

Программный комплекс для информационного моделирования георадарных данных GeoReader

DOI: 10.17273/CADGIS.2019.2.4

Сухобок Ю.А., к.т.н., доцент кафедры «Железнодорожный путь» ДВГУПС (г. Хабаровск)
Курбатов М.С., генеральный директор ООО «ТИМ» (Республика Башкортостан, г. Учалы)

В статье представлен программный комплекс GeoReader — инструмент для создания и модификации пространственной модели внутреннего строения автомобильных дорог. Рассмотрены основные возможности программного обеспечения в части обработки и интерпретации радарограмм: автоматизированное выделение слоёв дорожной одежды, поиск зон структурных аномалий, расчёт скоростных параметров грунтовых и конструктивных слоёв, привязка координат профилей к траектории движения георадара, экспорт результатов в САПР и ГИС. Обозначены перспективы дальнейшего развития программного комплекса.

В настоящее время метод георадиолокации является одним из самых распространённых способов диагностики и мониторинга внутреннего состояния дорожных конструкций. Опыт многочисленных научных и практических работ [1, 2] показал его применимость для решения различных задач диагностики и мониторинга конструкций автомобильных дорог.

На данный момент приоритетной является разработка программного обеспечения, которое позволило бы создать информационную (геопространственную) модель по данным георадиолокационного обследования и встроить её в сводную модель инженерных изысканий при реализации BIM-проектов на всех этапах жизненного цикла. Основной принцип технологии информационного моделирования [3, 4] заключается в непрерывной привязке георадарных профилей с помощью приёмников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) или навигационных модулей мобильного лазерного сканирования (МЛС), преобразовании результатов расшифровки в облака точек и их экспорте в САПР и ГИС.

Рынок российского георадарного оборудования представлен несколькими крупными производителями и большим количеством компаний, ведущих собственные разработки. Наиболее популярны георадары серии ОКО («Логис-Геотех», г. Москва) и георадары серии ЛЮЗА (ООО «Компания ВНИИСМИ», г. Москва). Из зарубежных широко применяются георадары GSSI (США), IDS Georadar (Италия), MALA (Швеция), 3D-Radar (Норвегия).

Программное обеспечение, которым укомплектованы отечественные георадары, не позволяет создавать пространственные модели по георадарным данным из-за ряда ограничений:

- экспертозависимость и субъективность процесса обработки и интерпретации георадарных данных, вследствие чего возникает возможность появления ошибок;
- низкая производительность ручной обработки данных — скорость интерпретации специалистом находится в пределах 10 километров в смену (8 часов);
- неточность пространственной привязки данных — отклонения от системы координат проекта не позволяют впоследствии со-

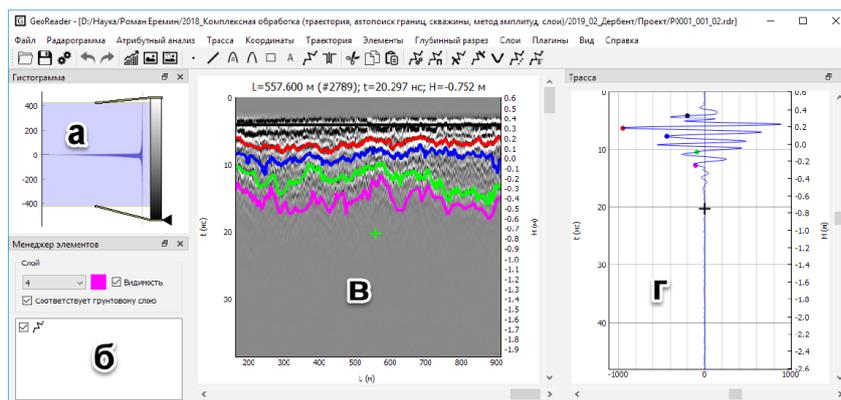


Рис. 1. Интерфейс рабочей области блока обработки одной радарограммы: а) гистограмма для настройки контрастности; б) менеджер элементов; в) область радарограммы; г) область текущей трассы

отнести полученные результаты с фактическим участком дороги, особенно если это касается скоростного сбора данных на протяжённых участках дорожной сети;

- недостаточная степень интеграции с САПР и ГИС.

Ряд отечественных программ снимают некоторые из вышеперечисленных ограничений, но нет ни одного решения, в котором был бы учтён весь требуемый функционал. Некоторые зарубежные программные комплексы (Radan7, GredHD и др.) лишены этих недостатков, но эти программы не адаптированы для поддержки российского оборудования, и их стоимость на порядок выше.

В данной статье рассматривается новый программный комплекс GeoReader, разработанный как специализированное средство для автома-

тизированной обработки и информационного моделирования больших объёмов георадарных данных.

Программный комплекс разделён на два основных блока: блок обработки одной радарограммы (рис. 1) и блок обработки пакета радарограмм (рис. 2).

Основной отличительной особенностью интерфейса является то, что он основан на принципах САПР. Так, на радарограмму можно наносить отдельные элементы: точки, отрезки, границы, скважины, дифракционные гиперболы, тексты. Элементы распределены по слоям; можно управлять видимостью как отдельных элементов, так и слоёв в целом.

При этом у слоя двойной смысл. С одной стороны, как и в любой другой САПР, слой — это совокупность элементов, с которыми можно

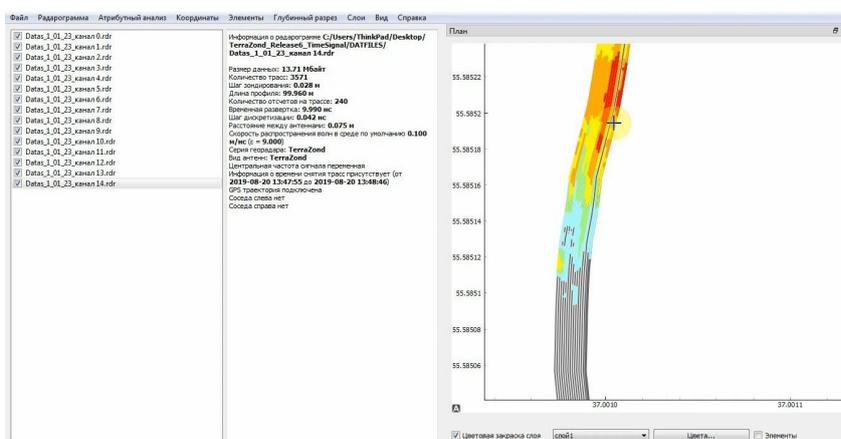


Рис. 2. Интерфейс рабочей области блока обработки пакета радарограмм: а) область радарограмм, входящих в проект; б) область параметров текущей радарограммы; в) траектория георадарных профилей с нанесённой цветовой индикацией о толщине слоёв

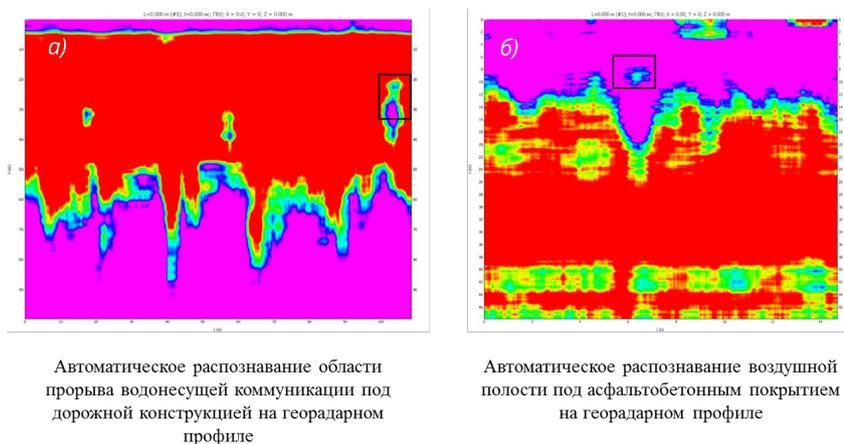


Рис. 3. Использование атрибутивного анализа для поиска структурных аномалий в конструкции дорожной одежды: а) область прорыва водонесущей коммуникации под дорожной конструкцией; б) воздушная полость под асфальтобетонным покрытием

производить некоторые групповые операции. С другой стороны, под слоем может пониматься грунтовый или конструкционный слой (воздушная прослойка, асфальтобетон, щебёночно-песчаная смесь и пр.).

В блоке пакетной обработки можно производить массовые операции над всеми радарограммами в проекте. Кроме того, в нём можно настроить отображение траектории каждого георадарного профиля с цветовой индикацией толщины интересующего слоя (рис. 2в).

В качестве исходных данных программный комплекс GeoReader принимает форматы файлов различного георадарного оборудования, а именно георадаров ОКО-2 (форматы GPR и GPR2), «Лоза» (формат TXT), MALA (формат RD3), GSSI (формат DZT), «Терразонд» (формат TRZ). Кроме того,

принимаются данные стандартного геофизического формата SGY и текстовый формат CSV.

В программу включены традиционные функции по предварительной обработке георадарных данных [5, 6]: коррекция дрейфа нуля, сглаживание сигнала, настройка усиления и выравнивание динамического диапазона, частотная фильтрация, повышение разрешающей способности (деконволюция) и др.

Независимо от поставленной при георадарном обследовании задачи, как правило, обработка данных сводится к одной из трёх подзадач: выделению границ грунтовых и конструкционных слоёв, поиску коммуникаций или выделению зон структурных аномалий (переувлажнений, ослаблений грунта, воздушных полостей и пр.). Далее приведено описание функционала,

позволяющего успешно решить эти подзадачи.

В программу встроен алгоритм полуавтоматического поиска границ раздела слоёв. Принцип его работы состоит в том, что инженер задаёт начальную трассу и начальную точку границы на трассе, с которой, по его мнению, начинается граница. Затем программа строит границу, причём на любом этапе инженер может вмешаться в процесс построения и внести необходимые исправления.

Выделение зон структурных аномалий решается с помощью алгоритмов атрибутивного анализа. Идея атрибутивного анализа заключается в расчёте разного рода числовых параметров (атрибутов), которые накладываются на исходную радарограмму. По изменению атрибутов в некоторых местах в сравнении с общей картиной можно делать вывод о наличии зон локальных неоднородностей.

В программу GeoReader встроены алгоритмы атрибутивного анализа, базирующиеся как на основе классической теории цифровой обработки сигналов и георадиолокации [5, 6], так и на основе современных алгоритмов цифровой обработки изображений. В частности, включены преобразование Гильберта, расчёт энергетических, амплитудных и спектральных амплитуд [7], алгоритмы текстурного анализа [8], фильтры Кэнни и Собеля и др. Примеры использования атрибутивного анализа с целью поиска зон структурных аномалий дорожной одежды приведены на рис. 3.

Одна из основных операций, которая в обязательном порядке выполняется при обработке георадарных профилей, — преобразование временного разреза в глубинный разрез, т.е. пересчёт исходной временной шкалы (в наносекундах) в глубинную шкалу (в метрах). Для этого необходимо определить скорости распространения радиоволн в среде либо диэлектрические проницаемости, что в целом эквивалентно.

Традиционный способ определения скоростей радиоволн — метод дифракционных гиперболических [6] — основан на выделении на радарограмме контуров гиперболического очертания, которые проявляются в случае, если в зоне разреза расположены локальные дифрагирующие объекты: большие камни, трубы, кабели. По углу наклона этих гиперболических определяется скорость рас-

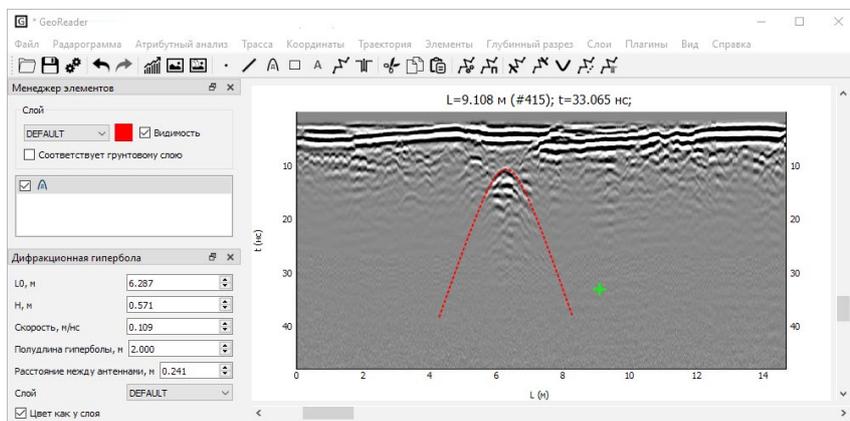


Рис. 4. Определение скорости распространения радиоволн по методу дифракционных гиперболических

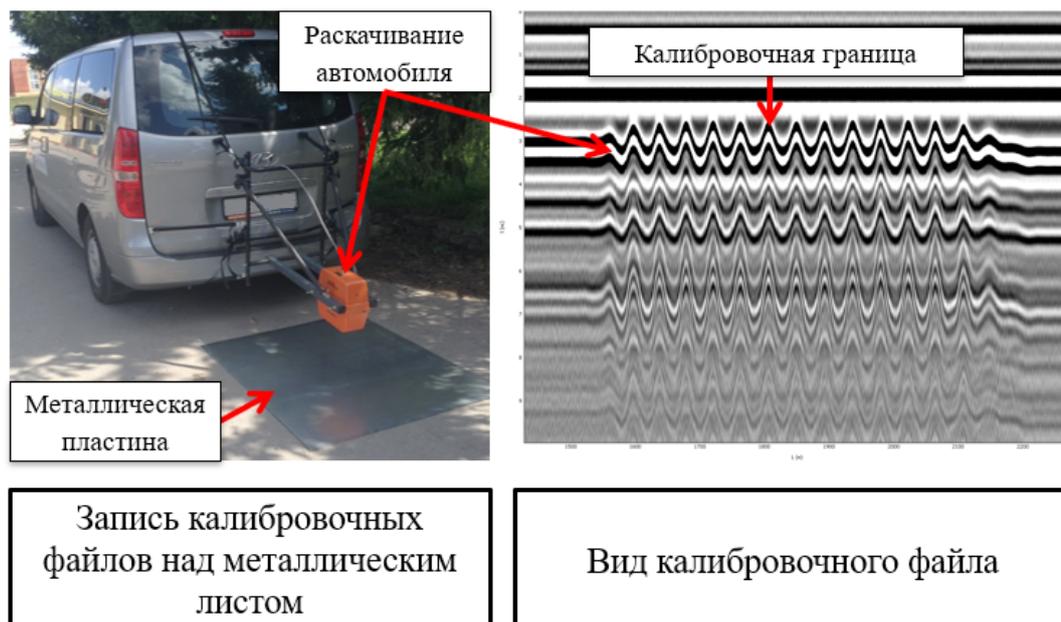


Рис. 5. Определение скоростей распространения радиоволн по методу анализа амплитуд

пространения радиоволн выше локального объёма. Данный метод встроен во все современные программы для обработки радарограмм, в том числе и в программный комплекс GeoReader (рис. 4).

Однако у метода дифракционных гиперболических волн имеется существенный недостаток: для его успешного применения требуется большое количество локальных неоднородностей, залегающих на разных глубинах, что редко встречается на практике. Поэтому в GeoReader также встроены другие методы определения скоростей: метод амплитуд и метод общей глубинной точки.

Метод амплитуд (рис. 5), впервые описанный в работе [1], основан на том, что отношение амплитуды, падающей на границу волны, к амплитуде отражённой волны зависит от диэлектрических проницаемостей этих сред. Перед непосредственным обследованием на участке проводят калибровку на металлической пластине, от которой электромагнитная волна отражается полностью. Зная амплитуду отражённого сигнала от металлической плиты, можно определить относительную диэлектрическую проницаемость в первом слое и, с большими погрешностями, во втором слое.

Метод общей глубинной точки (ОГТ) основан на проведении специального испытания — георадарного зондирования на переменной базе. Принципиальной особенностью этого испытания является то, что во время его проведения расстояние между антеннами георадара последовательно изменяется либо используется аппаратура с несколькими приёмниками, расположенными на различном расстоянии от передатчика. При обработке радарограмм, полученных при выполнении испытаний методом ОГТ, выделяются

годографы отражённых волн (рис. 6), с помощью которых можно определить скорость распространения радиоволн в каждом слое обследуемой среды [9].

Следует отметить, что, как правило, в программах обработки георадарных данных задаётся единая скорость распространения радиоволн для всего разреза. Часто это приводит к существенным ошибкам при расшифровке результатов, т.к. величина скорости может существенно меняться при переходе из одного слоя в другой. В GeoReader встроено два режима: либо скорость задаётся постоянной для всего разреза, либо для каждого слоя скорость задаётся отдельно. В последнем случае есть возможность уточнить зна-

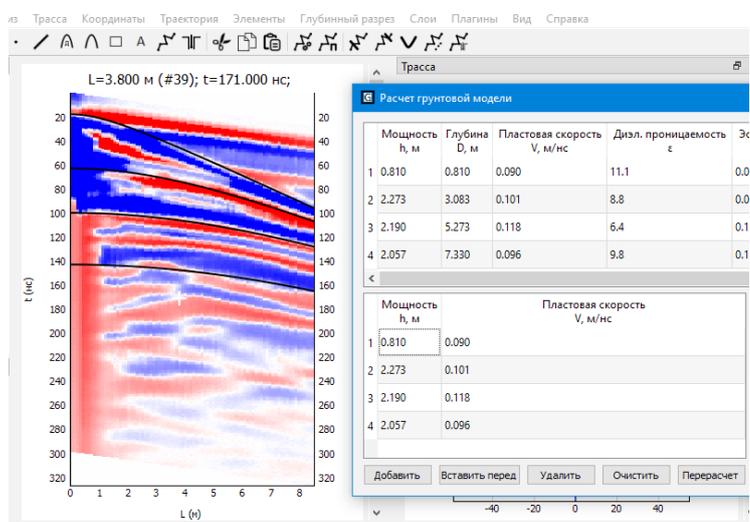


Рис. 6. Определение скоростей распространения радиоволн по методу общей глубинной точки (ОГТ): выделены гиперболические годографы отражённых волн

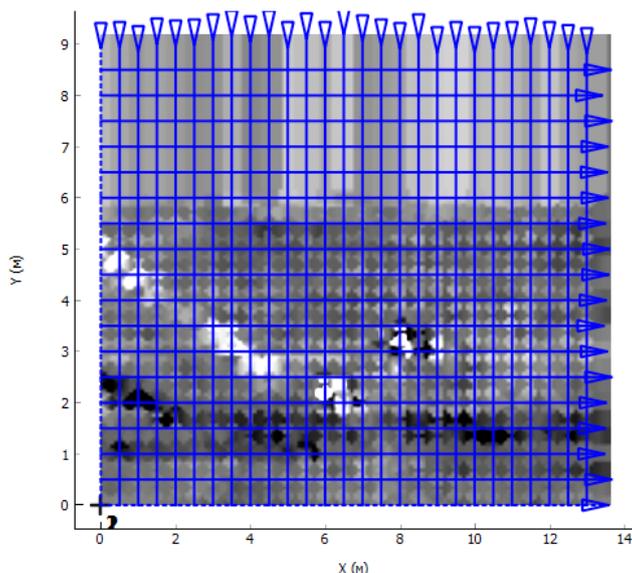


Рис. 7. Пример построения амплитудной карты: стрелками обозначены направления продольных и поперечных георадарных профилей

чения скоростей по данным контрольного бурения.

Часто результаты преобразования временного разреза в глубинный искажаются вследствие игнорирования расстояния между антеннами георадара (особенно сильно это проявляется для верхних слоёв обследуемой среды). Программный комплекс GeoReader может как учитывать это расстояние, так и пренебрегать им. Также в программу внесена возможность точного преобразования временного разреза в глубинный, при котором учитывается измене-

ние траектории радиоволн при переходе из слоя в слой [10].

В случае, если заданы отметки поверхности земли, при преобразовании временного разреза в глубинный GeoReader выполняет топографическую коррекцию, т.е. привязывает радарограмму к отметкам поверхности.

В программу встроена возможность обработки результатов площадной радарной съёмки, когда проводится обследование по заранее намеченной сетке продольных и поперечных профилей. GeoReader автоматически рассчитывает амплитудную карту для заданного на определенной глубине горизонтального сечения (рис. 7). Эта возможность часто используется при поиске подземных коммуникаций в условиях городской застройки.

Для привязки координат георадарных профилей в GeoReader включена возможность импорта траектории движения спутникового приёмника (мобильной лаборатории). Синхронизация радарограмм и траектории осуществляется по всемирному координированному времени (UTC). Помимо плановых координат, траектория может содержать высотные отметки точек сканирования. Есть возможность учесть сдвигку между антеннами георадара и спутниковым приёмником.

Результаты обработки: границы слоёв, точечные (локальные) объекты, данные о буровых скважинах — могут экспортироваться в различные САПР- и ГИС-форматы (DXF, SHP, KML, CSV). В соответствии с идеями информационного моделирования выгружаемые элементы кроме своих координат содержат также атрибутивную информацию. Так, границы содержат информацию о наименовании слоя, его электрофизических свойствах (скорости распространения радиоволн и диэлектрической проницаемости), цветах узловых точек и пр.

При расшифровке исходных данных можно выделить участки как с однозначно, так и с неоднозначно интерпретируемыми границами. Поэтому для качественной интерпретации радарограмм необходимо получить данные калибровочного бурения. В программном комплексе GeoReader реализована технологическая цепочка операций по взаимодействию с инженерами, осуществляющими буровые работы, представленная на рис. 8. Места потенциальных скважин намечаются на георадарных разрезах; далее они экспортируются в файл формата САПР/ГИС или таблицу координат выработок и передаются для выполнения контрольного бурения. После производства буровых работ в GeoReader передаются геологические колонки или акты отбора кернов, на основании чего производится уточнение положения границ.

С целью поиска зависимости между результатами георадарной съёмки и измерением упругого прогиба установкой ударного нагружения в программный комплекс GeoReader встроена

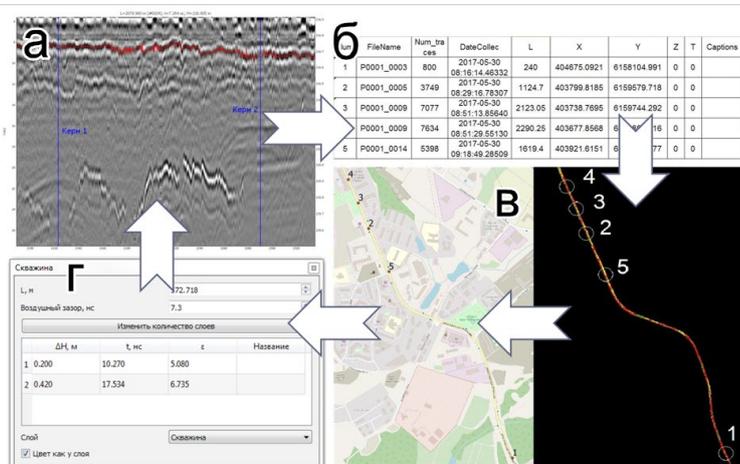


Рис. 8. Цикл операций по взаимодействию инженеров-интерпретаторов с инженерами, выполняющими буровые работы: а) определение положения скважин; б) импорт данных о положении скважин в обменный формат; в) получение данных геологических колонок; г) корректировка положения границ на радарограмме

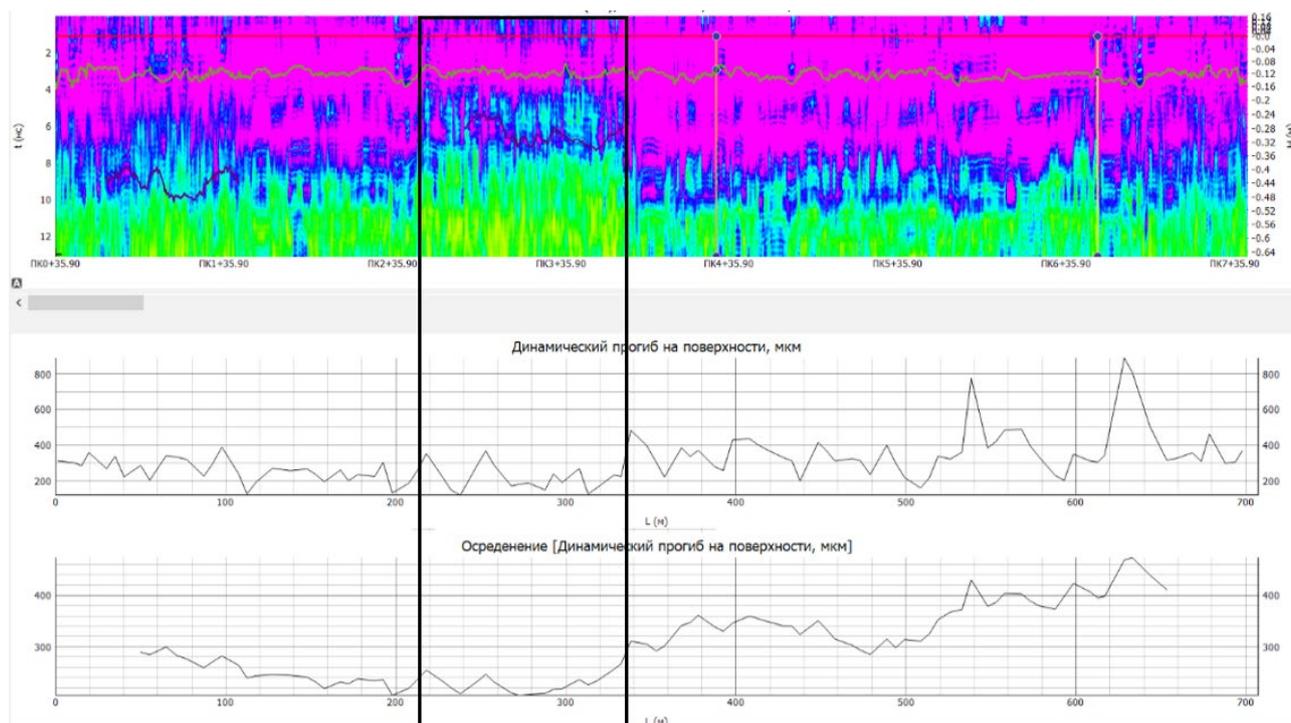


Рис. 9. Пример поиска корреляции между результатами атрибутивного анализа и данными установки ударного нагружения

возможность загрузки данных установки ударного нагружения с пикетной привязкой (рис. 9). Также можно подгружать любые другие внешние графики.

Таким образом, программный комплекс GeoReader позволяет широкому кругу потребителей (управлениям автомобильных дорог, дорожно-строительным, проектно-изыскательским организациям, научно-исследовательским институтам) получить достоверный результат по данным георадарной съёмки: указать на места с отклонениями значений по толщине уложенных слоёв дорожной одежды, места структурных аномалий в требуемой системе координат, соотнести полученный результат с данными других систем и сформировать массив цифровой информации для создания информационной модели по данным георадиолокации по принципам BIM-подхода.

В перспективе планируется внедрить полную автоматизацию процессов обработки радарограмм (поиска границ и зон структурных аномалий) на основе технологий машинного и глубокого обучения, а также встроить полную поддержку работы с многоканальными георадарами (типа георадиотомографов производства НПО «Терразонд») с автоматическим

построением трёхмерной поверхности геологической среды и расчётом скоростных параметров по методам общей глубинной точки (ОГТ) и общей средней точки (ОСТ).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 2922ГС1/45305). [\[1\]](#)

Литература:

1. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar // Journal of Applied Geophysics. 2000. Vol. 43. № 2–4. P. 119–138.
2. Lai W.W., Dérobert X., Annan P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis // NDT & E International. 2018. Vol. 96. P. 58–78.
3. Опыт информационного моделирования результатов георадарного обследования / Р.А. Еремин [и др.] // Engineering and Mining Geophysics 2019, Геленджик, 22–26 апреля 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901728
4. Еремин Р.А., Сухобок Ю.А., Рассадкин Н.Ю. Технология геопространственного моделирования георадарных данных // Дороги и мосты. 2018. № 38 (1). С. 144–167.
5. An overview of groundpenetrating radar signal processing techniques for road inspections / A. Benedetto et al. // Signal Processing. 2017. Vol. 132. P. 201–209.

6. Владов М.Р., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Издательство МГУ, 2004. 153 с.
7. Pudova N., Shirobokov M., Kuvaldin A. Application of the attribute analysis for interpretation of GPR survey data // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, 2018. P. 1–4.
8. Zhao W., Forte E., Pipan M. Texture attribute analysis of GPR Data for archaeological prospection // Pure and Applied Geophysics. 2016. Vol. 173. № 8. P. 2737–2751.
9. Forte E., Pipan M. Review of multi-offset GPR applications: Data acquisition, processing and analysis // Signal Processing. 2017. Vol. 132. P. 210–220.
10. Пупатенко В.В., Сухобок Ю.А. Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации // Мир транспорта. 2013. № 3. С. 154–161.