МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт естественных наук
Кафедра географии, картографии и геоинформатики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

НА ТЕМУ

ИЗЫСКАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ГЕОРАДАРА ГРТ-11К»

Работу выполнила студент группы ОБ-05.03.03-41
Бронников Иван Викторович /_____/

Научный руководитель: к. г. н., доцент кафедры географии, картографии и геоинформатики
Перевощиков Александр Анатольевич /_____/

Зав. кафедрой географии, картографии и геоинформатики,
к.г.н., Сидоров Валерий Петрович

_____
(решение о допуске)

_____
(подпись)

«___» _____20___г.

Ижевск - 2026 г.

ВКР УдГУ

Оглавление

Введение 3

Глава 1. Георадиолокации и георадиотомографии

1.1. Теоретические основы Георадиолокации 5

1.2. История развития и применение георадарных технологий 9

1.3. Принципы работы георадара и георадиотомографа 13

Глава 2. Георадар (георадиотомограф) ГРТ-11К

2.1. Устройство Георадара ГРТ-11К 17

2.2. Работа с программным обеспечением: GeoLocator, GeoViewer, GeoReader 20

Глава 3. Технические особенности и перспективы развития георадиотомографии

3.1. Преимущества и ограничения применения георадара 25

3.2. Перспективы развития и инновации в области георадиолокации 26

Глава 4. Практическое применение георадара в инженерных изысканиях

4.1. Основные задачи инженерных изысканий с использованием георадара 28

4.2. Методология проведения георадиолокационных исследований 29

4.3. Авторский надзор по оценке фектического уплотнения отсыпки кустовой площадки нефтяного месторождения с помощью георадара 31

Список использованной литературы 38

Приложение 44

ВКР УлГУ

Введение

В нынешних реалиях инженерные изыскания сталкиваются с растущими требованиями к точности, оперативности сбора данных о состоянии коммуникаций, конструкций, сооружений и грунтов.

Высокая плотность строительства, реконструкция существующих зданий и нужда сократить вмешательство в уже имеющиеся объекты, сопряженное с их частичным разрушением, вынуждают искать методы, способные давать детальную картину без нарушения поверхности. Среди таких способов георадиотомография выделяется способностью регистрировать положение составляющих среды и обнаруживать неоднородности в глубине благодаря распространению электромагнитных импульсов и последующей регистрации и обработки, отраженных от среды сигналов.

Применение георадара позволяет выявлять отличие среды с одними электрофизическими характеристики от другой, участки: пустоты, зоны повышенной влажности, имеющиеся подземные сооружения или инженерные коммуникации, которые изыскания с помощью других технических средств фиксируют лишь точечно, либо не фиксируют вовсе.

В отличие от сейсмических или электрических методов, этот способ обеспечивает непрерывный профиль и относительно высокую разрешающую способность при разумных затратах времени. Однако эффективность напрямую зависит от правильного выбора частотного диапазона антенн, учета диэлектрических свойств среды и качества последующей интерпретации.

Цель данной работы состоит в освоении Георадара ГТР-11К и проведении инженерно-геодезических изысканий с его помощью.

Для этого следует выполнить следующие задачи:

1) Раскрыть теоретические основы георадиолокации и георадиотомографии.

2) Освоить георадар ГРТ-11К и программное обеспечение.

ВКР УлГУ

3) Определить технические особенности и перспективы развития георадиолокации.

4) Установить основные задачи инженерных изысканий с помощью георадара, методологию проведения работ и провести работы.

Объектом исследования данной работы, является авторский надзор по оценке фактического уплотнения отсыпки кустовой площадки нефтяного месторождения с помощью георадара.

Предметом исследования являются методика выполнения работ с помощью георадара и обработки данных изысканий.

ВКР УДГУ

Глава 1. Георадиолокации и георадиотомографии

1.1. Теоретические основы

Георадиолокация — это геофизический метод неразрушающего контроля основанный на излучении электрического сигнала в зондируемую среду и регистрации отражённых сигналов (Рис. 1) от границ раздела сред с различными электрофизическими свойствами [1, с. 6].



Рис. 1. Распространение электромагнитного сигнала [24].

Излучаемая антенной электромагнитная волна проходит через среду, скорость прохождения зависит от диэлектрической проницаемости материала, а затухание определяется проводимостью.

Скорость распространения электромагнитных волн в воздухе практически равна скорости света в 300 000 км/с, соответственно в грунтах и горных породах она меньше. В отличие от воздушной радиолокации, здесь среда так же неоднородна по составу, плотности и влажности, поэтому отражение происходит как от от крупных объектов, так и тонких прослоек или трещин [2, 8].

Чем выше частота зондирующего сигнала, тем лучше разрешение, однако глубина проникновения при этом быстро падает (Рис. 2.). На практике для обследования фундаментов чаще используют антенны настроенные на частоты 200–500 МГц, а для поиска коммуникаций на небольшой глубине – 800–1000 МГц [1, 6].

ВКР УлГТУ

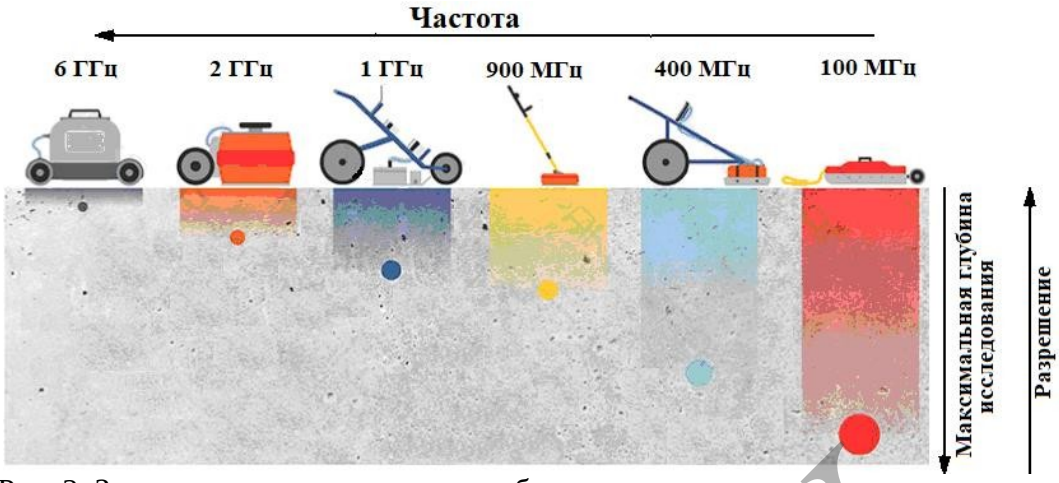


Рис. 2. Зависимость разрешения и глубины распространения электромагнитных волн георадаров в зависимости от частоты излучаемого сигнала [25]

Георадиотомография строится на обработке множества профилей, полученных вдоль параллельных или пересекающихся линий (Рис. 3.). Каждый профиль представляет собой набор трасс, где время запаздывания сигнала преобразуется в глубину с учётом средней скорости распространения.

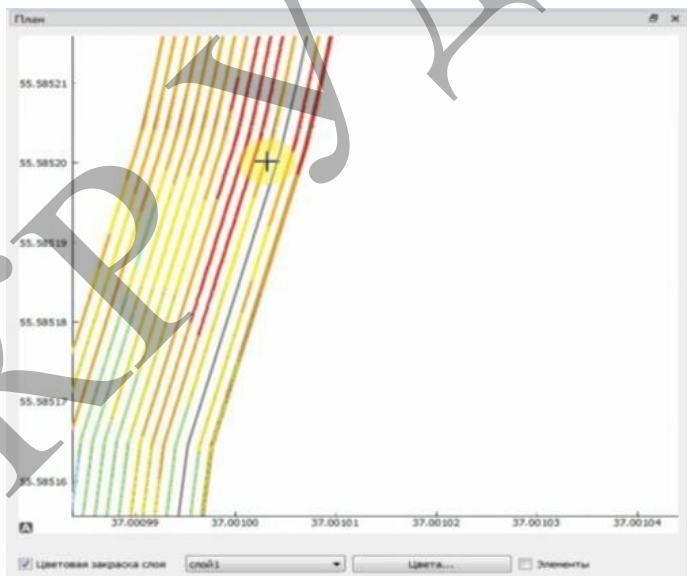


Рис. 3. Окно просмотра позиционирования треков [4]

Для создания объёмной модели применяют миграционные алгоритмы и инверсию данных, позволяющие уточнить положение границ и оценить относительные изменения диэлектрической проницаемости. Такой подход помогает выявить, неоднородстости в среде, например зоны повышенной влажности или пустоты за кирпичной кладкой, где обычный профиль может давать неоднозначную картину [1, 6].

ВКР ЛГУ

«Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике зависит от его диэлектрической и магнитной проницаемостей, однако, для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учетом этого, фазовая скорость распространения волны будет:

$$\mathbf{V} = \mathbf{c} / \mathrm{Re}\sqrt{\varepsilon} = \mathbf{c} / \sqrt{\varepsilon'},$$

где **c** - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку

V - измеряемая величина, а **ε′** - свойство вещества.

При этом коэффициент затухания будет:

$$\alpha = (\omega / \mathbf{c})\ \mathrm{Im}\sqrt{\varepsilon};$$

Длина волны в среде будет равна:

$$\lambda = \mathbf{c} / \omega\sqrt{\varepsilon'};$$ »[8, 2, с. 14].

Поэтому скорость волны в грунте редко бывает постоянной. В песчаных отложениях она может достигать 0,17 м/нс, а в глинистых или насыщенных водой – снижаться до 0,07 м/нс. Поэтому перед томографической реконструкцией проводят калибровку по известным объектам или используют метод общей средней точки. Без такой корректировки горизонтальные границы смещаются по глубине, а вертикальные объекты кажутся наклонёнными [2, 3].

Таблица 1.

Основные электрические характеристики почв и пород [3. Таблица 1.1, с. 15-16].

Тип	Влажность %	ε	Затухание Г [дб/м]	Затухание [разы/м]	Скорость Vф [см/нс]	Задержка отраж. сигнала [нс/м]	Примечание
Пески разнозернистые	0	3.2	0,05	≈ 1	17		МГУ (Ф95)
	4	5	1.8	1,2	13		
	8	7	3.5	1,5	11		
	12	11	5.3	1,8	9		Лит-ра, МФТИ, Ф 77)
	16	15	6.5	2,1	8		
Суглинок серый	0	3,2	0.1	1,01	17	12	
	5	4,8	9,9	3,1	14	15	
	10	7,0	15,5	6,0	11	18	
	20	14,7	26	20	8	26	

ВКР УлГУ

Продолжение Таблица 1.

Основные электрические характеристики почв и пород [3. Таблица 1.1, с. 15-16].

Суглинок каштановый	0	3,2	0,1	1,01	17	12	
	5	4,0	3,2	1,4	15	13	
	10	6,5	4,6	1,7	12	17	
	20	10	10,8	3,5	10	21	
Глина	0	2,4	0,3	1,04	19	10	МФТИ
	4	5,4	23	14,1	13	16	
	8	8	27	22,4	11	19	
	12	12	40	100	9	23	
	16	18,6	53	447	7	29	
Известняк	0	8	0,5	1,06	11	19	Ф77
	Влажный	8	14	5	11	19	Ф95
Доломит		6,7	0,6	1,07	12	17	
Чернозем (Юг Липецкой обл.)	0	3,7	7	2,2	16	13	Чубинский (для 250Мгц)
	5	6,2	17	7,1	12	17	
	10	10	27	22,4	9	22	
	15	14	36	63	8	26	
	20	22	60	1000	6	32	
Каменный уголь		4-6	1-5	1,1-1,8	15-12	13-17	Ф94
Торф мокрый		62-69	3-10	1,4-3,2	4	50	Ф94
Гранит влажный		5	0,6		13	15	Ф94
Базальт влажный		8	5,6		11	18	
Бетон (500Мгц)	0	3.7	4.5	1,7	16	13	
	5	5.5	19.3	9,2	13	15	
	10	7.0	84	16000	11	18	
Вода пресная		81	0,18	1,02	3,3	61	
Вода морская		81	330	$3{,}6 \cdot 10^{16}$	1,5	133	
Мерзлый суглинок	-	16	0,9	1,1	8	27	Ф 77
Мерзлый песок		4.5	0.8	1,1	14	14	Ф 77
Снег сухой		1,2-2,8	0,01	1	18-27	7-11	Ф94 ($\acute{\varepsilon} = 10^{-4}, 10^{-2}$)
Снег мокрый		2-6			12-21	10-17	Ф94 ($\acute{\varepsilon} = 10^{-3}$….1)
Лёд пресный (- 10°С)		3.3	0,01-0,5	1-1,07	17	18	Ф77
Лёд морской (- 15°С)	Соленость 5	8,1	20,0	10	10	20	Ф77
	12	7,7	20,3	10	10	20	
Лёд морской (- 25°С)	Соленость 5	6,7	7,8	2,5	12	17	Ф77
	12	4,4	12,2	4,1	14	17	

ВКР ЧГУ

Активация Windows
Чтобы активировать Windows, перейдите в ра

В инженерной сфере важно учитывать влияние металлических элементов конструкций (Рис. 4), арматурных каркасов. Они дают яркие отражения и множественные реверберации, которые маскируют расположенные за неоднородности ними от сигналов. Современные программы подавления таких помех позволяют отчасти компенсировать это, восстановить картину, но полностью устранить искажения удаётся не всегда.

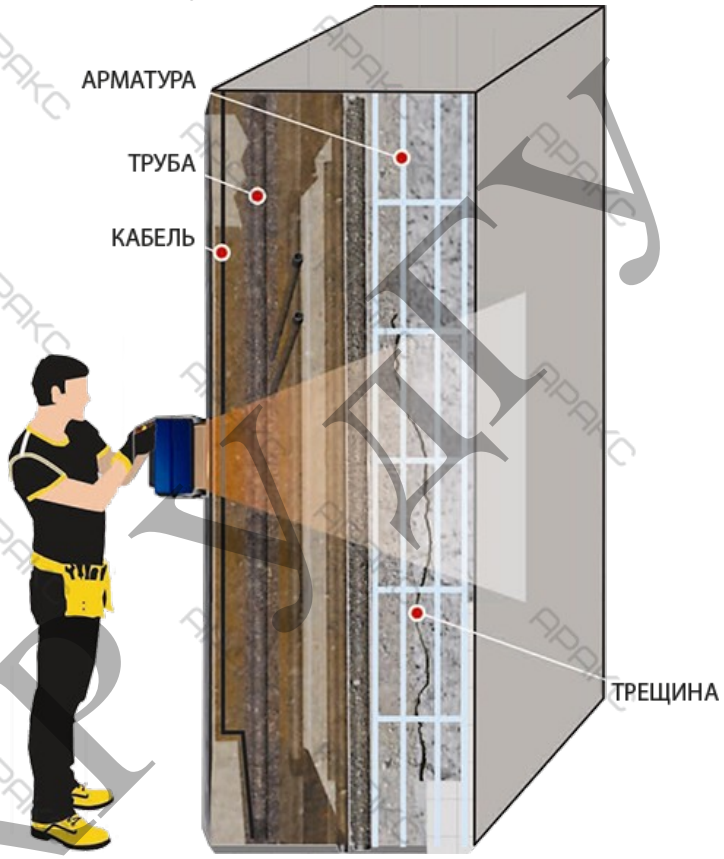


Рис. 4. Иллюстрация обследования элемента строения при помощи георадара [24]

В то же время георадиотомография даёт преимущество при обследовании железобетонных плит перекрытий, где требуется оценить толщину защитного слоя бетона и положение металлических частей без нарушений целостности конструкции [9, 13].

При переходе от двухмерных разрезов к трёхмерным моделям данных, за счет множества треков-разрезов, объём вычислений увеличивается, однако растет и итоговая информативность.

Появляется например возможность проследить направление трещин в теле плотины, определить зону повышенного увлажнения или оценить пустоты,

ВКР ЮГУ

протяжённость зоны разуплотнения под подошвой фундамента или полотна дороги. Важно, что результаты зависят не только от качества аппаратуры, но и от плотности сети профилей. Слишком редкая сетка приводит к потере мелких объектов, а избыточно густая увеличивает время съёмки и последующей обработки [1].

Влажность грунта оказывает решающее влияние на затухание сигнала. После сильных дождей или при высоком уровне грунтовых вод глубина зондирования может сократиться в два-три раза. Поэтому при планировании работ на объектах с переменным гидрологическим режимом учитывают сезонные условия и при необходимости переносят съёмку на более сухой период. Кроме того, наличие солей в почве повышает проводимость и дополнительно поглощает энергию импульса, что особенно заметно вблизи дорог, обработанных антигололёдными реагентами [2, 3].

Теоретическая база георадиотомографии продолжает развиваться в направлении совместной интерпретации с другими геофизическими методами. Например, сочетание с электротомографией позволяет разделить влияние влажности и литологического состава, поскольку электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость по-разному реагируют на одни и те же факторы. Такие комбинированные подходы уже применяют при обследовании исторических зданий, где требуется минимальное вмешательство в конструкцию [9, 12].

ВКР УлГУ

1.2. История развития и применение георадарных технологий

Начало георадарных технологий уходит корнями в первые эксперименты с радиоволнами. Возможность «просвечивания» горных пород с помощью радиоволн установлена еще в 1910-1911 гг. немецкими учеными Г. Лови и Г. Леймбахом. Ими же в 1912 г. предложен интерференционный метод для поиска руд и воды с помощью радиопросвечивания [3, с. 3].

В те годы разработки носили скорее лабораторный характер, а практическое использование ограничивалось военными нуждами, такими как обнаружение подземных коммуникаций или мин (Рис. 5).

После Второй мировой войны интерес к методу возрос благодаря накопленному опыту в радиолокации, и ученые начали адаптировать принципы для гражданских задач. В 1950–1960-е годы появились первые попытки зондирования ледников и вечной мерзлоты, где радиоволны показывали четкие границы слоев без необходимости бурения [3, 21].

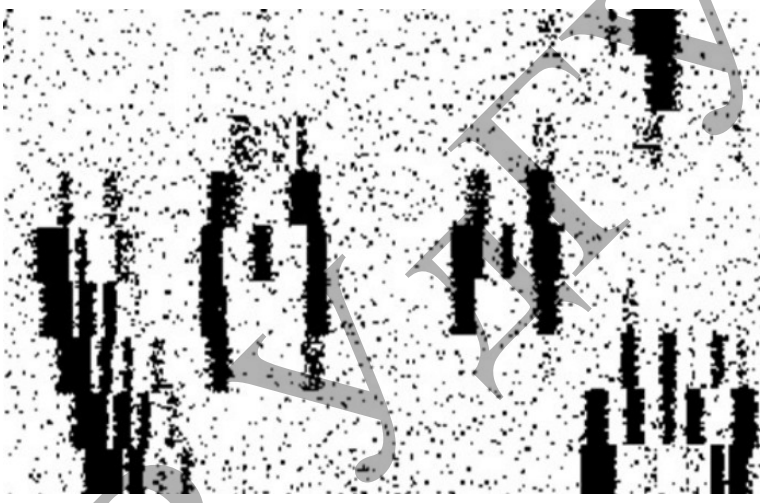


Рис. 5. СВЧ-изображение двух противотанковых мин в металлическом и пластиковом исполнении (в центре), отрезок металлической трубы (слева), алюминиевая пластина (справа внизу) и закопанный кирпич (справа вверху) [21]

К началу 1970-х годов технология вышла за рамки экспериментов. Американские и европейские группы инженеров создали портативные системы, способные работать в полевых условиях. Эти устройства уже позволяли выявлять пустоты под дорожным покрытием и отслеживать расположение трубопроводов на небольшой глубине.

В Советском Союзе аналогичные исследования велись в рамках инженерной геологии, особенно при разведке месторождений и оценке площадей для крупных промышленных объектов. Специалисты отмечали, что метод дает непрерывный профиль среды, чего сложно достичь традиционными точечными измерениями [3, 21].

ВКР ЮГУ

В 1980-е годы георадары стали компактнее и надежнее за счет перехода на цифровую обработку сигналов. Это открыло возможности для обследования зданий и сооружений: выявления трещин в фундаментах, определения толщины перекрытий и поиска скрытых дефектов кладки. Практика показала эффективность при обследовании мостов и дамб, где доступ к конструкциям ограничен. В России (Рис. 6) в этот период метод начали активно применять при реконструкции исторических объектов, сочетая с археологическими работами для минимизации повреждений культурного слоя.



Рис. 6. Георадар ОКО-1М, отечественный георадар воспроизводился с 1989 года [19]

Девяностые годы ознаменовались появлением многоканальных антенн и программного обеспечения для томографической реконструкции, многоканальные антенные решетки состоят из нескольких приемно передающих пор антенн, который пишут несколько радиограмм параллельно. Инженеры получили инструмент для создания объемных моделей подповерхностного пространства.

На практике это пригождается при строительстве в плотной городской и промышленной застройке, когда требуется точно определить положение существующих коммуникаций перед прокладкой новых линий, где георадар позволяет избежать земляных работ [3, 21].

ВКР УлГТУ

С начала 2000-х годов георадарные системы интегрировались в комплексные инженерные изыскания. Оборудование стало мобильнее, а разрешение сигналов выросло благодаря использованию более высоких частот. В области обследования зданий метод нашел применение для оценки состояния несущих элементов без демонтажа отделки. Специалисты фиксировали случаи успешного обнаружения участков коррозии арматуры в железобетоне и зон повышенной влажности в стенах. Одновременно расширилась сфера использования в транспортном строительстве: георадары проверяли качество уплотнения грунтов под железнодорожными путями и выявляли зоны разуплотнения под взлетными полосами.

Сегодняшний этап развития характеризуется сочетанием георадара с другими методами неразрушающего контроля, такими как сейсморазведка или тепловизионная съемка. В инженерной практике это дает более полную картину состояния объектов. Примеры из отечественных проектов показывают, что применение георадара на этапе изысканий позволяет сократить объем разведочного бурения и повысить точность прогноза поведения грунтов при нагрузках. Технология продолжает совершенствоваться за счет новых антенных решений и алгоритмов фильтрации помех, что делает ее незаменимой при работе в условиях плотной застройки и сложной геологической обстановки [3, 21].

1.3. Принципы работы георадара и георадиотомографа

Георадар - это радиолокатор - геофизический инструмент, рабочей средой для которого являются грунты, скальные породы, земля, а также лёд и вода, в которой с помощью георадиолокации он может обнаруживать и локализовывать объекты, неоднородности изменения структуры и т. д. Георадар функционирует за счет генерации коротких электромагнитных импульсов в диапазоне от десятков мегагерц до нескольких гигагерц, которые направляются в исследуемую среду через антенну передатчика.

ВКР УлГУ

Волны распространяются в грунте или строительных конструкциях, где их скорость определяется диэлектрической проницаемостью материала, а затухание зависит от проводимости и наличия влаги. При встрече с границей раздела сред, обладающих разными электрофизическими свойствами, происходит частичное отражение сигнала, который улавливается приемной антенной. Время прохождения импульса до отражателя и обратно позволяет рассчитать глубину залегания неоднородности, если известна средняя скорость распространения в конкретной среде [2, 3].

В отличие от классической радиолокации, георадар работает с средами, обладающими значительно более высоким затуханием, поэтому длительность зондирующего импульса обычно составляет единицы наносекунд, а частотный спектр выбирается с учетом требуемой глубины и разрешающей способности.

Для инженерных задач, таких как обследование фундаментов или поиск коммуникаций, чаще применяют антенны с достаточно высокой частотой 200–900 МГц, обеспечивающие компромисс между проникновением и детальностью изображения. Сигнал после приема проходит через усилитель и аналого-цифровой преобразователь, после чего записывается в виде временной развертки, где каждая трасса соответствует положению антенн на поверхности.

Если же целью исследования является глубины среды, например скальные породы под толщей ледника, либо высокая точность не требуется рациональнее использовать низко и средне частотные георадары и георадиотомографы. Они позволяют изучать среду на глубинах в сотни метрах, при рабочих частотах 25-150 МГц [11].

Георадиотомографический подход отличается тем, что использует не одиночные профили, а совокупность измерений, выполненных по густой сети трасс (Рис. 7) или в режиме кругового просвечивания. Собранные данные обрабатываются с помощью алгоритмов обращения, позволяющих восстановить пространственное распределение диэлектрической проницаемости внутри объема. В практике обследования зданий это дает

ВКР УлГУ

возможность выявлять скрытые пустоты или зоны повышенной влажности без разрушения конструкций. Для реализации томографии часто применяют многоканальные системы, где несколько приемников одновременно регистрируют сигналы от одного передатчика, либо используют метод последовательного перемещения пары антенн с фиксированным разносом [1].

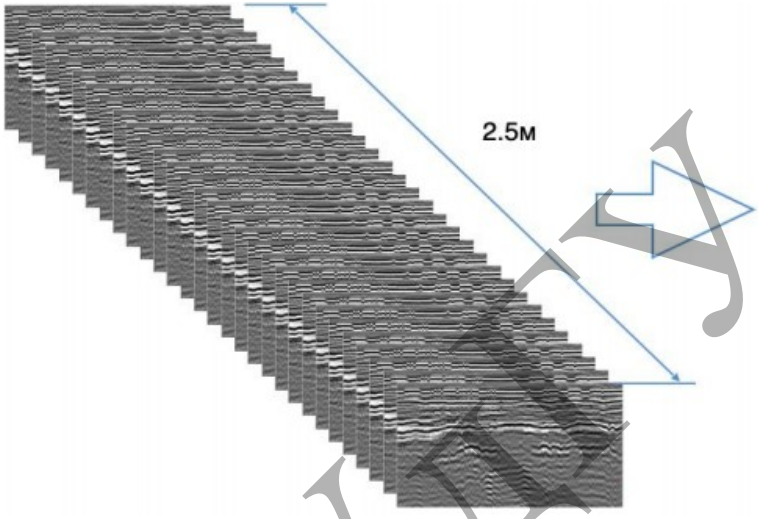


Рис. 7. Тридцать параллельных радиограмм за одно сканирование с помощью георадиотомографа ГРТ-34 [1]

Важным элементом работы остается калибровка скорости распространения волн. В полевых условиях ее уточняют либо путем измерения времени прихода отражений от известных объектов, либо с помощью скважинных измерений. Без такой корректировки ошибки в определении глубины могут достигать 20–30 %, что особенно критично при обследовании железобетонных элементов, где арматура вызывает сильные дифракционные эффекты и многократные переотражения. Современные георадары оснащаются встроенными модулями позиционирования (ГНСС), позволяющими привязывать каждую трассу к координатам с точностью до нескольких сантиметров, что упрощает последующую трехмерную визуализацию.

При работе в условиях плотной городской застройки приходится учитывать влияние внешних помех от линий электропередачи и металлических

ВКР УлГУ

конструкций. Для их подавления применяют фильтрацию в частотной области и вычитание фона, полученного на эталонных участках.

Кроме того, в инженерных изысканиях если возможно сочетают георадарные измерения с другими методами, например с акустическим зондированием, бурением, шурфованием, чтобы повысить достоверность интерпретации сложных участков. Таким образом, принцип действия прибора основан на регистрации и анализе отраженных электромагнитных волн, а томографическая обработка позволяет перейти от одномерных разрезов георадаров к объемным моделям, пригодным для количественной оценки состояния конструкций [2, 3].

ВКР УДГУ

Глава 2. Георадар (георадиотомограф) ГРТ-11К

2.1. Принцип работы и устройство Георадара ГРТ-11К

Георадиотомограф выполняет сканирование сплошных сред за счет пространственно разнесенных антенн антенную решетку, в ней находится 4 передающих антенны, излучающих электромагнитное излучение в зондируемую среду и 4 приемных антенны принимающих отраженное излучение. Передающие и приемные антенны работают в парах, таким образом в каждый момент времени работает одна пара антенн, таким образом георадар записывает 4 параллельных канала данных [1, 6].

Георадиотомографа серии ГРТ-11К работает за счет высокоскоростного ЛЧМ генератора, обеспечивающего работу антенной решетки в частотных диапазонах 0,1 до 1,2 ГГц [6].

Данные поступают в Программируемую Логическую Интегральную Схему (ПЛИС), где происходит первичная обработка данных в режиме реального времени , за счет быстрого преобразование Фурье над каждыми 1024 выборками по каждому каналу. Преобразование Фурье это математическая операция позволяющая разложить сигнал на более простые синусоиды амплитуд и фаз разных частот, переводя данные о распространении сигнала из временной области в частотную, сформированный пакт трасс(радиограмма) передается на компьютер [1, 3, 18].

Многоканальность георадиотомографа позволяет использовать метод общей средней точки для расчета электрофизических параметров среды, таких как диэлектрическая проницаемость верхнего контрастного слоя среды, к примеру асфальта.

За счет встроенного в ручную тележку энкодера преобразующего энергию вращающихся колес в электрический сигнал, который обеспечивает запись пройденного расстояния и подключаемой ГНСС системы, образующих навигационный блок, обеспечивается вывод координат трасс [1, 6].

ВКР УлГУ



Рис. 8. Фотография Георадиотомограф ГРТ-11К, составлено автором

Георадиотомограф ГРТ-11К это современный сложный электронный прибор, который состоит из множества частей (Рис. 8), но основных можно выделить 7:

а) Антенная решётка заключённая в пластиковый корпус, состоит из антенн передающего модуля, отвечающего за излучение электромагнитных волн в исследуемую среду и антенн приёмного модуля.

б) Ручная внедорожная тележка имеет 4 колёса, передние из которых имеют встроенные электродвигатели, а задние поворотные, позволяющие оператору маневрировать и перемещать георадар по территории.

в) Планшетный компьютер, отвечающий за управление и визуализацию.

г) Блок управления он же ПЛИС, к которому подключается все оборудование и внутри которого находится аккумуляторная батарея (Рис 1.).

д) Заднее левое колесо имеет встроенный энкодер.

е) ГНСС модуль.

А так же Высокоскоростное электронное реле.

ВКР УлГТУ



Рис. 9. Общая структурная схема георадиотомографа [1]

- ПК — Персональный Компьютер
- Высокоскоростное электронное реле - отвечает за переключение токов в системе.
- Антенная система - Совокупность приёмных и (или) передающих антенн, размещённых с фиксированным шагом и используемых для многоканального зондирования.
- ЛЧМ синтезатор - чувствительный высокоскоростной ЛЧМ генератор, обеспечивающий работу георадара в частотных диапазонах от 0,1 до 1,2 ГГц.
- ПЛИС — Программная Логистическая Интегральная Система
- GNSS – ГНСС антенна
- Энкодер - преобразует энергию вращащения в электрический сигнал, который обеспечивает регистрацию движения.
- Антенная система - Совокупность приёмных и (или) передающих антенн, размещённых с фиксированным шагом и используемых для многоканального зондирования.

Сам по себе георадиотомограф ГРТ -11К представляет из себя крупное устройство, что сопряжено в первую очередь с широкой антенной решеткой, которая и обеспечивает возможность снимать несколько каналов-профилей. Потому для обеспечения подвижности на местности он и был снабжен моторизированной тележкой. Весь вместе комплекс тяжел, однако это не представляет проблем непосредственно в работе.

ВКР УлГУ

2.2. Программное обеспечение: GeoLocator, GeoViewer, GeoReader

Работа с программным обеспечением GeoLocator. «Программное обеспечение GeoLocator предназначено для управления процессом сбора георадиотомографических данных, приёма данных от основного блока георадиотомографического комплекса, их визуализации в реальном времени, а также для сохранения исходных данных на управляющем компьютере.» [1, с. 23]

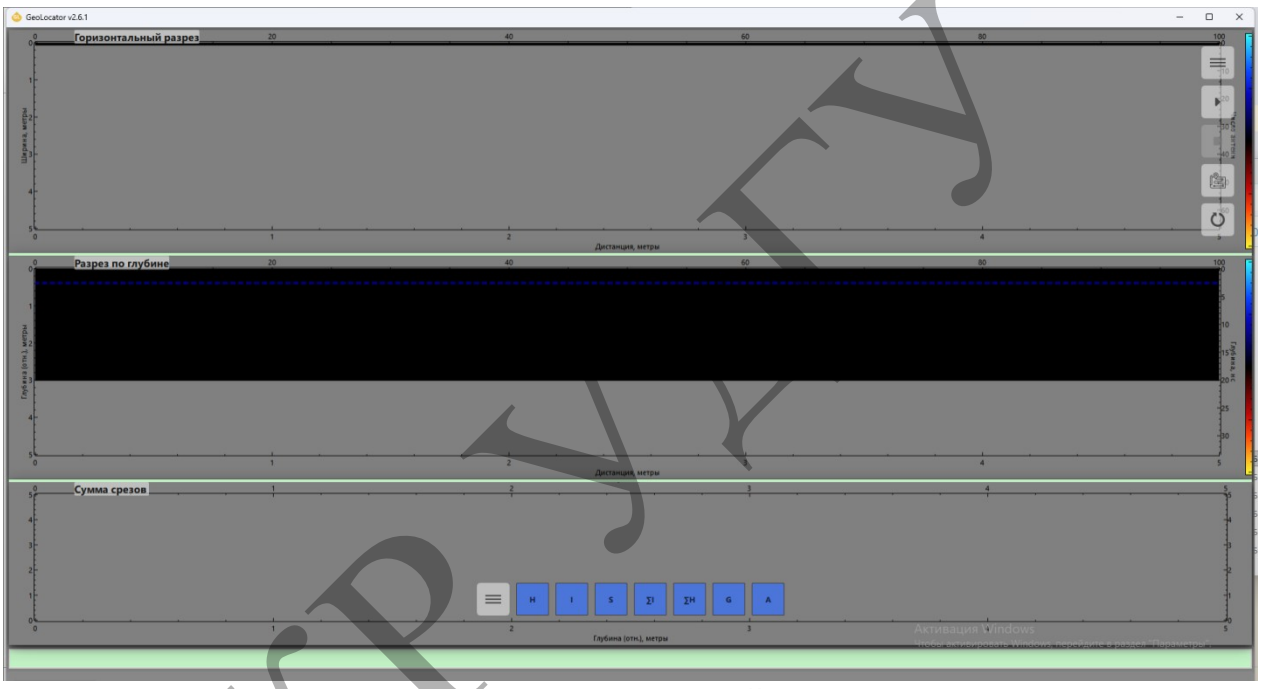


Рис. 10. Снимок экрана управляющего устройства с запущенным приложением GeoLocator, составлено автором

Визуализация данных в реальном времени нужна в первую очередь для контроля процесса записи радиограмм оператором комплекса.

Перед началом работы с приложением следует убедиться, что:

- Основной блок георадарного комплекса находится в рабочем режиме и включен.
- Установлено сетевое соединение между управляющим компьютером и основным блоком.
- Заданы правильные параметры антенной решетки

Подключить сетевой интерфейс:

ВКР УлГУ

- Выбрать сетевой адаптер отвечающий за подключение управляющего компьютера к основному блоку георадара.

- Удостоверится в поступлении данных с георадарного комплекса. Начав запись измерений, провернуть встроенный в вездеходную тележку энкодер, проехав короткое расстояние. Тем самым проконтролировав протекание процесса записи.

Итогом записи становится многоканальная радиотомограмма, с которой уже можно работать и интерпретировать полученное изображение на предмет ярких аномалий. Например на приведенном ниже рисунке(Рис. 11), можно увидеть приметное место с нарушением слоев среды. Эта аномалия является колодцем на подземной коммуникации, металлический люк, обечайка колодца и стенки лаза формируют отклонения в верхних слоях, а уходя ниже зона с измененной электропроводностью отражает расширение характеризующее железобетонные кольца самого колодца.

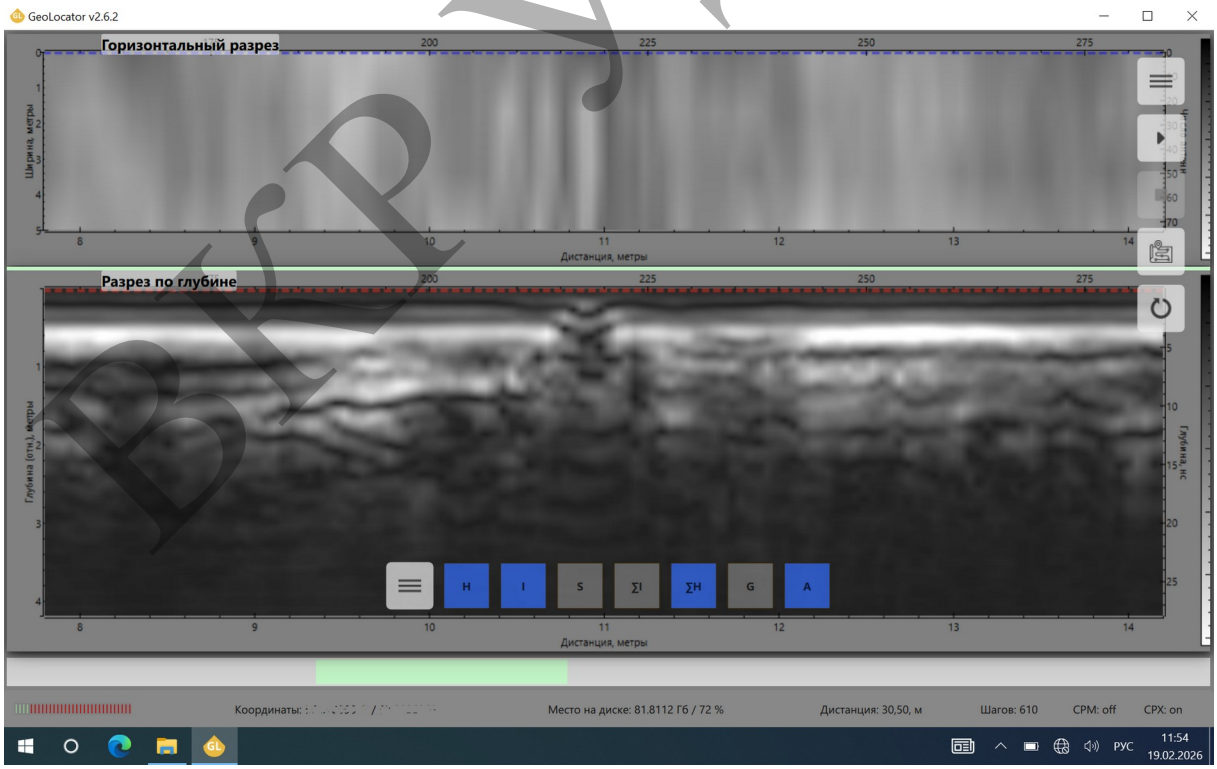


Рис. 11. Снимок экрана управляющего устройства с запущенным приложением GeoLocator и открытой томограммой, составлено автором

ВКР УлГУ

Эта аномалия является колодцем на подземной коммуникации, металлический люк, обечайка колодца и стенки лаза формируют отклонения в верхних слоях, а уходя ниже зона с измененной электропроводностью отражает расширение характеризующее железобетонные кольца самого колодца.

В целом программа GeoLocator обладает простым устройством и гибкими возможности по настройке отображения разнообразных характеристик записываемых аппаратурой радиограмм: изменения масштаба вертикального и горизонтального разреза, просмотра разных каналов-профилей, перемешение к разным участкам снятого материала, как по длинне и ширине маршрута так и по глубине, а так же настроить гамму и цветовую схему на вкус пользователя.

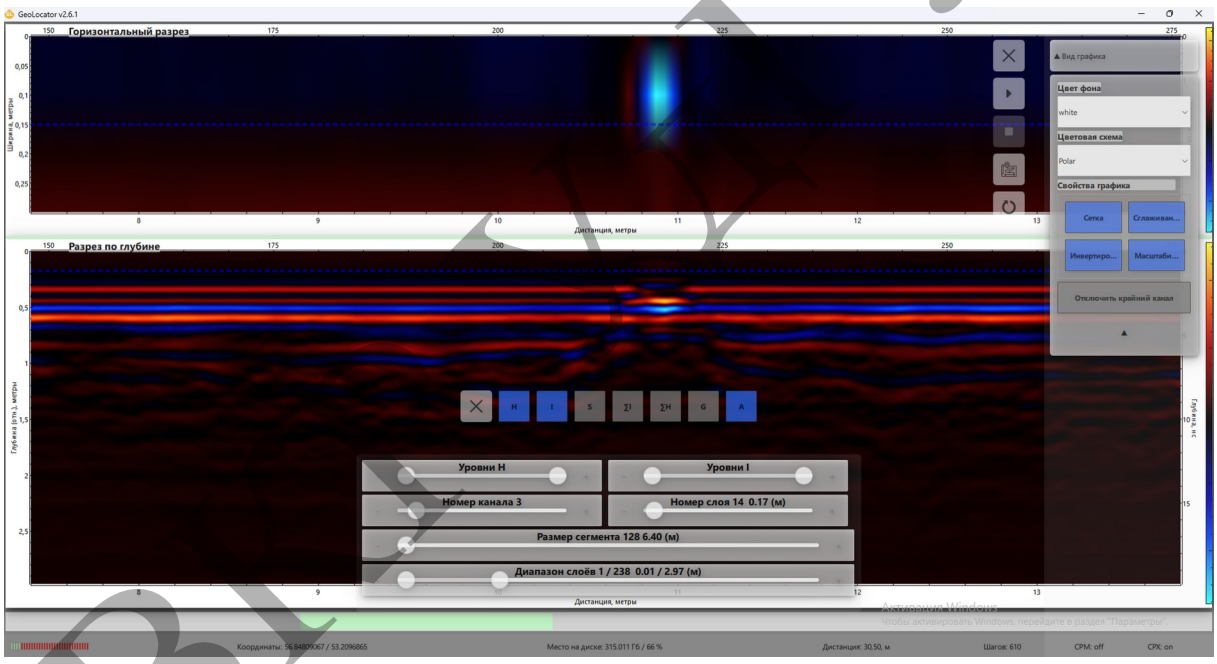


Рис. 12. Снимок экрана управляющего устройства с запущенным приложением GeoLocator и открытой томограммой в другой цветовой схеме и с другими настройками интерфейса, составлено автором

Работа с программным обеспечением GeoViewer. Программное обеспечение GeoViewer предназначено для обработки, визуализации и анализа данных георадиотомографии, полученных в ходе измерений, выполненных с использованием георадиотомографического комплекса, и включает инструменты формирования вертикальных разрезов (радарограмм), горизонтальных амплитудных карт, суммированных срезов, карт огибающей и

динамической томографии, а также средства пространственной привязки данных (Рис. 13) и экспорта результатов. GeoViewer применяется после завершения сбора данных, произведенного аппаратурой и процессом записи данных осуществленным программным обеспечением GeoLocator.

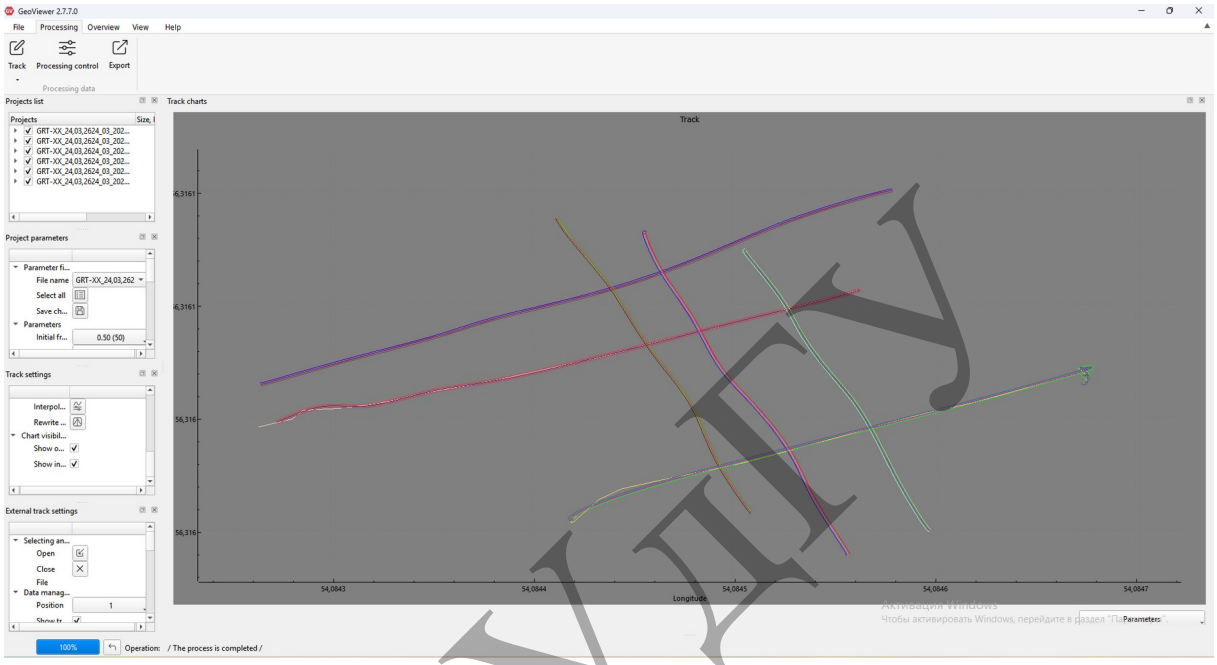


Рис. 13. Снимок экрана управляющего устройства с запущенным приложением GeoViewer и открытыми проектами и отображением их пространственно привязных треков с координатами, составлено автором

Работа с программным обеспечением GeoReader. «Программный комплекс GeoReader предназначен для детальной инженерной обработки георадарных данных и служит расширенным иструментом в составе технологического цикла обработки, анализа и подготовки результатов измерений.» [1, с. 44]

Программный комплекс GeoReader используется для:

- Организации работы с георадарным проектом — набором георадарных профилей (Рис. 14).
- Углубленной обработки радиограмм, в т.ч. пакетной для выделения и анализа полезного сигнала, работы с траекторией, расчета километровой и пикетной привязки калибровки глубинного ракзреза по данным бурения и пр.

ВКР УлГУ

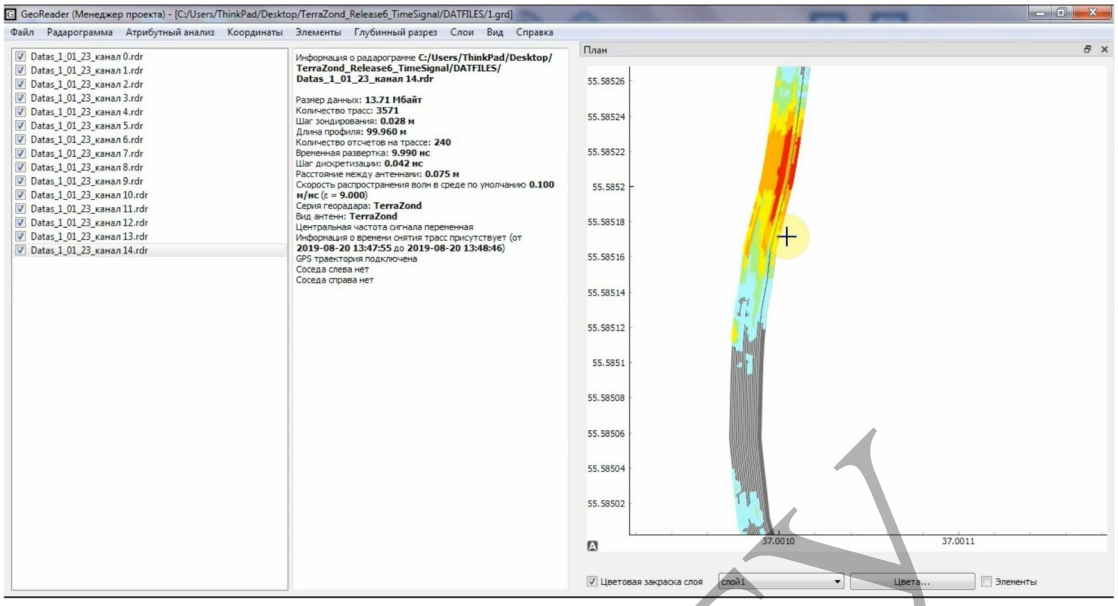


Рис. 14. Результат пакетной обработки данных в ПО GeoReader с отображением области критического изменения толщины слоев асфальтобетона [1]

- Автоматизированного поиска границ слоёв (Рис. 15).
- Атрибутивного анализа.
- Подготовки данных в форматы для CAD/GIS/BIM.

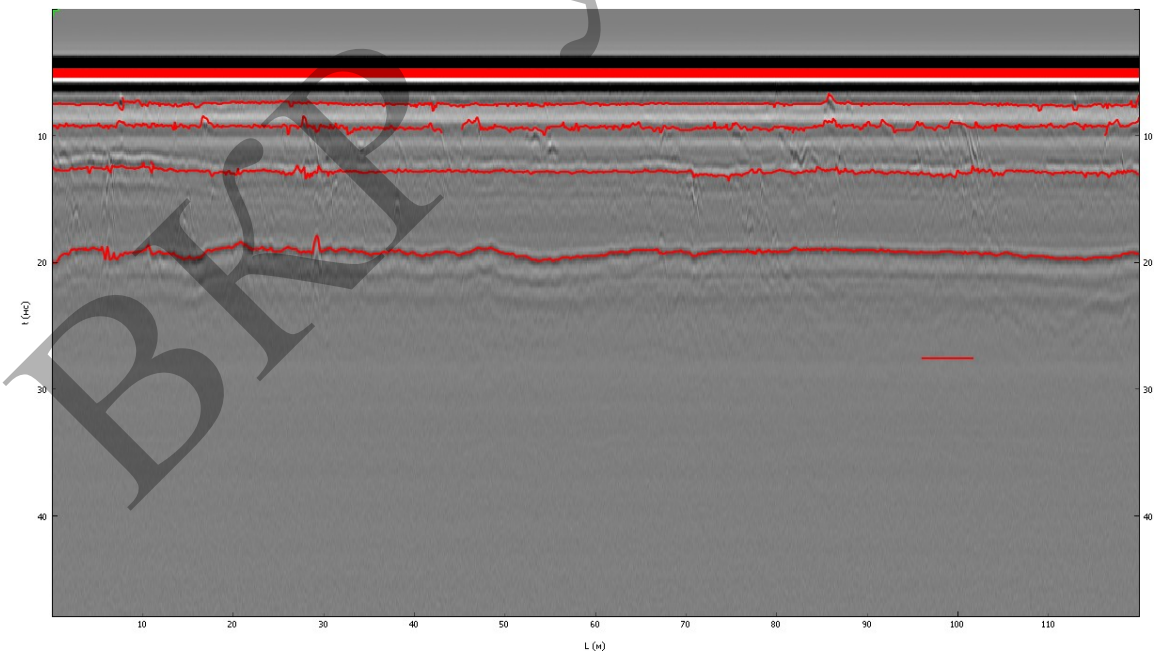


Рис. 15. Результат автоматического распознавания границ слоев с применением AI-модуля [1]

ВКР УлГУ

Глава 3. Технические особенности и перспективы развития георадиотомографии

3.1. Преимущества и ограничения применения георадара

Метод георадиолокации демонстрирует заметные преимущества при обследовании строительных площадок и существующих объектов, особенно когда требуется минимизировать вмешательство в конструкцию. В отличие от традиционного бурения скважин, георадар позволяет охватить значительные площади за короткое время, фиксируя границы слоев грунта, пустоты и инженерные коммуникации без риска повреждения. В условиях плотной городской застройки это особенно ценно: данные собираются с поверхности, не требуя остановки движения транспорта или разбора покрытий. Разрешение прибора достигает нескольких сантиметров на глубинах до 3–5 метров в благоприятных грунтах, что помогает выявить неоднородности, влияющие на устойчивость фундаментов, до начала земляных работ. Кроме того, мобильность антенн и возможность обработки сигналов в полевых условиях ускоряют принятие решений на этапе изысканий [2, 3, 6].

Однако эффективность снижается в средах с высокой электропроводностью. Глинистые и водонасыщенные отложения быстро поглощают энергию импульса, ограничивая глубину зондирования порой до одного метра. В таких случаях результаты становятся фрагментарными, и георадарные профили требуют обязательного сопоставления с данными других методов, например, электроразведки или статического зондирования. Металлические конструкции и арматура создают множественные отражения, маскирующие полезные сигналы, поэтому в железобетонных массивах интерпретация усложняется и нуждается в дополнительной калибровке. Еще один фактор — зависимость от квалификации специалиста: автоматические алгоритмы обработки пока не всегда корректно разделяют техногенные аномалии и естественные включения, что может приводить к ложным заключениям при оценке состояния коммуникаций или скрытых дефектов

ВКР УлГУ

кладки. В итоге метод чаще выступает как дополнение к комплексным изысканиям, а не как самостоятельное решение для всех типов грунтов и объектов.

3.2. Перспективы развития и инновации в области георадиолокации

Развитие георадиолокационных систем сегодня тесно связано с цифровизацией инженерных изысканий и необходимостью работать в условиях плотной городской застройки. Современные георадары все чаще оснащают модулями искусственного интеллекта, которые позволяют автоматически распознавать аномалии в радиолокационных профилях и выделять границы объектов без ручной интерпретации.

Это особенно заметно при обследовании фундаментов и коммуникаций в исторических кварталах, где традиционные методы требуют остановки движения и вскрытия покрытий. Параллельно растет интерес к многочастотным антенным решеткам, способным одновременно работать в диапазонах от 100 МГц до 2 ГГц, что дает возможность получать детальную картину на глубине до 10–12 метров при сохранении разрешения на уровне первых сантиметров [1, 2, 6].

Новые аппаратные решения включают компактные беспилотные носители и носимые сканеры, которые уже применяют при обследовании линейных объектов в стесненных условиях. Такие системы снижают время полевых работ и уменьшают влияние человеческого фактора на качество данных. Важным направлением остается интеграция георадарных съемок с результатами наземного лазерного сканирования и тепловизионного контроля, что позволяет создавать комплексные цифровые модели подземного пространства. В практике инженерных изысканий это помогает точнее оценивать риски при реконструкции зданий и планировать защитные мероприятия без избыточного бурения.

ВКР УлГУ

Дальнейшее совершенствование касается и обработки сигналов: разработчики внедряют алгоритмы машинного обучения, обученные на больших массивах реальных профилей, что сокращает сроки камеральных работ с нескольких дней до нескольких часов [1].

Одновременно ведутся исследования по снижению энергопотребления и повышению помехозащищенности в условиях промышленных помех и плотной электромагнитной обстановки. Эти шаги делают метод более доступным для регулярного мониторинга состояния сооружений и инженерных сетей в городской среде, где традиционные геофизические подходы часто ограничены по времени и стоимости.

ВКР УДГУ

Глава 4. Практическое применение георадара в инженерных изысканиях

4.1. Основные задачи инженерных изысканий с использованием георадара

В инженерных изысканиях георадар чаще всего применяют для выявления скрытых объектов и нарушений в грунтах, где традиционные методы требуют значительных земляных работ или попросту невозможны из-за плотной застройки. Одной из ключевых задач становится трассировка подземных коммуникаций — трубопроводов, кабельных линий, коллекторов, чье точное положение на плане участка часто известно лишь приблизительно. Сканирование позволяет не только зафиксировать их глубину и направление, но и обнаружить места утечек или деформаций оболочки, что особенно важно при реконструкции старых кварталов [1, 6].

Другая распространенная задача — оценка состояния оснований зданий и сооружений. Георадарные профили дают представление о неоднородностях под подошвой фундамента: пустотах, зонах разуплотнения, линзах слабых грунтов. В условиях исторической застройки или при надстройке существующих зданий такие данные помогают избежать неожиданных осадок и определить участки, требующие усиления. Метод работает и при обследовании бетонных конструкций: по отраженным сигналам можно судить о расположении арматуры, толщине защитного слоя, наличии трещин и зон коррозии, не прибегая к вскрытию.

Отдельное направление связано с изучением инженерно-геологических условий площадок. С помощью георадара уточняют границы литологических слоев, выявляют зоны повышенной влажности, фиксируют карстовые полости и суффозионные воронки. В районах с активным проявлением опасных процессов это дает возможность оперативно картировать участки риска, и планировать защитные мероприятия без бурения густой сети скважин.

ВКР УДГУ

В условиях плотной городской среды георадарные съемки используют для контроля за состоянием дорожных одежд и оснований под ними. Метод позволяет выявить расслоения, пустоты под асфальтом, зоны переувлажнения, которые впоследствии приводят к образованию выбоин. Аналогичные задачи решаются при обследовании взлетно-посадочных полос, где требуется регулярная диагностика без остановки движения.

Наконец, георадар находит применение при поиске и локализации несанкционированных врезок в трубопроводы, захоронений отходов, старых фундаментов снесенных зданий. В каждом случае важна не только фиксация аномалий, но и возможность быстрого перепозиционирования антенн для уточнения формы и размеров объекта, что сокращает объем последующих контрольных работ.

4.2. Методология проведения георадиолокационных исследований

При планировании георадиолокационных работ на объекте инженерных изысканий, прежде всего, выполняют предварительную оценку условий местности, учитывая тип грунтов, предполагаемую глубину залегания искомых объектов и уровень электромагнитных помех от близлежащих коммуникаций или сооружений. Специалисты анализируют имеющиеся архивные материалы по участку, уточняют границы зоны обследования и определяют оптимальную схему профилей, которая обычно строится с учетом рельефа и плотности застройки. Выбор частотного диапазона антенн зависит от поставленных задач: для выявления неглубоких дефектов в конструкциях фундаментов чаще применяют высокочастотные блоки на 900–1500 МГц, тогда как изучение толщи грунтов под основанием здания требует низкочастотных излучателей 200–400 МГц, обеспечивающих проникновение до нескольких метров [1, 6].

На этапе подготовки оборудования проводят калибровку георадара на тестовом полигоне с известными отражателями, проверяют состояние кабелей и аккумуляторов, а также настраивают параметры записи, включая временное

ВКР УдГУ

окно, шаг дискретизации и коэффициент усиления. Перед началом полевых измерений размечают сеть профилей с помощью тахеометра или GNSS-приемника, фиксируя координаты каждой точки с точностью до нескольких сантиметров. Сканирование выполняют в непрерывном режиме при движении антенны по прямым линиям с постоянной скоростью, избегая резких остановок и поворотов, которые могут исказить временные разрезы. В условиях плотной городской застройки часто используют комбинированный подход, когда продольные и поперечные профили пересекаются под прямым углом, формируя трехмерный массив данных для последующей томографической реконструкции.

Во время съемки оператор контролирует качество сигнала в реальном времени, корректируя усиление при появлении зон сильного затухания, вызванного глинистыми прослойками или повышенной влажностью. Параллельно ведется фотофиксация и видеозапись поверхности, а также фиксируются любые аномалии, такие как трещины или просадки, которые могут повлиять на интерпретацию радарограмм. Для повышения достоверности результатов на отдельных участках выполняют повторные проходы с перпендикулярной ориентацией антенн, что позволяет выявить поляризационные эффекты от линейных объектов вроде труб или арматуры.

После завершения полевых работ данные переносят на компьютер, где проводят предварительную обработку: удаление низкочастотных трендов, фильтрацию шумов и коррекцию по поверхности. Применение специализированного программного обеспечения позволяет строить разрезы в различных масштабах, выделять отражающие горизонты и рассчитывать скорости распространения электромагнитных волн на основе дифракционных гипербол. Для сложных объектов, например многоэтажных зданий с подземными паркингами, дополнительно выполняют миграцию и инверсию данных, получая объемные модели распределения аномалий. Сопоставление георадарных разрезов с результатами бурения или шурфования дает

ВКР УлГУ

возможность уточнить литологический состав и подтвердить природу обнаруженных неоднородностей.

В практике обследования эксплуатируемых сооружений методика нередко включает мониторинговые циклы через определенные интервалы времени, позволяющие отслеживать динамику изменений, таких как развитие карстовых полостей или смещение фундаментов. При этом важно учитывать сезонные колебания влажности грунтов, влияющие на контрастность сигналов, и корректировать интерпретацию с учетом этих факторов.

4.3. Авторский надзор по оценке фактического уплотнения отсыпки кустовой площадки нефтяного месторождения с помощью георадара

В конце апреля 2026 году автором было получено задание на съемку участка отсыпки кустовой площадки разрабатываемого нефтяного месторождения, для установления толщины слоев отсыпки, что стало отличным поводом для практических испытаний приобретенных знаний и навыков. Работы выполнялись бригадой из двух человек, что является проверенной методикой, позволяющей одному человеку оперировать аппаратурой, а второму вести абрис, выполнять ГНСС съемку и прочие операции.

Выезд состоялся 24 апреля, для транспортировки до места проведения работ был выделен автомобиль Toyota Land Cruiser с транспортным автоприцепом. Для дальнейшей погрузки георадарный комплекс в разобранном виде из места хранения был спущен на грузом лифте (Рис. 16) во двор здания, и погружен в автоприцеп (Рис. 17). Далее на автомобиле с прицепом был совершен выезд на место работ.

ВКР УлГУ



Рис. 16. Фотография разобранный Георадиотомограф ГРТ-11К в грузовом лифте, составлено автором



Рис. 17. Фотография погруженного в автоприцеп Георадиотомографа ГРТ-11К, составлено автором

ВКР УЛИ

Поскольку работы проводились на территории активно разрабатываемого нефтяного месторождения, с достаточно интенсивным движением автотранспорта и большим количеством промыслового оборудования в т.ч. буровая установка, проведение работ началось с представления мастеру участка и краткого инструктажа и росписи в журнале. Это нужно в первую очередь для того что бы избежать опасных ситуаций и не помешать другим рабочим выполнять свои обязанности на территории площадки, а так же само собой отчетности.



Рис. 18. Фотография с видом на буровую, на подъездной дороге к разрабатываемой кустовой площадке, составлено автором

ВГУИТ

После разгрузки, сборки и проверки работоспособности комплекса, начато выдвижение на непосредственное место работ, в сторону буровой установки на новой площадке.

Заранее было решено для проверки выполнить позиционирование двумя методами:

- Отработать с помощью входящего георадарный комплекс навигационного блока с ГНСС антенной.
- Закрепить начало и конец каждой из трасс с помощью колышков, после пикеты были сняты с помощью работающего в РТК режиме ГНСС-приемника EFT.



Рис. 19. Фотография на месте проведения работ, составлено автором

ВГУДТУ

Всего было выполнено и закреплено на местности 5 трасс с помощью георадиотомографа и 12 пикетов ГНСС-приемником. На этом полевые работы были заверешены.

Далее нужно было перейти к камеральному этапу обработки, он заключался в:

- Составлении схемы треков георадара в AutoCAD.
- Сравнение результатов позиционирования
- Составлении разрезов с томограммами по глубине
- Сравнение с результатами буровых геологических изысканий проведенных в тот же день бригадой геологов на том же объекте.
- Составлении отчетно технической документации

Схема треков георадиотомографа (Рис. 19) составлялась на основе бумажного абриса, снятых пикетов соответствующих началу и концам трасс георадиотомографа и прошлых материалов съемки на тот же объект. Выполнялась работа в AutoCAD Civil 3D.

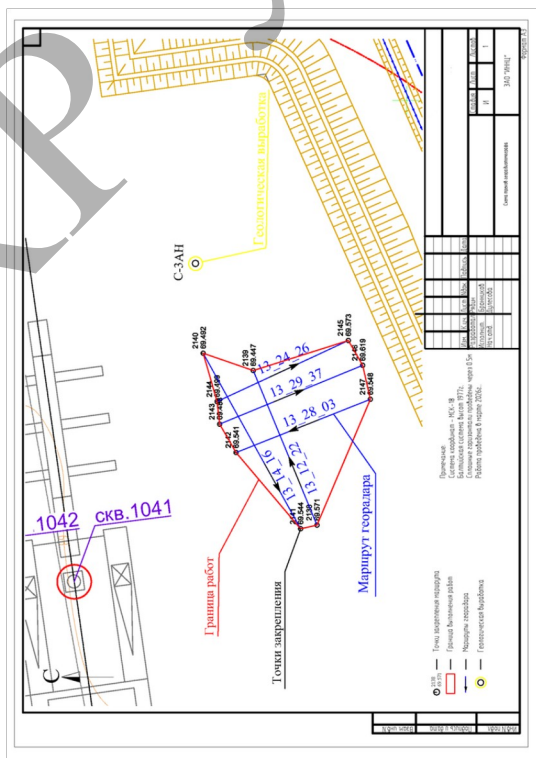


Рис. 19. Схема треков георадиотомографа, составлено автором

ВКР УлГУ

Для проверки результатов позиционирования был использован GeoViewer, куда были подгружены проекты трасс и настроено их отображение, проверка показала что координаты сходятся, корректная работоспособность входящей в стереофотографический комплекс ГНСС антенны в полевых условиях подтвердилась.

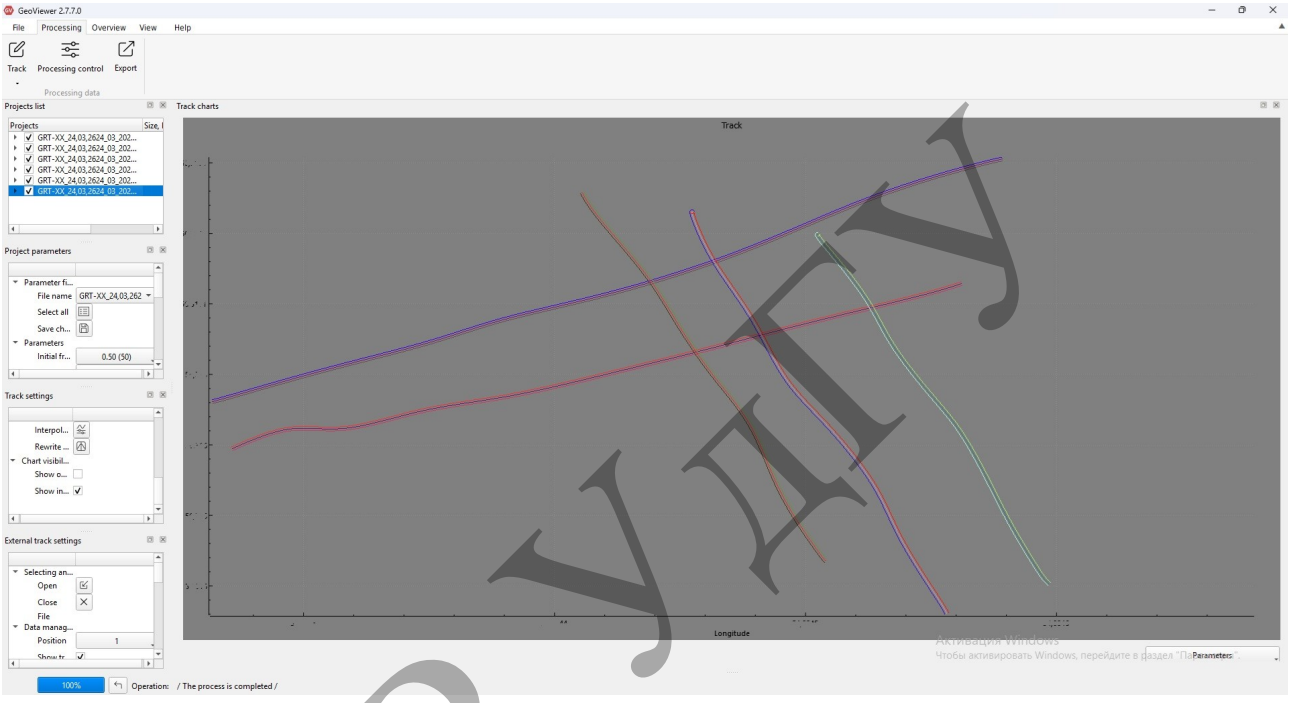


Рис. 20. Схема треков георадиотомографа в GeoViewer, составлено автором

Обработка результатов съемки и составление разрезов проходила в программном обеспечении GeoLocator. Все каналы были просуммированы для получения усредненного изображения. Была выбрана цветовая схема, яркость и гамма наиболее ярко выделявшие границы вмещающих сред. Для удобства восприятия были произвольно выбраны участки томограмм, и выполнены разрезы по глубине, измерена глубина залегания элементов среды.

ВКР УлГУ

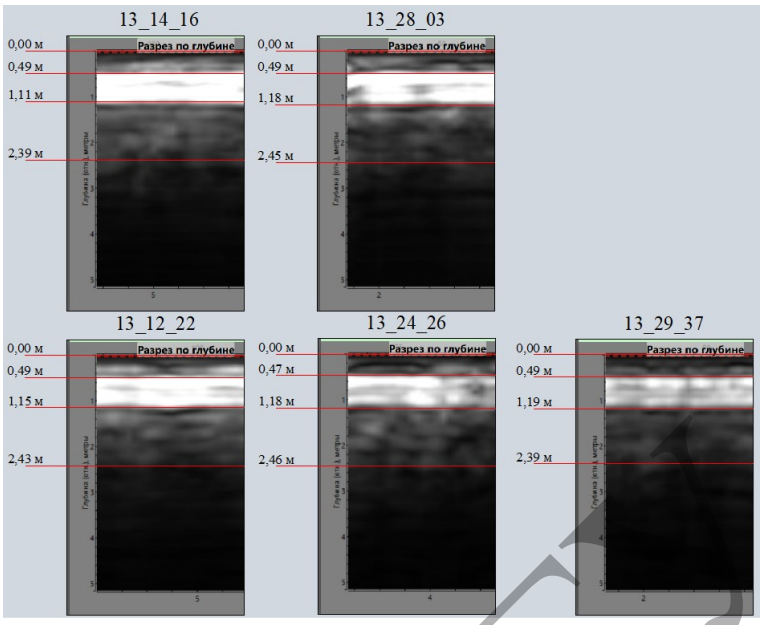


Рис. 20. Схема треков георадиотомографа в GeoViewer, составлено автором

Усредненная интерпретация групп слоев:

1) До 0,48 м Песок.
2) От 0,48 м до 1,16 м Песочное-гравийная смесь.
3) От 1,16 м до 2,42 м Уплотненная Песочно-Гравийная смесь
4) От 2.42 м и глубже Суглинок.

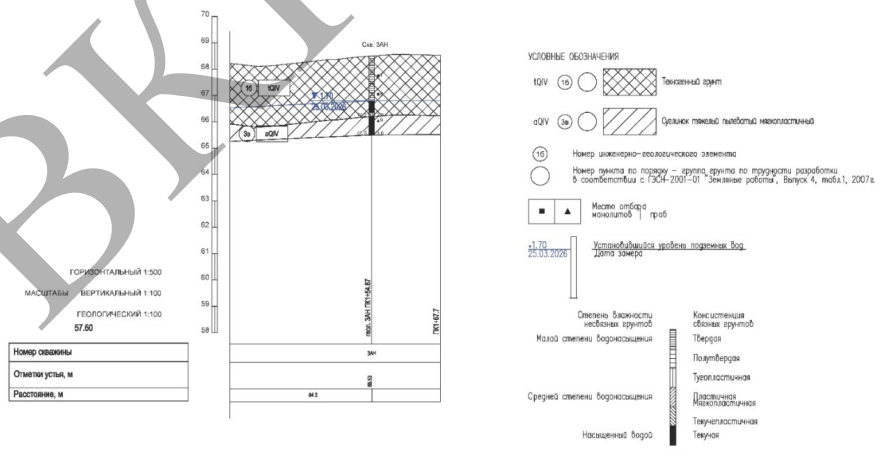


Рис. 20. Геологический разрез выработки С-ЗАН

ВКРУДГ

Заключение

Применение георадара в инженерных изысканиях показало себя как инструмент, способный существенно изменить подход к обследованию скрытых конструкций и грунтов. На протяжении работы были разобраны физические основы распространения электромагнитных импульсов в неоднородных средах, где диэлектрическая проницаемость и проводимость определяют глубину проникновения и разрешение сигнала. Эти характеристики напрямую влияют на возможность выявления пустот, трещин и изменений влажности без вскрытия поверхности.

На практике метод продемонстрировал эффективность при обследовании фундаментов многоэтажных зданий в условиях плотной застройки. В одном из рассмотренных случаев георадиолокация позволила обнаружить зоны разуплотнения под плитой основания, что совпало с данными последующего бурения и помогло скорректировать проект усиления. Подобные результаты повторялись при проверке инженерных сетей на объектах реконструкции, где традиционные методы требовали бы остановки движения транспорта и значительных земляных работ.

Сравнение с другими технологиями выявило, что георадар уступает сейсморазведке по глубине в высокопроводящих грунтах, однако выигрывает в скорости съема данных и детальности изображения на малых глубинах. Ограничения связаны прежде всего с влиянием глинистых прослоек и металлических арматурных каркасов, которые создают множественные отражения и усложняют интерпретацию. В то же время современные антенные комплексы с частотным диапазоном от 100 до 2000 МГц позволяют адаптировать методику под конкретные задачи, снижая вероятность пропуска аномалий.

Перспективы развития связаны с обработкой массивов данных с помощью алгоритмов машинного обучения и интеграцией результатов георадиолокации в BIM-модели. Такие решения уже тестируются на объектах

ВКР УлГУ

транспортной инфраструктуры, где автоматическое выделение границ неоднородностей сокращает время камеральной обработки. Дополнительным направлением остается совмещение георадарных профилей с данными электротомографии и наземного лазерного сканирования, что дает более полную картину состояния конструкций.

В инженерной практике рекомендуется применять георадиотомографию на этапе предпроектных изысканий, особенно при ограниченном доступе к подземным элементам. Важно учитывать тип грунтов и наличие коммуникаций еще на стадии планирования работ, чтобы выбрать оптимальные частоты антенн и шаг профилирования. Специалистам стоит проходить регулярное обучение по интерпретации радарограмм, поскольку качество конечного результата во многом зависит от опыта оператора. При соблюдении этих условий метод становится надежным дополнением к традиционным видам контроля и помогает принимать обоснованные решения по сохранности и развитию существующих сооружений.

ВКР УлГУ

Список использованной литературы

1. Научно-производственное объединение «Терразонд». Георадиотомограф ГРТ-ХХ. Инструкция по работе с аппаратурой ГРТ-ХХХХ М.: 2026 г. 55 с.

2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие [Электронный ресурс], М.: Изд-во Московского университета, 2004. 153 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vladov-ml-starovojtov-av-vvedenie-v-georadiolokaciyu-mmgu-2004rutk155sgsp.pdf (Дата обращения: 22.05.2026).

3. ГЕОТЕХ. Основы георадиолокации. Пособие для обучения [Электронный ресурс], М.: 2006 г. 64 с. Режим доступа: http://agromelio.ru/lib/exe/fetch.php?media=литература:copy_compressed.pdf (Дата обращения: 22.05.2026).

4. ООО «ТИМ». GeoReader увидеть скрытое от глаз. Описание ПО, Описание функционала ПО, 30 с.

5. Гринкевич А. В. Радиолокация. Учебное пособие [Электронный ресурс], Минск: БГУИР, 2015 г. 190 с. Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/4961/2/Grinkevich_Radiolok.pdf (Дата обращения: 26.05.2026).

6. Научно-производственное объединение «Терразонд». Георадиотомограф ГРТ-ХХ Руководство по эксплуатации. 2024 г. 12 с.

7. ООО «ТИМ». Методика создания цифровой модели дорожной конструкции на примере ПО GeoReader. 15 с.

8. Залищак В.Б. Георадиолкационное зондирование в инженерной геологии. Учебно-методическое пособие [Электронный ресурс], Владивосток: ДФУ, 2018 г. 23 с. Режим доступа: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/d95/Zalishhak_V.B._Georadiolokacionnoe_zondirovanie_v_inzhenernoj_geologii.pdf?ysclid=mpmd6eivp1322577544 (Дата обращения: 22.05.2026).

ВКР УлГУ

9. Абрамов И. Л., Экба С. И., Павлов П. А. Структурно-статистический анализ ошибок инженерных изысканий в условиях стесненной застройки. 2025 г. Режим доступа: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/105689/view?ysclid=mq2x6kwtqn296013855 (Дата обращения: 26.05.2026).

10. Пягий Э. Т., Белобров В. П., Молчанов Э. Н., Сео Мунг Чул, Сон Йон Куи. Использование георадара в почвенных исследованиях. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-georadara-v-pochvennyh-issledovaniyah/viewer (Дата обращения: 22.05.2026).

11. Кашкевич М. П., Боронина А. С., Михайлов Е. М., Попов С. В. Опыт применения низко и среднечастотных георадаров для изучения внутреннего строения ледника и рельефа подстилающих горных пород в районе оазиса Ширмахера, Восточная Антарктида. 2025 г. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-nizkoi-srednechastotnyh-georadarov-dlya-izucheniya-vnutrennego-stroeniya-lednika-i-reliefa-podstilayuschih-gornyh/viewer (Дата обращения: 22.05.2026).

12. Бричёва С. С., Кандинов М. Н., Матасов В. М. Опыт использования георадара в исследованиях на позднепалеолитической стоянке Авдеево в Курской области. 2016 год. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-ispolzovaniya-georadara-v-issledovaniyah-na-pozdnepaleoliticheskoy-stoyanke-avdeevo-v-kurskoy-oblasti/viewer (Дата обращения: 21.05.2026).

13. Усачев К. А. Разработка алгоритма для контроля армирования железобетонных конструкций с использованием георадара. 2017 г. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-dlya-kontrolya-armirovaniya-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-s-ispolzovaniem-georadara/viewer (Дата обращения: 21.05.2026).

14. Е. В. Денисова, А. П. Хмелинин. «О возможности использования георадара sir-3000 при бестраншейных технологиях прокладки подземных коммуникаций». 2012 г. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/o-

ВКР УлГУ

vozmozhnosti-ispolzovaniya-georadara-sir-3000-pri-bestransheynyh-tehnologiyah-prokladki-podzemnyh-kommunikatsiy/viewer (Дата обращения: 15.05.2026).

15. Филатова А. В., Дормидонтова Т. В., Быцина О. А., Григорян А. Л. Инженерные изыскания дорожной одежды с применением георадаров. 2019 г. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenernye-izyskaniya-dorozhnoy-odezhdy-s-primeneniem-georadarov/viewer (Дата обращения: 26.05.2026).

16. Д. А. Гапонов, Л. Н. Фоменко, Р. Д. Шеремет. «Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов». 2016 год. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-georadara-dlya-kontrolya-kachestva-zakrepleniya-gruntov/viewer (Дата обращения: 26.05.2026).

17. А. Ю. Дьяков. «Георадар как инструмент для решения горных задач». 2019 год. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/georadar-kak-instrument-dlya-resheniya-gornyh-zadach/viewer (Дата обращения: 22.05.2026).

18. Н. П. Савин. Разработка метода трехмерного картографирования подповерхностных неоднородностей с использованием георадара. Томск 2021 год. Режим доступа: https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:15276/SOURCE01?ysclid=mqcjt7w9ep60006995 (Дата обращения: 22.05.2026).

19. «Георадар серии ОКО-М1» Режим доступа: https://logisnew.narod.ru/rus/OKOM1.htm (Дата обращения: 22.05.2026).

20. Ивашов С. И. История исследований, разработки и использования подповерхностных радиолокаторов в СССР и России с 60-х годов по настоящее время/ Режим доступа: https://rmd2024.izmiran.ru/wp-content/uploads/2024/02/Ивашов-С.И._история-GPR.pdf

21. Денисов Р. Р. Капустин В. В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме https://www.georadar-expert.ru/download/denisov_kapustin_geofizika_4_2010.pdf

ВКР УлГУ

22. ГОСТ Р 54363 — 2011 «Полевые геофизические исследования» https://www.crru.ru/vestnik/ГОСТ%2054363-2011%20полевые%20ГИС.pdf

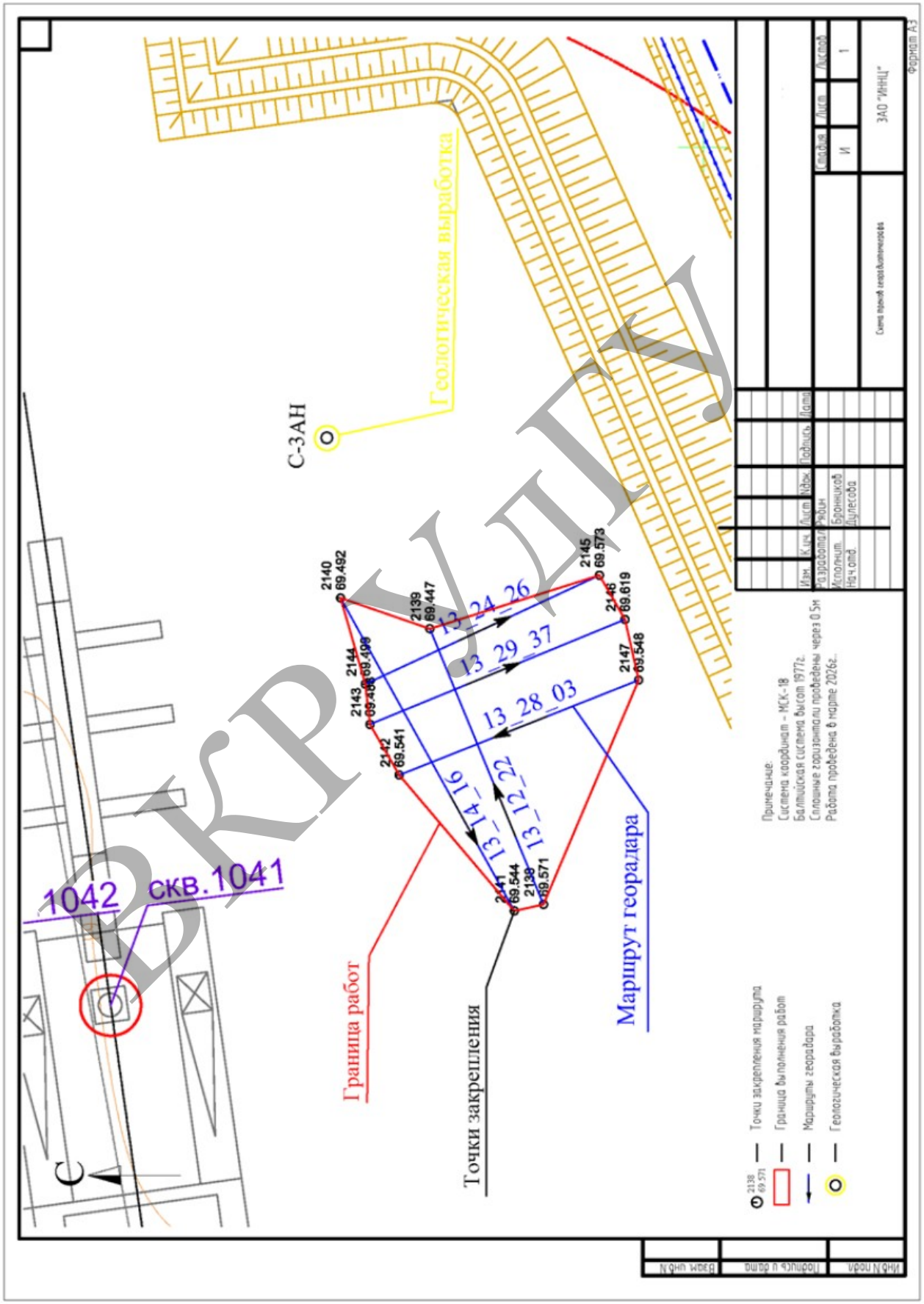
23. https://rusgeoradar.ru/wp-content/uploads/2018/11/08-1.png

24. https://amperof.ru/elektropribory/mimo-antenna-4g-lte.html?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

25. Основные принципы и применение георадиолокации https://geoinfo.ru/articles/osnovnye-printsipy-i-primenenie-georadiolokatsii/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

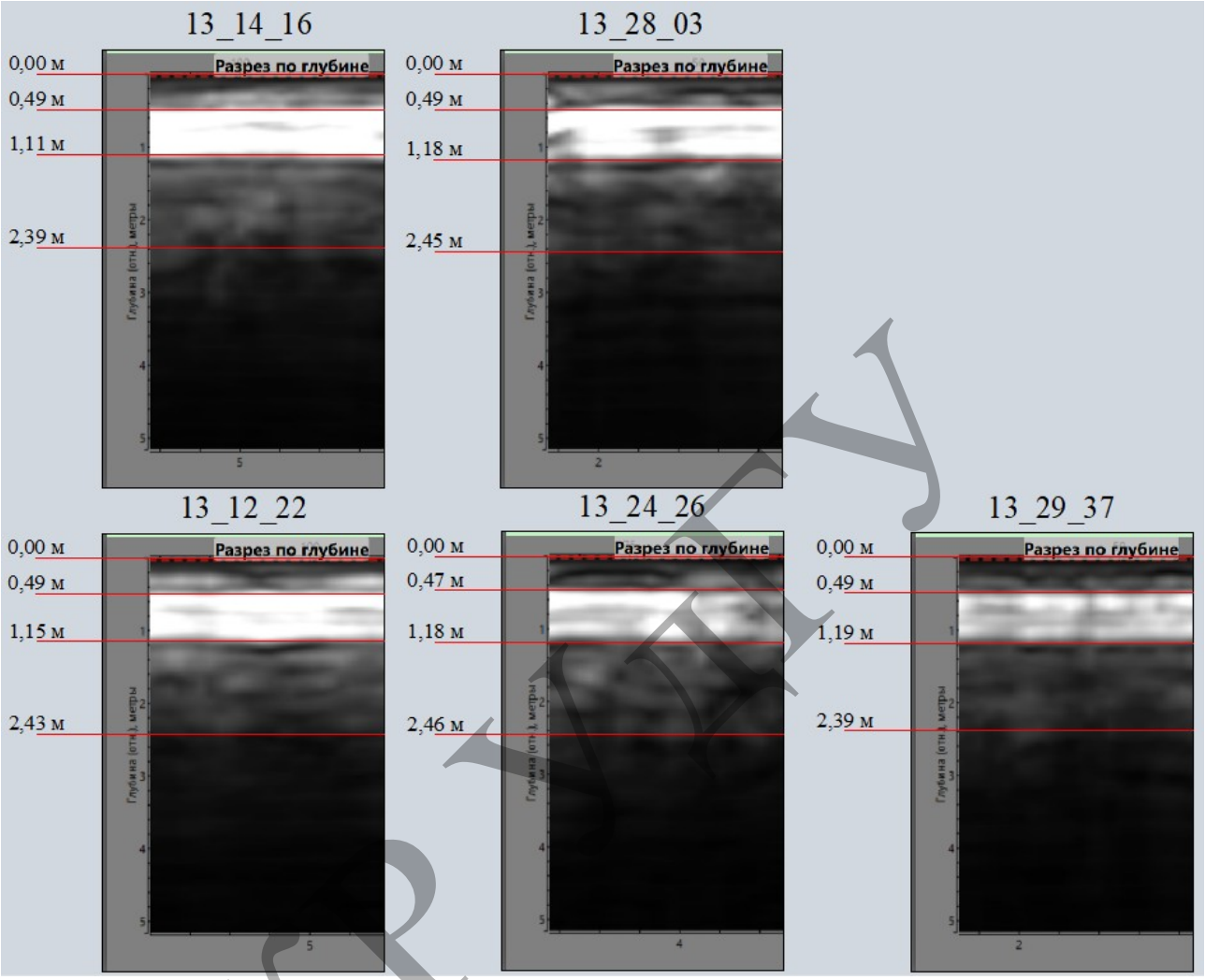
ВКР УДГУ

Приложение А.



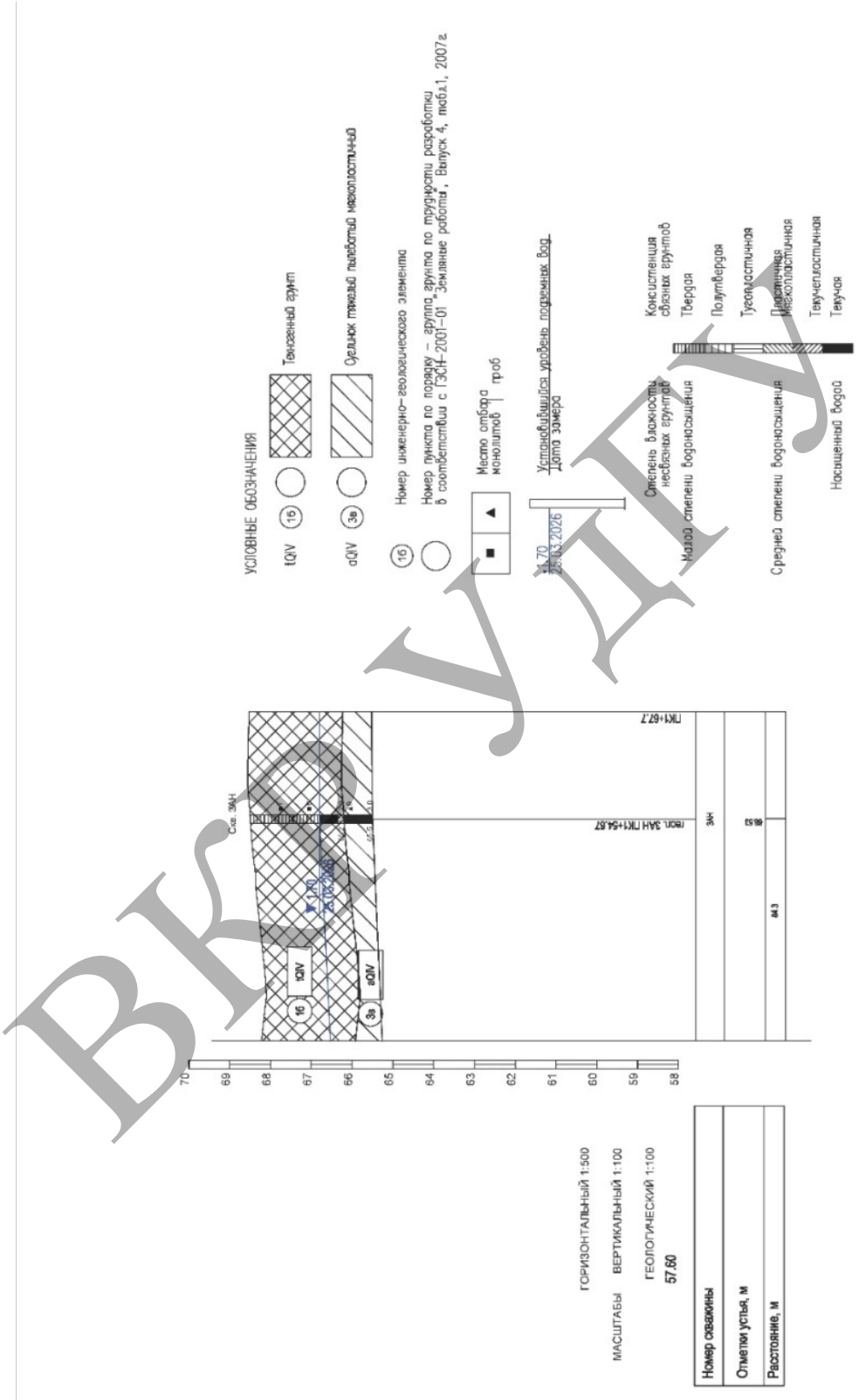
ВКРУДЦУ

Приложение Б



ВКР ИГУ

Приложение В



ВКГУДТУ

ВКР УлГУ