

НОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Контроль качества возведения земляного полотна в дорожном строительстве традиционно опирается на точечные электромагнитные методы, штамповые испытания, статическое и динамическое зондирование. При этом в последние годы активно расширяется практика применения георадиолокационных методов непрерывного электромагнитного обследования, которые позволяют выполнять сплошной неразрушающий контроль состояния грунтов естественного основания и слоев земляного полотна. Однако имеющиеся технические требования к применению георадаров при таких обследованиях оставались недостаточными, а интерпретация результатов нередко зависела от субъективного экспертного чтения радарограмм. Это сформировало запрос на унификацию процедур и введение количественных критериев, позволяющих перейти от качественного анализа к автоматизированной обработке данных.

В рамках выполненной работы исследован практический опыт применения георадиолокационного обследования земляного полотна автомобильных дорог и обеспечена разработка документа по стандартизации, направленного на повышение качества контроля при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог общего пользования. Реализация проекта включала сбор исходных данных и углубленный анализ состояния проблемы, проведение опытно-экспериментальных георадарных работ на участках автомобильных дорог с подготовкой первой редакции проекта стандарта, доработку документа по замечаниям и предложениям Заказчика и рецензентов в рамках публичного обсуждения, а также организацию рассмотрения доработанной редакции в профильном техническом комитете и направление окончательной редакции в Росстандарт.

Сроки выполнения этапов работ соответствуют исходным данным:

- Первый этап выполнялся с момента подписания контракта до 04.12.2023;
- Второй этап продолжался с 05.12.2023 по 23.09.2024;
- Третий этап с 24.09.2024 по 22.05.2025;
- Четвертый этап с 23.05.2025 по 29.09.2025.

Целью НИОКР определено повышение качества контроля состояния грунтов естественного основания и слоев земляного полотна путем разработки документа по стандартизации. Для достижения цели выполнен анализ мирового опыта повышения эффективности контроля строительства земляного полотна, подготовлены новые методы обследований и проведена их апробация в рамках экспериментальных исследований, разработаны нормативные требования к методам обследования грунтов основания и слоев земляного полотна по результатам научного обоснования, обеспечено сопровождение проекта стандарта до момента утверждения с учетом результатов публичного обсуждения. Отдельно подчеркнуто, что георадарная технология обследования автомобильных дорог в России прошла основные вехи развития и находится на стадии промышленного применения. Сплошной неразрушающий контроль с использованием георадаров позволяет снять ограничения традиционных методов, основанных на точечной информации о свойствах и состоянии грунтов.

При этом интерпретация результатов обследования базируется на количественном анализе атрибутов георадарного сигнала, связанных с физико-механическими свойствами грунтов, что снижает экспертозависимость. Разрабатываемые подходы не подменяют и не отменяют действующие традиционные методы и нормативные требования, включая ГОСТ 32731, ГОСТ Р 59864.1 и СП 78.13330.2012, а рассматриваются как дополнительные инструменты операционного контроля устройства земляного полотна.

Научно-методическая база работы сформирована на основе **анализа более 150 отечественных и зарубежных научных публикаций** и нормативно-технических документов по современным методикам обследований грунтов земляного полотна и естественного основания, а также по определению физических свойств грунтов. В результате определены **задачи, наиболее эффективно решаемые георадиолокацией**. К ним относятся определение толщины слоев земляного полотна, литологических границ слоев естественного основания, уровня грунтовых вод, а также ряда границ до глубины порядка 12-15 м; выявление участков оттаивания, границы сезонно-мерзлого слоя и участков неоднородностей в грунтах основания, включая картирование линз торфа, включений прослоев суглинисто-глинистых грунтов и участков распространения карстово-суффозионных процессов; выявление локальных неоднородных включений в грунтах земляного полотна, таких как мерзлые комья, линзы льда, валуны и другие. При этом отмечено, что значительная часть исследований посвящена **определению влажности**, тогда как работ по оценке **плотности грунтов земляного полотна** меньше, и этот дисбаланс требовал устранения.

Для унификации количественной интерпретации закреплены ключевые термины, включая **атрибутный анализ георадарных данных, максимум амплитуды, спектральную частоту** и понятие **ослабленной зоны** как локального участка земляного полотна и или основания, характеризующегося снижением прочностных и деформационных характеристик грунтов по сравнению с характерными свойствами среды, вызванным изменением физических свойств грунтов под воздействием природных и техногенных факторов. Введены и определены типы ослабленных зон, включая *обводнение, переувлажнение и разуплотнение*.

Организация работ предусматривает обследование грунтов естественного основания до проведения основных работ по строительству земляного полотна, а георадиолокационное сканирование выполняется в рамках операционного контроля при устройстве каждого слоя. В документе предусмотрены рекомендации по автоматизированной обработке и интерпретации данных, при этом результаты георадарного обследования подлежат выборочной проверке традиционными разрушающими полевыми и или лабораторными методами.

В части требований к оборудованию определены диапазоны центральных частот георадара в зависимости от вида работ:

- при обследовании естественного грунтового основания 50–700 МГц;
- при операционном контроле при толщине слоя до 30 см 300–700 МГц;
- при толщине слоя от 30 см и более 100–500 МГц.

Установлено, что максимальная мощность слоя грунта, подлежащего уплотнению и обследованию с помощью георадара, не может превышать 100 см. Координатная привязка выполняется с использованием геодезического оборудования, соответствующего ГОСТ 32869-2014; требования к оборудованию геофизических исследований и аппаратуре обработки данных учтены по ГОСТ 32868-2014 и ГОСТ Р 58349-2019. Допускается применение импульсных георадаров с фиксированной центральной частотой, систем с пошаговой перестройкой частоты с измерением амплитуды и фазы волн в широком диапазоне частот, а также систем с линейно-частотно модулируемым сигналом.

Для определения пространственного положения ослабленных зон установлены рекомендуемые диапазоны частот в зависимости от глубины зондирования:

- до 3 м 400–700 МГц;
- от 3 до 6 м 200–400 МГц;
- от 6 до 10 м 100–200 МГц;
- от 10 м 50–100 МГц (с учетом пункта 4.12).

Расстояние между продольными георадарными профилями задается по категории дороги:

- для дорог I категории 10–12 м;
- для II–III категорий 6–8 м;
- для IV–V категорий не более 5 м.

Обследование основания земляного полотна выполняется сетью продольных и поперечных профилей в пределах полосы отвода, при этом на каждом выявленном участке ослабленной зоны выполняют съемку не менее трех поперечных профилей с выходом за границу ослабленной зоны на 3 м.

Количественные геофизические признаки ослабленных зон сформированы с учетом подкласса грунта по ГОСТ 33063. Для связных грунтов разуплотнение характеризуется увеличением максимума амплитуды на 15–20% и увеличением удельного электрического сопротивления в 1,5 и более раз по отношению к средним значениям в исследуемом диапазоне глубин; переувлажнение увеличением максимума амплитуды более чем в 2–2,5 раза и снижением спектральной частоты более чем в 3 раза по отношению к центральной частоте антенны; обводнение снижением максимума амплитуды сигнала не менее чем на 40% по отношению к средним значениям. Для несвязных грунтов разуплотнение определяется увеличением максимума амплитуды на 20–25%, а обводнение снижением спектральной частоты более чем на 30% по отношению к центральной частоте антенны.

Метод контроля замены непригодного грунта представляет собой симбиоз геодезической съемки и георадарного обследования естественного основания.

Геодезический метод - определение:

а) геометрических размеров в плане котлована заменяемого грунта, а также местоположения створов прохода георадара;

б) мощности заменяемого грунта в местах калибровки георадарных данных.

Георадиолокационный метод - обследование искусственного грунтового основания в пространстве между точками геодезической съемки:

- **Обследование георадиолокационным методом** - выполнение работ антенными блоками по сети профилей, выполненных проходами поперек участка обратной засыпки (на ширину слоя обратной засыпки)
- **Количество поперечных профилей** должно составлять не менее 3-х, расстояние между ними - не более 10 м
- **При проведении георадиолокационной съемки** следует предусмотреть на каждые 50 м на участках замены непригодного грунта не менее одного пересечения георадарного профиля с калибровочной точкой

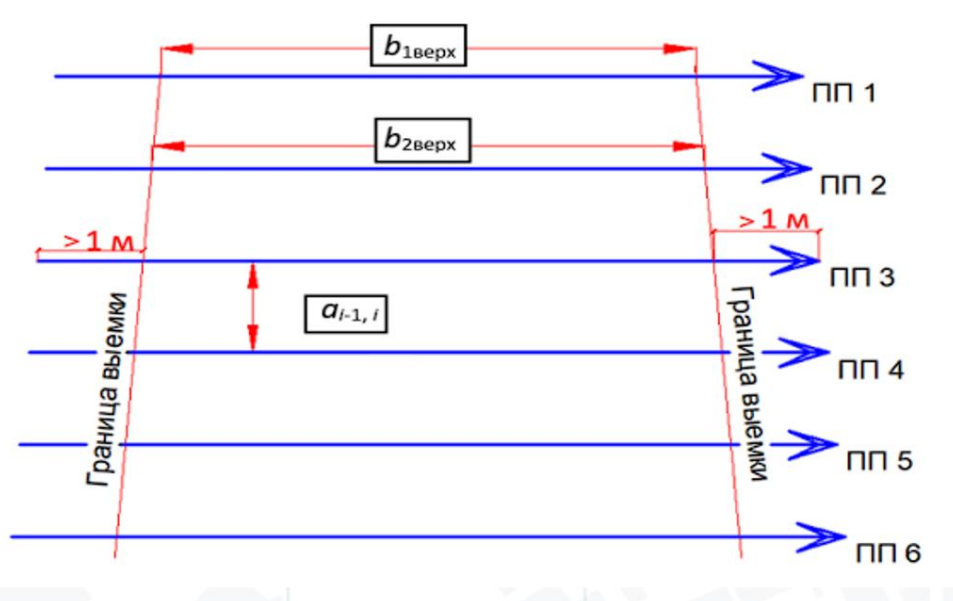


Рисунок 1 - Схема расположения поперечных георадарных профилей (вид сверху)

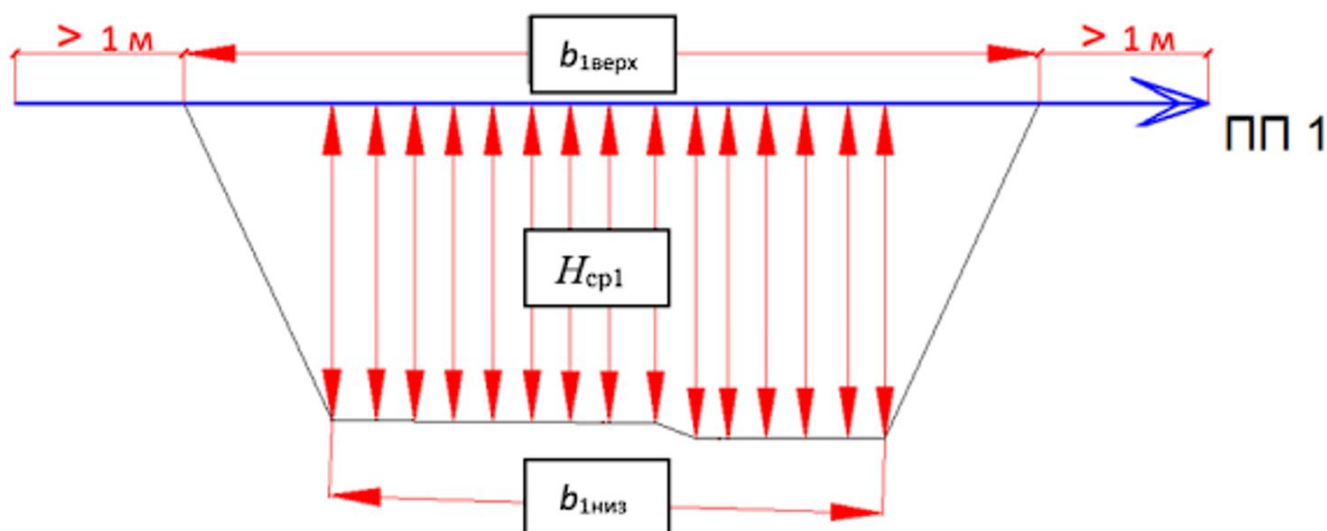


Рисунок 2 - Схема выполнения поперечного георадарного профиля (вид в профиле)

Для контроля содержания и размера мерзлых комьев и неоднородных включений метод рекомендуется применять в рамках операционного строительного контроля по ГОСТ 59864.1 при строительстве из мерзлого грунта. Оценку выполняют до уплотнения слоя. Георадиолокационную съемку выполняют по сети параллельных продольных профилей, равномерно распределенных на всю ширину земляного полотна от оси трассы; количество профилей должно быть не менее трех, расстояние между ними не более 5 м. Поперечные профили записывают на участках, где по результатам предварительной обработки продольных профилей выделены скопления мерзлых комьев, при этом на каждое выявленное место скопления предусматривается по одному поперечному профилю для визуального подтверждения. Установлено ограничение: размер мерзлых комьев в насыпях не должен превышать двух третей толщины уплотняемого слоя и не более 15 см для грунтовых оснований и 30 см для прочих насыпей. Определение размера включений увязано с частотой антенного блока: при 200–300 МГц контрольными считаются размеры более 15 см при толщине слоя до 30 см и более 30 см при толщине слоя 30–50 см; при 400–500 МГц более 10 см для обоих диапазонов толщины слоя.

Метод георадиолокационного обследования однородности по типу и разновидности грунтов по геофизическим признакам рекомендован для применения в рамках операционного строительного контроля по ГОСТ 59864.1 при использовании грунтов из разных источников, при этом использование разных видов грунтов в одном слое регламентируется ГОСТ Р 58397–2019. Обследование выполняется сетью продольных профилей по всей ширине насыпи до начала уплотнения слоя. На участках, определенных по результатам предварительного качественного анализа данных, выполняют не менее трех поперечных профилей на всю ширину земляного полотна с шагом не менее 5 м между профилями. Количественным признаком изменения однородности считается изменение одного из выбранных для расчета атрибутов, максимума амплитуды или спектральной частоты, более чем на 25% для разных типов и разновидностей грунта.

Метод определения плотности (коэффициента уплотнения) грунтов рекомендован для предотвращения неоднородности плотности и применяется в рамках операционного строительного контроля по ГОСТ 59864.1. Продольные георадарные профили на длину участка захватки, но не менее 100 м, выполняются по оси каждой полосы движения сразу после первого и завершающего проходов уплотняющей техники. Первый и завершающий проходы выполняются при влажности грунтов устроенного слоя, соответствующей ГОСТ Р 59864.1–2022 (пункт 5.2.1). Уплотнение оценивается по изменению среднего значения максимума амплитуды в пределах толщины устраиваемого слоя. В качестве критериев установлено снижение среднего значения максимума амплитуды между первым и завершающим проходами не менее 15% для дисперсных грунтов и не менее 20% для крупнообломочных. Допускается сокращение объемов определения плотности, при этом расстояние между двумя соседними точками контроля в продольном направлении допускается до 100 м независимо от высоты насыпи. При отсыпке из скальных (крупнообломочных) грунтов коэффициент уплотнения не оценивается, а контроль ведется по показателям деформативности в соответствии с ГОСТ Р 59866.

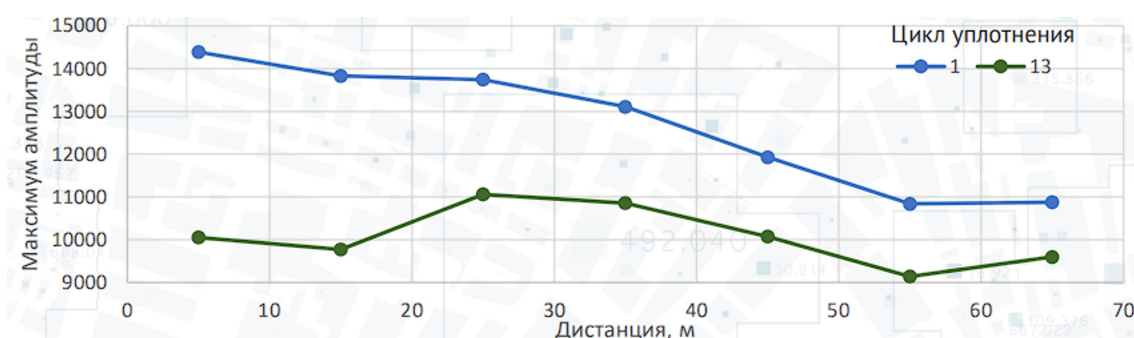


Рисунок 3 - График изменения «максимума амплитуды» в зависимости от количества циклов уплотнения



Рисунок 4 - Зависимость амплитуды сигнала георадара от плотности грунта с учетом количества проходов катка

В приложении А предусмотрено техническое задание на проведение 18 георадиолокационных обследований. Общий состав работ по строительному контролю при новом строительстве, реконструкции или капитальном ремонте участка автомобильной дороги указан в ГОСТ 32731-2014; георадиолокационное обследование земляного полотна предлагается выполнять в дополнение к требованиям указанного стандарта, а состав дополнительных работ по методам георадарного обследования приведен в таблицах А.1 и А.2 приложения А.

По результатам работы разработан проект ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Земляное полотно. Георадиолокационные методы обследования», включающий требования к методам цифрового георадиолокационного обследования грунтов естественного (искусственного) основания и земляного полотна при послойном устройстве на основе количественного атрибутивного анализа.

Разработка новых методов позволяет заполнить пробелы в нормативной технической документации и на основе новых количественных показателей обосновать критерии качества возведения земляного полотна автомобильных дорог. Это обеспечивает максимальное снижение риска деформаций дорожных одежд и земляного полотна по завершении строительства за счет повышения качества подготовки основания и локализации ослабленных зон грунта естественного основания. Также формируются новые инструменты всестороннего контроля устраиваемых слоев земляного полотна за счет сплошного неразрушающего контроля однородности свойств грунтов по плотности (коэффициенту уплотнения), контроля отсутствия неоднородных включений недопустимого размера и недопустимости наличия смерзшегося грунта при зимней отсыпке и при последующем устройстве дорожной одежды.

Отдельно предусмотрено формирование более эффективных подходов оценки соответствия возведенного земляного полотна за счет непрерывного охвата полной протяженности с заданным шагом от нескольких сантиметров до одного метра на всю мощность земляного полотна. Предлагаемые методы георадиолокационных работ на основе количественных атрибутивных показателей позволят повысить качество контроля дорожно-строительных работ, устойчивость земляного полотна в период эксплуатации, обеспечат соблюдение межремонтных сроков службы и увеличат надежность дорожных конструкций.

Автор: Еремин Роман Александрович, кандидат технических наук,
заместитель начальника управления методов проектирования
автомобильных дорог ФАУ «РОСДОРНИИ»
Редактор: Редакция журнала «Jolshy» (Вестник КаздорНИИ)