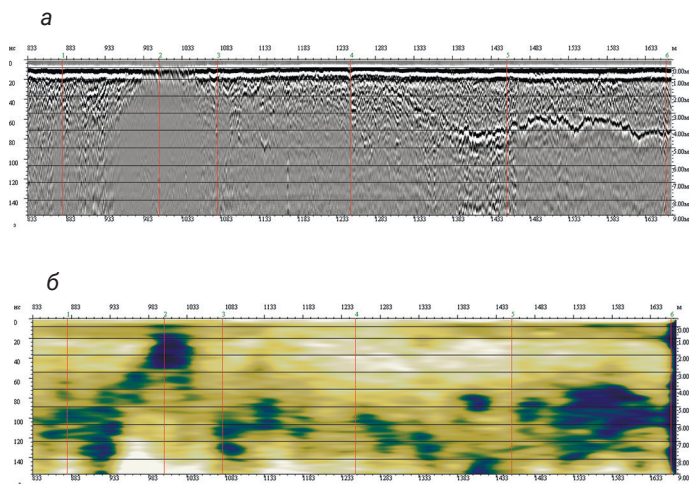


Рис. 4. Радарограмма участка автомобильной дороги «Колыма» (а), атрибутивный анализ по частоте сигнала полученной радарограммы (б)

частотного анализа сигнала), оценить мерзлотные и грунтово-гидрогеологические условия, а также по анализу полученных данных выявить причины нарушения устойчивости земляного полотна.

Георадарные исследования демонстрируют высокую эффективность в сочетании с мониторинговыми станциями. Точечные измерения глубины промерзания и оттаивания, объемной влажности и толщины льда предоставляют критически важную информацию для заверки данных георадарной съемки. Это позволяет распространить результаты георадарного сканирования, проведенного в разные сезоны, на всю длину исследуемых участков.

Рекомендуется использовать георадиолокацию в комплексе с данными дистанционного зондирования Земли, спутниковыми системами навигации (ГНСС), тепловизионной съемкой, электротомографией, цифровым моделированием, лазерным сканированием, а также с установкой геодезических реперов и датчиков деформаций и напряжений. Дополнительное оборудование, такое как лазерные сканеры, предоставляет возможность систематически измерять и отслеживать изменения геометрии земляного полотна и дорожных конструкций в двух- или трехмерном пространстве под воздействием транспортных нагрузок и климатических факторов, включая динамику мерзлотных процессов.

Вышеперечисленное позволяет перейти от фонового к комплексному геотехническому мониторингу, который включает в себя геодезические, параметрические, геофизические (георадарные), гидрогеологические и температурные (геокриологические) методы.

Георадары помогают решать пространственные задачи, такие как прогнозирование динамики промерзания и оттаивания грунтов, их влажности (включая миграцию поверхностных и подземных надмерзлотных вод), а также толщины льда. Это достигается путем круглогодичного мониторинга отдельных проблемных участков автомобильных дорог.

На основе данных георадиолокационных исследований и лазерного сканирования, проведенных на конкретную дату, можно создать пространственные цифровые модели рельефа, мерзлоты, кровли и подошвы каждого геологического слоя (включая наледи), а также уровня подземных надмерзлотных вод для всей площади проблемного участка (включая обочины и прилегающую территорию) [18].

В процессе мониторинговых исследований необходимо уделять особое внимание оценке уязвимости дорожных сооружений и рисков для их безопасной эксплуатации, включая перевозку пассажиров и грузов, с учетом климатических изменений на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов.

Обладая пространственными данными о положении многолетнемерзлых грунтов в пределах всей полосы отвода, мы получаем возможность не только прогнозировать и контролировать состояние дороги в наиболее критические периоды, но и своевременно назначать и проводить дополнительные мероприятия, направленные на предотвращение оттаивания грунтов основания и сохранение устойчивости земляного полотна.

Интенсификация георадиолокационного мониторинга эксплуатируемых автомобильных дорог и ледовых переправ, осуществляемая в течение нескольких лет,

позволит выявить ключевые факторы, влияющие на устойчивость дорожных сооружений, и точно определить адаптационные мероприятия для повышения их работоспособности в разнообразных природно-климатических, грунтово-геологических и мерзлотных условиях Арктической зоны.

В настоящий момент в качестве одного из условий дальнейшего развития логистики в данном регионе Федеральное дорожное агентство силами своих подведомственных учреждений проводит ряд мероприятий.

Перечислим основные из них:

1. Сбор данных с мониторинговых станций и разработка программного обеспечения для их обработки, систематизации и автоматизированного анализа. Выполнение анализа полученной информации.

2. Проведение диагностических и георадарных исследований на проблемных участках автомобильных

дорог, оборудованных геотехническими мониторинговыми станциями. Анализ полученных результатов.

3. Создание пространственных моделей изменений водно-мерзлотного режима на уязвимых участках дорог с использованием данных геотехнических мониторинговых станций, при различных конструктивных решениях (три принципа проектирования) и в разных инженерно-геологических и мерзлотных условиях для обеспечения устойчивости дорожных сооружений.

Полученные результаты исследований будут использованы для разработки или совершенствования нормативно-технической документации при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог, включая конструктивные решения для адаптации и повышения устойчивости дорожных конструкций к климатическим изменениям.

Литература

1. Омеляненко А.В. Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений. Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. М., 1989. — 17 с.
2. Федорова Л.Л. Разработка методики высокочастотного импульсного электромагнитного зондирования неоднородностей мерзлого горного массива. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 1999. — 20 с.
3. Омеляненко А.В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород. Автореферат дисс. на ... докт. техн. наук. Якутск, 2001. — 47 с.
4. Нерадовский Л.Г. Изучение состояния свойств мерзлых грунтов и криопэгов методом георадиолокации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2005. — 34 с.
5. Соколов К.О. Оценка строения массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, перекрытого электропроводящим слоем, методом георадиолокации. Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. Якутск, 2010. — 19 с.
6. Бричева С.С. Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации. Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2018. — 25 с.
7. Прудецкий Н.Д. Методика георадиолокационного картирования незатронутых термокарстом повторно-жильных льдов россыпных месторождений криолитозоны. Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. Якутск, 2024. — 19 с.
8. Голубин С.И. Научно-методические основы прогноза взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямал. Автореф. дис. на ... канд. геолог. минер. наук. М., 2012. — 23 с.
9. Шишкин И.В. Развитие методов оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах. Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. Ухта, 2014. — 23 с.
10. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Под ред. И. А. Золотаря и др. — М.: Транспорт, 1971. — 416 с.
11. Автомобильные дороги Севера / Под ред. И. А. Золотаря. — М.: Транспорт, 1981. — 247 с.
12. Кулижников А.М. Неразрушающие георадиолокационные методы мониторинга состояния автомобильных дорог и ледовых переправ в Арктической зоне // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3, С. 56-69.
13. Скрыльников И.Г. Проектирование и эксплуатация земляного полотна автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (с использованием теории риска) Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. — 21 с.
14. Кондратьев С.В. Деформации Забайкальской части федеральной автомобильной дороги «Амур» Чита-Хабаровск на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов: пучины и пути решения проблемы (на примере перехода через руч. Чичон). Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. Иркутск, 2016. — 22 с.
15. ОДМ 218.11.007-2023 «Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне».
16. Фомин С.В. Модели комплексной диэлектрической проницаемости минеральных почв для радиоволновых методов исследования Земли. Автореф. дис. на ... канд. физико-матем. наук. Красноярск, 2023. — 22 с.
17. Кулижников А.М. Георадиолокационные обследования ледовых переправ / Инженерные изыскания. № 8, 2016 — С. 22-29.
18. Кулижников А.М. Комплексное проектирование автомобильных дорог на основе пространственного моделирования: на примере Европейского Севера России. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Архангельск, 1998. — 37 с.

