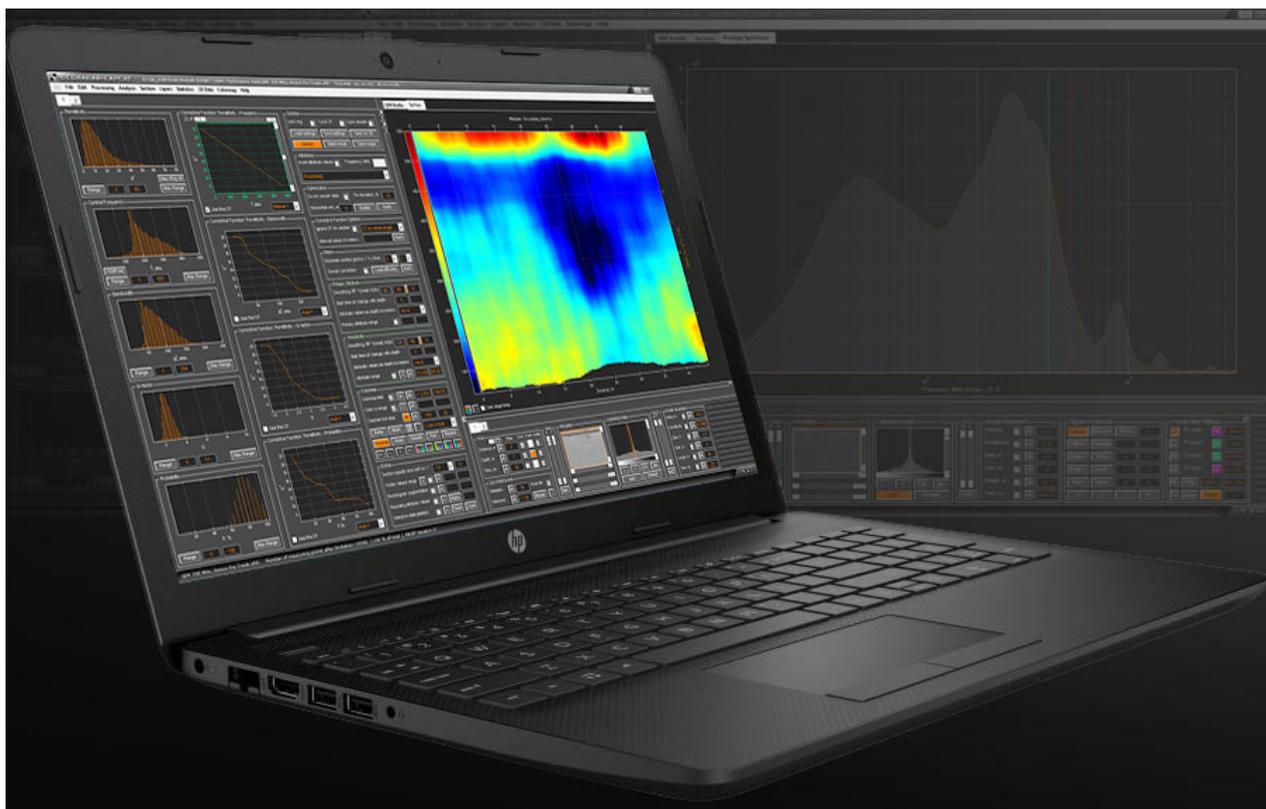


*С 2009 года на рынке
программного обеспечения
для георадиолокации*



ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

КРАТКИЙ ОБЗОР

Оглавление

Введение	2
Автоматизированный анализ BSEF	2
Преимущества автоматизированного анализа BSEF.....	8
Суммирование разрезов	9
Обработка сигналов георадарного профиля	9
Повышение разрешения георадарных данных.....	10
Подавление помех и воздушных отражений	14
Обзор графического интерфейса пользователя	15
Сравнительный анализ со сторонним программным обеспечением.....	24
Полезные ссылки.....	27

Введение

Идея разработки программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ возникла в результате обобщения многолетнего опыта профессиональной деятельности в области георадиолокационных исследований. Практические навыки, полученные на всех этапах производства георадарных работ, таких как общение с заказчиком, разработка методик полевых изысканий, камеральная обработка и формирование технического отчёта, позволили разработчикам программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ сформировать понимание того, каким должно быть современное программное обеспечение для обработки данных георадара и в каком виде должен быть представлен конечный результат этой обработки.

В итоге были определены три основных направления развития программного обеспечения георадиолокации:

1. Разработка и реализация алгоритмов, служащих для увеличения глубинности георадарного исследования без ухудшения вертикального разрешения георадиолокационного профиля;
2. Повышение информативности георадиолокационного исследования с помощью перехода от представления данных о подповерхностной среде в виде совокупности амплитуд отражённых сигналов в форме радарограммы к характеристикам этой среды и отражённого от неё волнового поля в форме разреза атрибута;
3. Минимизация влияния человеческого фактора на процесс обработки георадиолокационной информации с помощью автоматизация этого процесса. В связи с растущими по всему миру объёмами георадарных исследований, актуальность этого направления также возрастает.

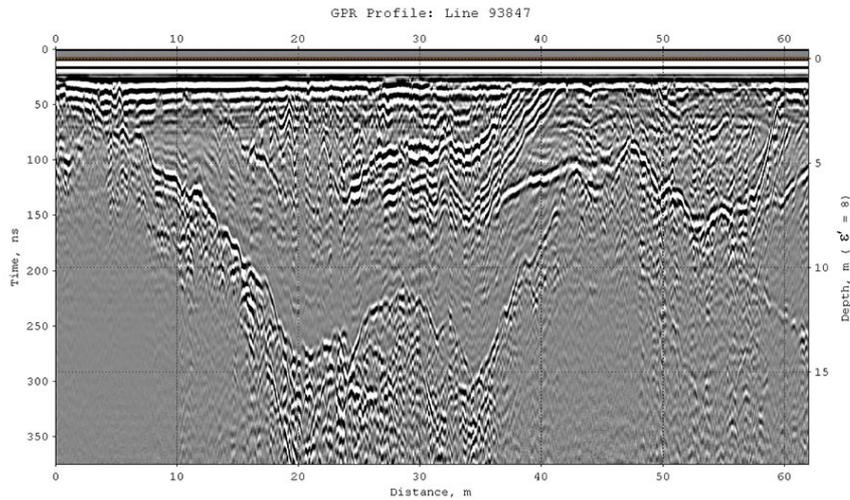
Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ был разработан с учётом всех этих факторов. В состав программного комплекса входят как широко используемые опции обработки георадарных данных, реализованные в каждом программном обеспечении для георадиолокации, так и разработанные специально для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ алгоритмы и методы, повышающие глубинность и информативность георадиолокационных исследований.

Главной такой разработкой является автоматизированный анализ поля обратного рассеяния BSEF (Back-Scattering Electromagnetic Field). Конечным результатом обработки георадарных данных методом автоматизированного анализа BSEF являются разрезы атрибутов, в качестве которых выступают электрофизические характеристики подповерхностной среды и отражённого от этой среды волнового поля, а также величины, вычисленные на основе этих характеристик.

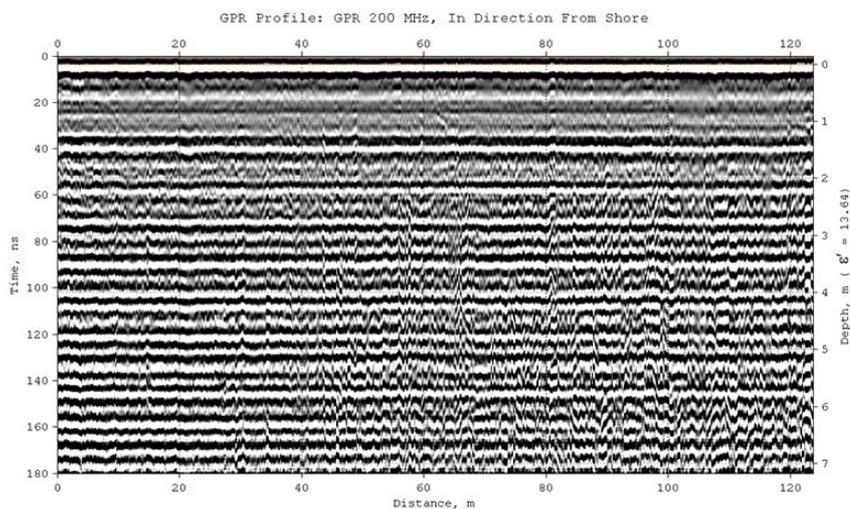
Автоматизированный анализ BSEF

При работе с георадиолокационными данными специалисты могут сталкиваться с ситуацией, когда качество результата выполненного ими георадиолокационного профилирования хуже, чем в рекламных материалах производителей геофизического оборудования. На рекламных радарограммах легко прослеживаются границы между слоями и хорошо видны дифрагированные отражения от локальных объектов, по которым несложно определить скорость распространения волн в подповерхностной среде и диэлектрическую проницаемость в слоях. Однако это не означает, что производители георадаров пытаются ввести в заблуждение потенциальных клиентов. Просто эти образцовые радарограммы получены в ходе георадиолокационного профилирования сред с малыми потерями и контрастными слоями, которые лучше всего отражают качество работы георадара.

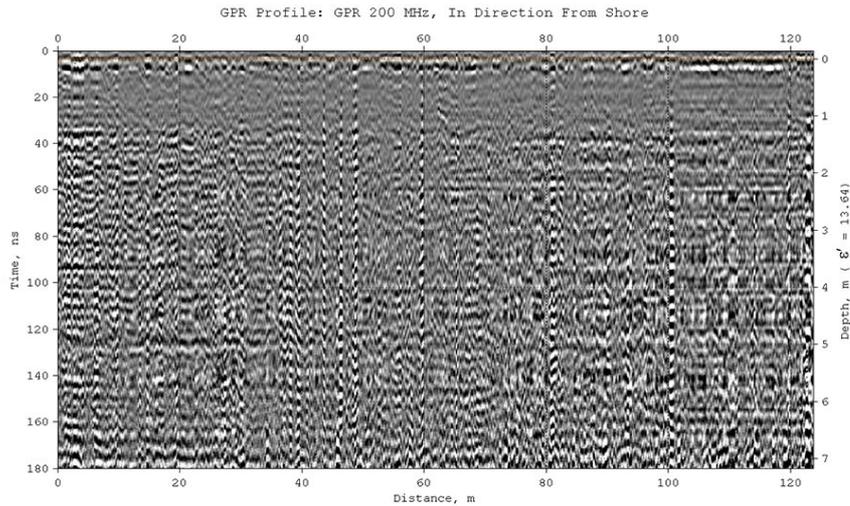
На рисунке ниже показан пример георадиолокационного профиля, записанного на высоконтрастной среде с малыми потерями. Эта полевая запись не требует обработки, поскольку в ней уже содержится достаточно информации о строении исследуемой среды.



Но наряду с такими благоприятными для георадиолокации средами, приходится исследовать и малоконтрастные толщи, обладающими высоким уровнем поглощения электромагнитной энергии, не имеющих резких переходов между слоями, в условиях действия помех различной природы. Нередко бывают и такие полевые записи:

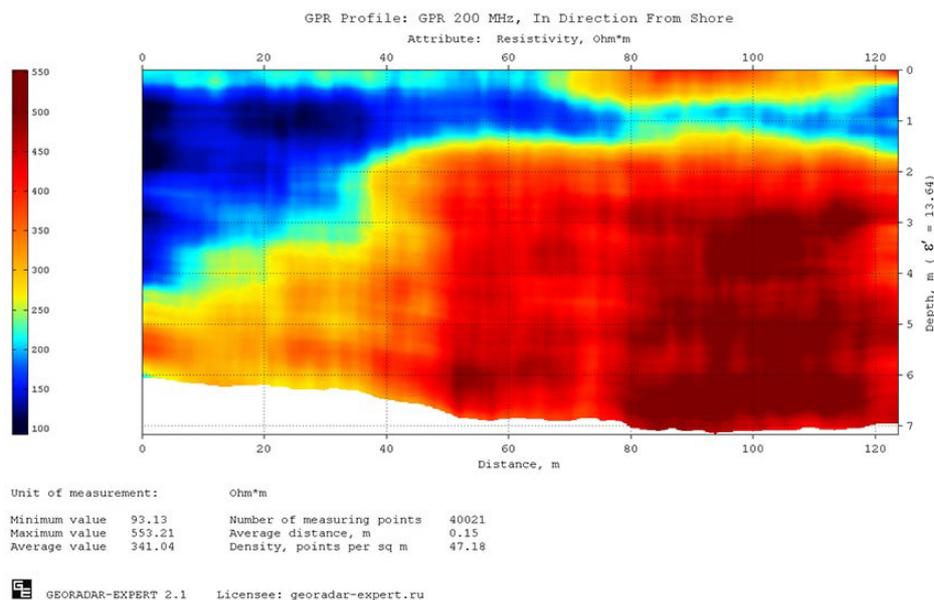


Данный георадиолокационный профиль записан георадаром 200 МГц на морском пляже. В процессе профилирования георадар удаляется от береговой линии в перпендикулярном ей направлении. Особенность данного исследования состоит в том, что зондируется прибрежный засоленный грунт, который обладает высокой проводимостью. По этой причине импульсы георадара быстро затухают, и уже на небольшой глубине интенсивность отражений от границ слоёв становится сопоставимой с уровнем шумов на георадиолокационном профиле. Шумы и помехи маскируют полезные отражения, поэтому визуальный анализ данного профиля не даёт положительного результата. Применение различного типа фильтраций для удаления помех, также не приводит к успеху. После удаления помех границы слоёв по-прежнему не видны:

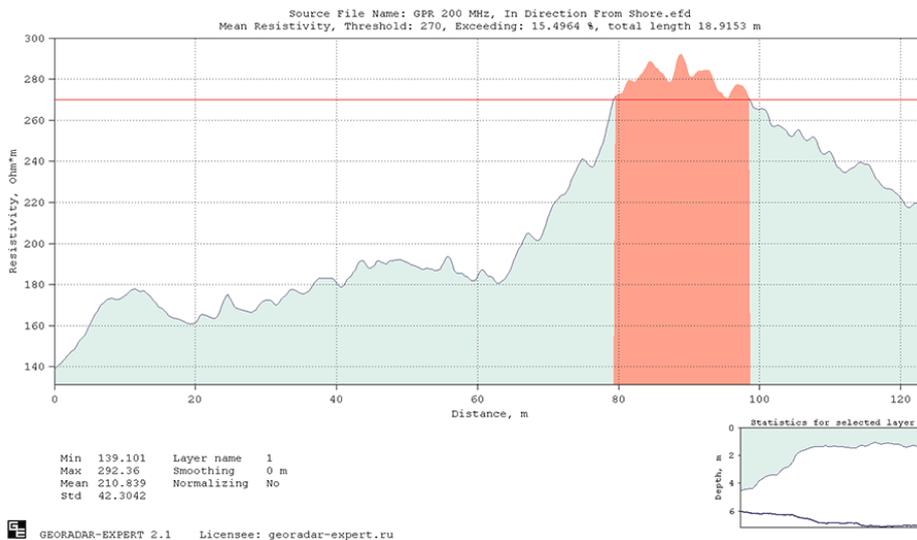


То, что после подавления помех на георадиолокационном профиле отражения от границ слоёв не становятся заметными, не означает их отсутствие. Когда полезные отражения близки по своим характеристикам к помехам, в процессе фильтрации происходит удаление этих отражений совместно с помехами. Алгоритм автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF работает более избирательно, и способен отделить полезные сигналы от близких к ним помех.

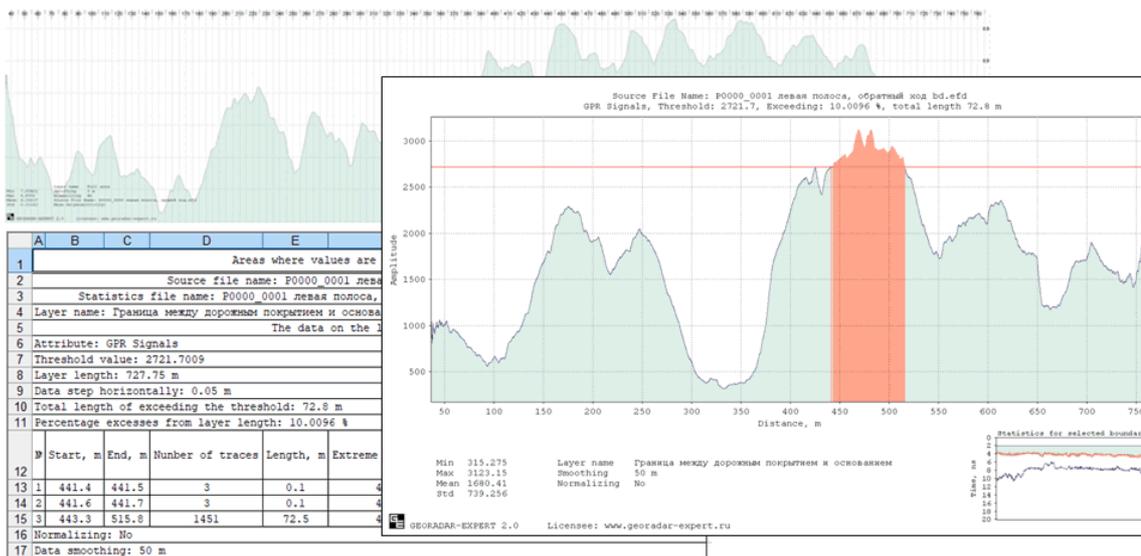
На рисунке ниже показан разрез атрибута **Resistivity** (удельное электрическое сопротивление), созданный по результатам автоматизированного анализа BSEF рассматриваемого георадиолокационного профиля. В отличие от визуально неинформативного профиля, разрез атрибута хорошо отображает строение подповерхностной среды. В пределах исследуемой толщи выделяются два основных слоя. Верхний слой характеризуется пониженными значениями удельного сопротивления, этот слой на разрезе отображается преимущественно синими цветами. Нижний слой обладает более высокими значениями удельного сопротивления и представлен жёлто-красными оттенками. По разрезу можно проследить, как по мере удаления от береговой линии, меняется мощность слоёв прибрежного грунта и удельное электрическое сопротивление внутри этих слоёв.



Наглядное представление изменчивости атрибута разреза можно получить с помощью статистического модуля программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, который даёт информацию в форме графиков и таблиц по 12 статистическим показателям. Показатели могут быть рассчитаны для каждого слоя, для указанных пользователем слоёв, для каждой границы слоя или для всего разреза в целом. В качестве примера, на рисунке ниже показан результат использования статистического модуля в виде графика изменения средних значений удельного электрического сопротивления в верхнем слое разреза атрибута **Resistivity**. Область графика, превышающая заданный пользователем порог, выделена красным цветом. Справа внизу располагается миниатюра разреза, на которой показаны границы слоёв. Заливкой выделен слой, данные которого представляет график.



Если на статистическом графике пользователь установил порог, который визуализируется в виде горизонтальной красной линии, то при сохранении изображения этого графика формируется таблица в формате MS EXCEL, которая содержит информацию или по областям превышения порога, или по областям, не превышающих порог – в зависимости от выбора пользователя. Это удобно использовать в исследованиях, где индикатором нарушения является повышенные или пониженные значения атрибута разреза – например, для мониторинга дорожного покрытия.



Очевидно, что переход от представления данных о подповерхностной среде в виде совокупности амплитуд отражённых сигналов (радарограмма) к характеристикам этой среды, полученным в результате применения метода автоматизированного анализа BSEF (разрез атрибута), заметно повышает информативность георадиолокационного исследования. Результат, представленный в виде разреза атрибута, более понятен заказчику этого исследования. Перечень атрибутов, используемых в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, достаточно широк. Весь список, как и описание атрибутов, можно посмотреть в разделе **Перечень атрибутов разреза** руководства пользователя, которое доступно для загрузки по [СЛЕДУЮЩЕЙ ССЫЛКЕ>>](#).

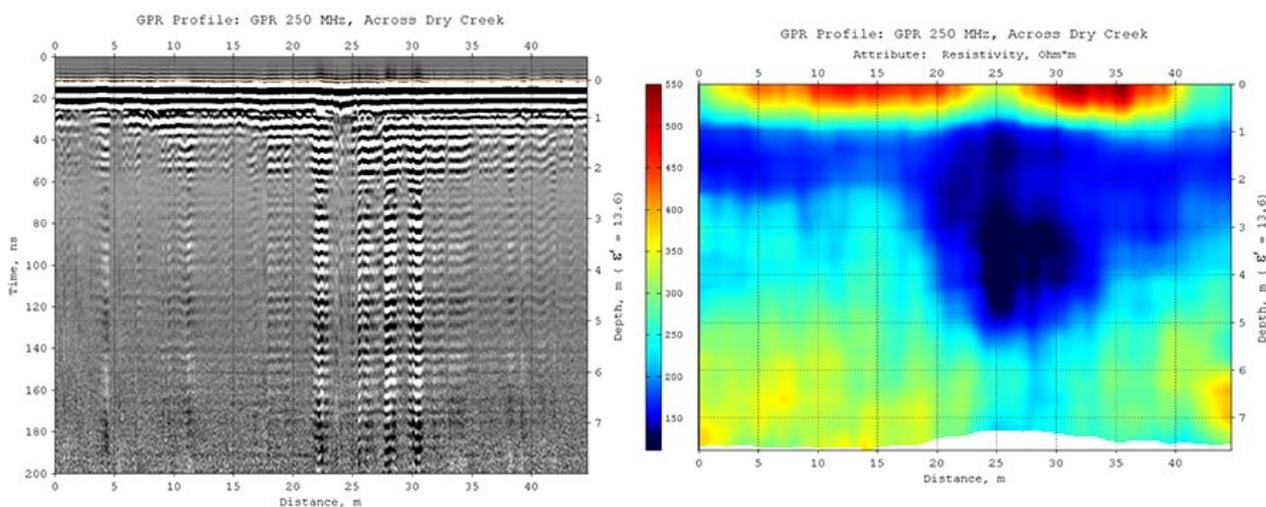
Одним из преимуществ метода автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF перед другими способами обработки георадиолокационных данных, является возможность исследовать этим методом подповерхностные среды, электрофизические характеристики которых изменяются по вертикали плавно, без резких скачков. Резкие изменения свойств среды в вертикальном направлении создают условия для отражения зондирующих импульсов и регистрации их георадаром. Среда, обладающие плавным характером изменения электрофизических свойств, отражений давать не могут. В подобных местах на радарограмме присутствует только высокочастотный шум и различного рода помехи, при условии, что исследуемая среда в этих местах не содержит локальных объектов.

Локальные объекты – это объекты в подповерхностной среде, линейные размеры которых сопоставимы с длиной волны зондирующего импульса георадара, а их электрофизические характеристики отличаются от электрофизических характеристик вмещающей среды. Например, в качестве таких объектов могут выступать камни в грунте. Локальные объекты обладают важной особенностью. Она состоит в том, что при взаимодействии зондирующего импульса георадара с локальными объектами, эти объекты становятся источником дифрагированных волн, кинематические и динамические характеристики которых несут информацию о свойствах вмещающей среды.

Из-за низкой интенсивности дифрагированных волн, которая часто сопоставима с уровнем помех, визуальным анализом можно обнаружить лишь малую часть этих волн на георадиолокационном профиле. Как правило, этого количества недостаточно для того, чтобы на основе измеренных характеристик этих волн получить детальную картину строения подповерхностной среды.

На рисунке ниже слева показан результат георадарного профилирования грунта с плавным изменением электрофизических характеристик. Георадиолокационный профиль записан георадаром 250 МГц. Профиль пересекает сухое русло сезонного ручья, тальвег которого находится на отметке 25 м от начала профиля. Электрофизические характеристики грунтов по данному профилю изменяются с глубиной плавно, без резких скачков, формирующих отражения на георадиолокационном профиле. По этой причине, профиль не содержит характерных протяжённых осей синфазности сигналов, которые интерпретируются как отражения от границ слоёв. В этих условиях получить информацию о строении исследуемой среды можно с помощью автоматизированного анализа поля обратного рассеяния.

На рисунке ниже справа представлен разрез атрибута **Resistivity** (удельное электрическое сопротивление). Разрез атрибута **Resistivity** показывает положение и форму отложений русловых потоков, а также распределение удельных сопротивлений внутри этих отложений. Разрез показывает, что граница между плотным грунтом и рыхлыми отложениями имеет вогнутую форму и достигает максимальной глубины 5.5 метров в области тальвега ручья. Пониженные значения атрибута разреза свидетельствуют о том, что ручей пересох не полностью, и наименьшее удельное сопротивление, указывающее на наибольшую влажность, находится в области тальвега ручья, на глубинах ниже 1 метра.



Время обработки, затраченное на выполнение автоматизированного анализ BSEF и расчёта разреза сравнительно невелико. Обработка рассматриваемого георадарного профиля длилась чуть менее минуты на компьютере с четырёх ядерным процессором 2.4 МГц и операционной системой Windows 10. Значительная экономия времени происходит в случае обработки большого объёма георадарных данных в пакетном режиме.

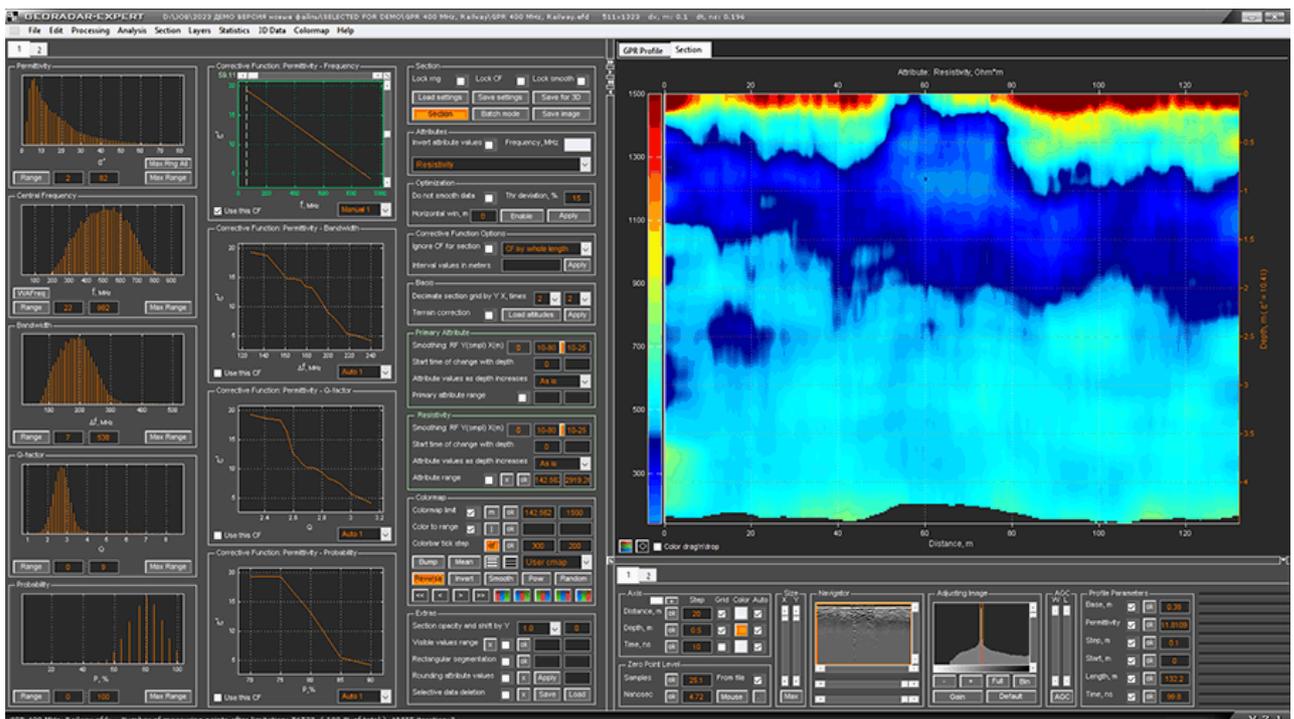
Особенно актуальна экономия времени для обработки результатов георадиолокационного профилирования протяжённых многокилометровых объектов, таких как автомобильные и железные дороги, или нитки магистральных трубопроводов. Пользователь, настроив параметры и запустив процесс автоматизированной обработки, может переключиться на другие задачи, а программный комплекс будет самостоятельно загружать георадарные профили и сохранять результаты обработки на жёсткий диск компьютера.

В ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предусмотрен экспорт результатов обработки в графические форматы, в форматы электронных таблиц MS EXCEL, в таблицы универсального текстового формат ASCII, а также в сеточный формат данных GRD программы Surfer. Экспорт данных в эти форматы позволяет более широко использовать результаты обработки с помощью стороннего программного обеспечения. Например, для дополнительного анализа или интеграции в различные геоинформационные системы. Изображения разрезов атрибута или сечений 3D сборки, сохранённые в графическом формате, можно использовать в качестве подложки на чертеже геоподосновы в AutoCAD или для вставки в отчёт о георадиолокационном исследовании.

Преимущества автоматизированного анализа BSEF

Использование метода автоматизированного анализа BSEF имеет следующие преимущества перед другими методами обработки георадиолокационных данных:

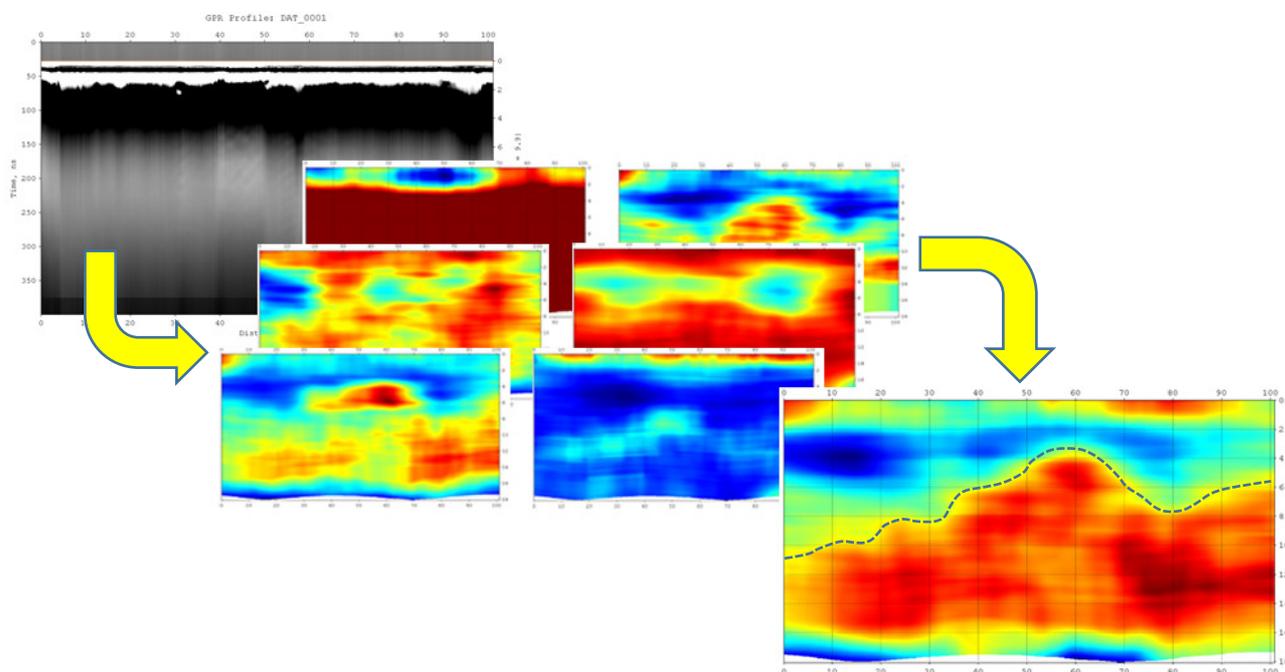
- Увеличивается глубинность георадиолокационного исследования. Алгоритм автоматизированного анализа BSEF имеет высокую избирательность и хорошо обнаруживает полезные отражения среди помех даже в условиях сильного зашумления данных на больших глубинах;
- Повышается информативность георадиолокационного исследования. Разрез атрибута, рассчитанный по результатам автоматизированного анализа BSEF, позволяет получить информацию о строении подповерхностной среды даже в условиях плавного изменения её электрофизических характеристик, когда на георадиолокационном профиле отсутствуют отражения от границ слоёв. Если же эти границы на профиле присутствуют, то информация об изменении электрофизических характеристик внутри каждого слоя также представляет интерес для исследователя;
- Возрастает скорость обработки полевого материала, что немаловажно при постоянно увеличивающихся объёмах георадарных работ, особенно в дорожной и железнодорожной отраслях;
- Расширяются области применения георадара и список решаемых задач;
- Сводится к минимуму влияние так называемого человеческого фактора на процесс обработки и интерпретации георадарных данных;
- Предоставляются более широкие, по сравнению с другими методами обработки георадиолокационных данных, возможности для исследования сложно построенных сред.



Суммирование разрезов

Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ обладает достаточно широким набором атрибутов для решения целого спектра задач георадиолокации. Бывает так, что разрез одного атрибута не даёт полной информации об исследуемом объекте, но различные фрагменты этой информации распределены по нескольким разрезам ряда атрибутов. В этом случае суммирование разрезов позволяет объединить разрозненную информацию об объекте исследования в один суммарный разрез. Также, суммирование устраняет артефакты, вызванные накоплением ошибок в процессе сбора и обработки георадиолокационной информации.

На рисунке ниже слева показан георадиолокационный профиль, записанный в ходе исследования погребённой долины георадаром 100 МГц. В центре показан набор разрезов ряда атрибутов для суммирования, созданных по результатам автоматизированного анализа BSEF этого профиля. Справа показан результат суммирования этих разрезов.



Визуальный анализ георадиолокационного профиля показывает, что его волновая картина малоинформативна с глубины 2 метра. Подошва долины, по априорной информации, находится ниже этого значения. На разрезах атрибутов просматриваются некоторые детали погребённого рельефа, однако каждый из разрезов в отдельности не даёт полной информации о строении изучаемой толщи.

Операция суммирования объединила эту разрозненную информацию в одно целое. Рельеф подошвы погребённой долины на суммарном разрезе хорошо прослеживается по всей его длине. На рисунке рельеф долины обозначен пунктирной линией. Данный пример иллюстрирует, как использование модуля суммирования позволило решить проблему недостаточной информативности георадиолокационного профиля и отдельных разрезов атрибутов по этому профилю.

Обработка сигналов георадарного профиля

Наряду с автоматизированным анализом поля обратного рассеяния BSEF и созданием на основе этого анализа разрезов атрибутов исследуемой среды и отражённого от неё волнового поля, в ГЕОРАДАР-

ЭКСПЕРТ реализован полный набор методов обработки данных, который должен присутствовать в каждом программном обеспечении для обработки георадиолокационной информации. Это различные виды преобразования сигналов, управление геометрией и визуализацией георадарного профиля, работа с вручную созданными пользователем границами слоёв, объединение двумерных данных в трёхмерную сборку и многое другое. Иными словами, программный комплекс имеет всё то, с чем привык работать специалист по георадиолокации.

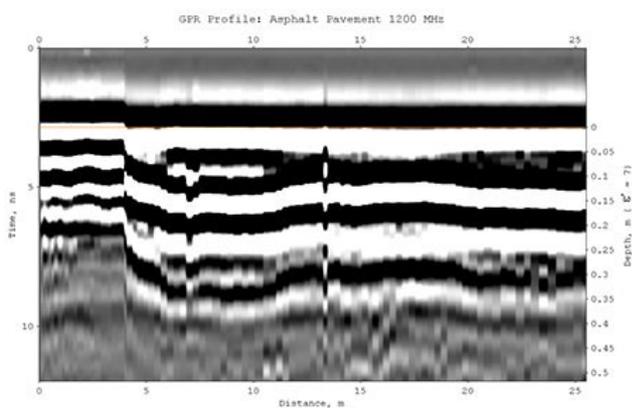
Функционал программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ подробно описан в руководстве пользователя, которое можно загрузить [ПО ЭТОЙ ССЫЛКЕ>>](#). Наряду с широко используемыми методами обработки данных георадиолокации, для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ специально разработаны алгоритмы и методы, позволяющие эффективно повысить разрешение сигналов георадиолокационного профиля и подавить сложные помехи.

Повышение разрешения георадарных данных

Специально разработанный для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ метод B-Detector (Boundaries Detector) предназначен для подавления помех и повышения вертикального разрешения сигналов георадиолокационного профиля, что облегчает прослеживание близлежащих, в вертикальном направлении, отражений от границ слоёв. С помощью B-Detector пользователь увеличивает частоту и ширину спектра сигналов на уже записанных георадарных данных, тем самым уменьшая длительность этих сигналов и увеличивая степень детализации георадиолокационного профиля.

В результате обработки методом B-Detector георадиолокационный профиль, полученный с помощью низкочастотной антенны, выглядит так, как будто бы частота антенны георадара для записи этого профиля была настроена на частоту, в несколько раз превышающую реальную частоту антенны. Вертикальное разрешение сигналов такого георадиолокационного профиля также в разы выше. При необходимости, методом B-Detector можно понижать центральную частоту сигналов георадиолокационного профиля.

Далее, в качестве примера обработки данных с помощью метода B-Detector, рассмотрен георадиолокационный профиль, записанный в ходе обследования дорожного покрытия георадаром

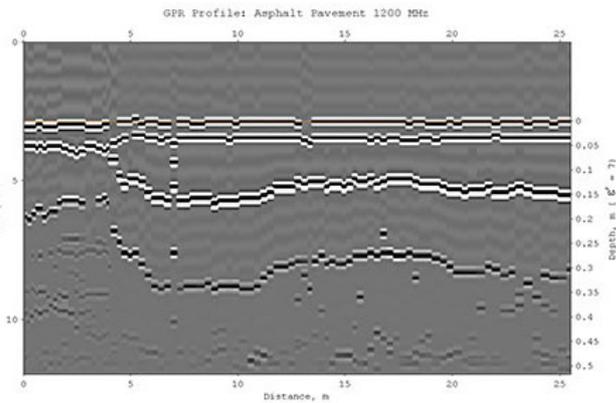


1200 МГц. Начиная с отметки 4 м по профилю асфальтобетонное покрытие автомобильной дороги состоит из двух слоёв. По априорной информации, верхний слой асфальтобетона имеет среднюю толщину 0.04 м, нижняя граница второго слоя асфальтобетона залегает в диапазоне глубин от 0.12 до 0.15 м от поверхности дорожного покрытия. Ниже располагается слой щебёночного основания, толщина которого, в среднем, составляет 0.15 м. Не все отражения от границ этих слоёв заметны на необработанном

георадиолокационном профиле. Например, сложно обнаружить отражение от границы контакта слоёв асфальтобетона на глубине 0.04 м. Из этого можно сделать вывод, что антенна 1200 МГц не обеспечивает достаточного разрешения сигналов на радарограмме для детального изучения строения этой дорожной конструкции.

В такой ситуации, казалось бы, логично использовать более высокочастотную антенну, которая излучает радиоимпульсы меньшей длительности, что улучшило бы разрешение сигналов. Но с увеличением частоты возрастает затухание радиоимпульса, а значит выбор более высокочастотной антенны приведёт к снижению глубинности георадарного исследования. По этой причине, на аппаратном уровне, невозможно достичь улучшения разрешения отражённых сигналов без уменьшения глубинности георадарного исследования. На программном уровне частично решить эту проблему можно с помощью метода B-Detector.

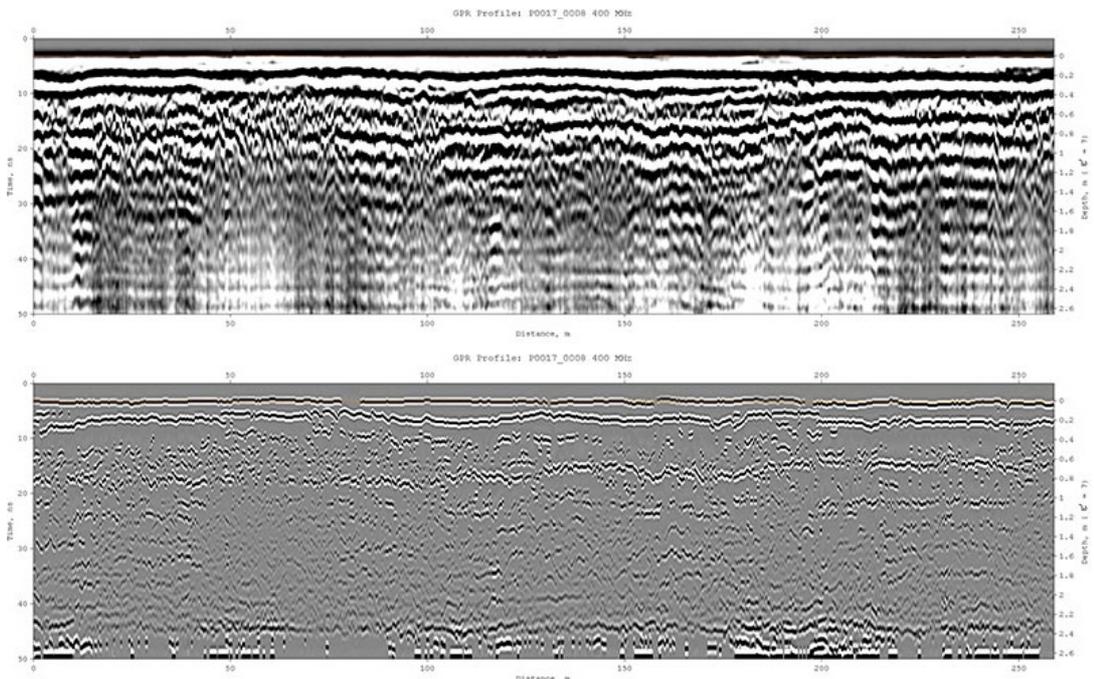
На рисунке ниже показан результат обработки рассматриваемого георадиолокационного профиля методом B-Detector. В результате применения этого метода разрешение сигналов георадиолокационного профиля заметно повысилось. Отражения от границ конструктивных слоёв



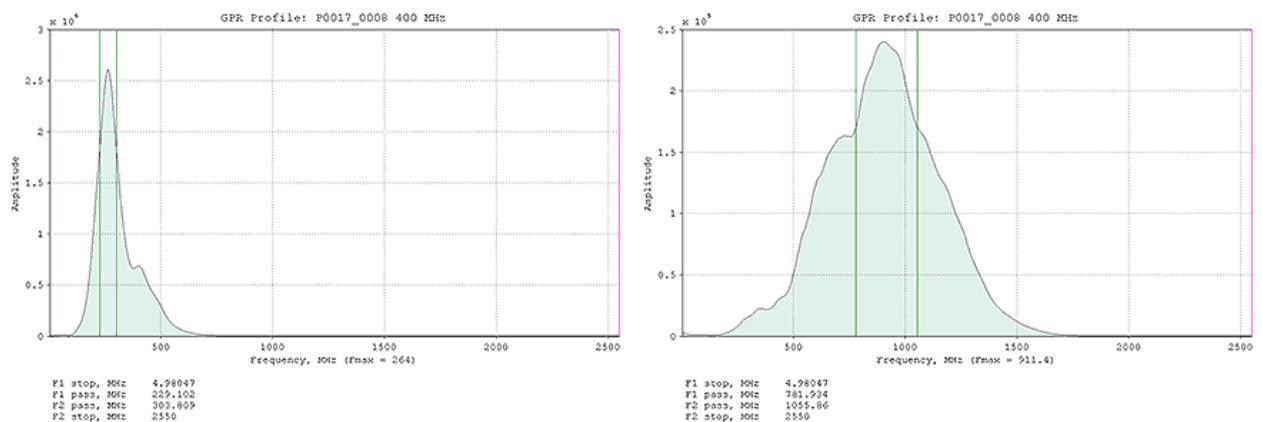
дорожной конструкции стали компактными, не перекрывают друг друга, и хорошо прослеживаются. Исчезли фазовые искажения, вызванные взаимовлиянием отражений от близлежащих границ. Выровненные фазы отражений делают георадиолокационный профиль хорошо адаптированным к процессу автоматизированной пикировки границ, которая реализована в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. Наличие опции автоматизированной пикировки границ в программном обеспечении для

георадиолокации важно для обработки больших объёмов данных, например, полученных в ходе автодорожных или железнодорожных георадарных исследований.

Далее, в качестве ещё одного примера, представлен результат георадиолокационного профилирования автомобильной дороги георадаром 400 МГц. На рисунке ниже, вверху показана необработанная полевая запись, внизу представлен результат её обработки методом B-Detector.



В результате применения метода B-Detector, на обработанном профиле уверенно прослеживается нижняя граница дорожного покрытия, глубина залегания которой колеблется около отметки 0.2 м. Эту границу сложно полностью обнаружить на исходных данных. На рисунке ниже слева показан амплитудно-частотный спектр сигналов исходного георадиолокационного профиля, справа – спектр сигналов после применения метода B-Detector:



ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ 2.0 Licensee: www.georadar-expert.ru

После применения метода B-Detector центральная частота сигналов георадиолокационного профиля увеличилась примерно в 3.5 раза – с 264 МГц до 911.4 МГц. Ширина спектра сигналов увеличилась в 3.7 раза – с 74.7 МГц до 277 МГц. Увеличение ширины спектра сигнала свидетельствует об уменьшении его длительности, что приводит к улучшению вертикального разрешения сигналов на георадиолокационном профиле. Таким образом, в результате применения метода B-Detector, георадиолокационный профиль выглядит так, как если бы он был записан не георадаром 400 МГц, а гипотетическим более высокочастотным георадаром с центральной частотой $400 \cdot 3.5 = 1400$ МГц, который обеспечивает не характерную для высокочастотного георадара глубину проникновения зондирующего импульса. Такую глубину, как у георадара с центральной частотой 400 МГц.

Часто, в дорожном исследовании требуется получить два георадиолокационных профиля по одному и тому же месту. Один профиль записывается с помощью высокочастотной антенны, обеспечивающей проникновение зондирующего импульса на глубину около 1 метра. Эта запись используется для изучения слоёв дорожного покрытия. Второй профиль записывается с помощью более низкочастотной антенны, обеспечивающей глубину исследования 3 - 8 метров. Такая антенна подходит для исследования грунта земляного полотна.

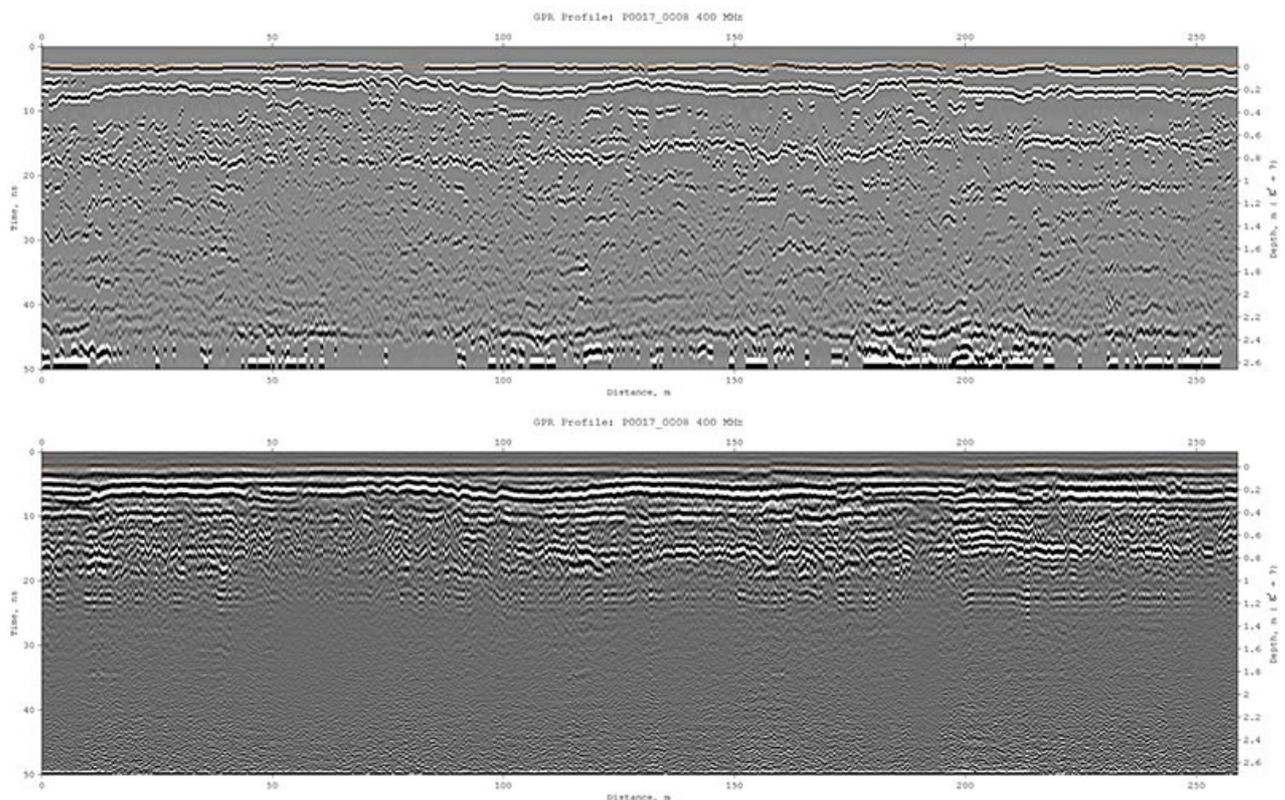
Если эксплуатируется одноканальный георадар, в котором не предусмотрена одновременная работа двух антенн, настроенных на различные частоты, то для записи двух георадиолокационных профилей по одному и тому же месту, необходимо два раза проходить георадаром один и то же профиль с разными антеннами.

В подобном случае, с помощью метода B-Detector можно достичь компромисса между затраченным временем на запись и обработку данных и качеством результата исследования. Использование одной среднечастотной антенны, например, антенны 400 МГц - как в рассматриваемом примере, сократит объём полевых и камеральных работ вдвое. Принимая во внимание значительный километраж георадарного профилирования при дорожных работах, это ощутимая экономия.

Ещё один аргумент в пользу применения метода B-Detector. Небольшая проектно-изыскательская организация может не обладать полным комплектом георадаров, антенны которых перекрывают весь диапазон рабочих частот георадиолокации для решения широкого спектра задач. Приобретение большого количества геофизического оборудования требует значительных финансовых затрат, а это чувствительно для небольшой организации. Применение метода B-Detector позволит сэкономить на высокочастотных антеннах, позволяя какое-то время иметь в наличии одну среднечастотную и одну низкочастотную антенну, например, 500 и 100 МГц.

Наряду с методом B-Detector, повышение вертикального разрешения георадиолокационного профиля в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ можно производить с помощью вейвлет-декомпозиции. Это преобразование напоминает оконное преобразование Фурье, только в преобразовании Фурье сигнал раскладывается на составляющие в виде синусов и косинусов, а при вейвлет-декомпозиции разложение производится с помощью специальных функций - вейвлетов, график которых по форме напоминает зондирующий импульс георадара. После вейвлет-декомпозиции, сигнал восстанавливается по высокочастотным уровням разложения. Центральная частота восстановленного сигнала и ширина его спектра больше, чем у исходного сигнала, а значит восстановленный сигнал короче, чем исходный.

Ниже показано сравнение результатов применения методов B-Detector (верхнее изображение) и вейвлет-декомпозиции сигналов.

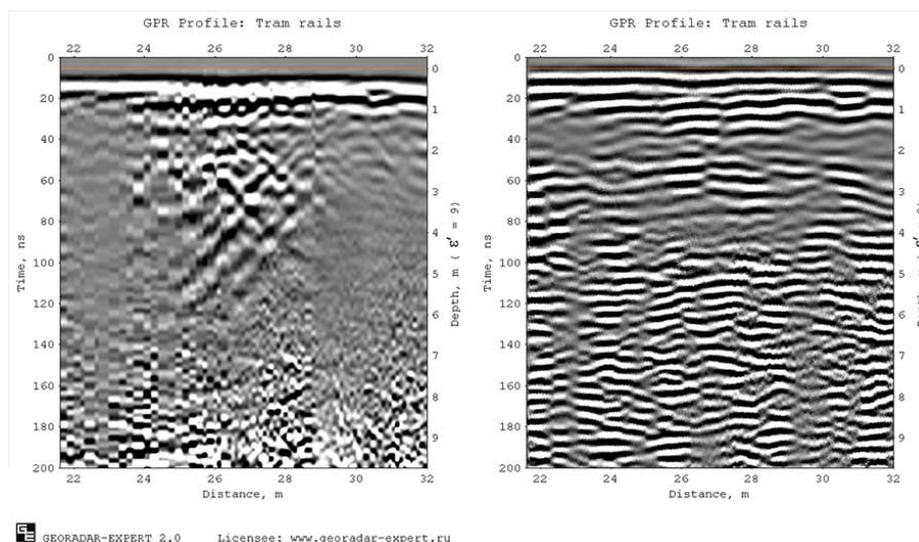


Каждый из представленных методов повышения разрешения георадиолокационных данных имеет свои достоинства. Пользователь, в зависимости от особенностей волновой картины георадарного профиля и задачи исследования, может выбирать, какой из этих методов использовать в каждом конкретном случае.

Подавление помех и воздушных отражений

Одна из проблем, с которыми сталкивается специалист по обработке георадиолокационных данных - это подавление отражений от объектов, расположенных на дневной поверхности. Эти, так называемые воздушные отражения, часто имеют высокий уровень амплитуд, что позволяет им хорошо маскировать полезные сигналы. Экранировка антенн георадара не помогает полностью избавиться от воздушных отражений. В наибольшей степени, воздушные отражения проявляются на радарограммах, полученных с помощью дипольных низкочастотных антенн, где экранировка не предусмотрена. Также, в качестве помех могут выступать дифрагированные отражения от контрастных локальных объектов, залегающих на небольшой глубине.

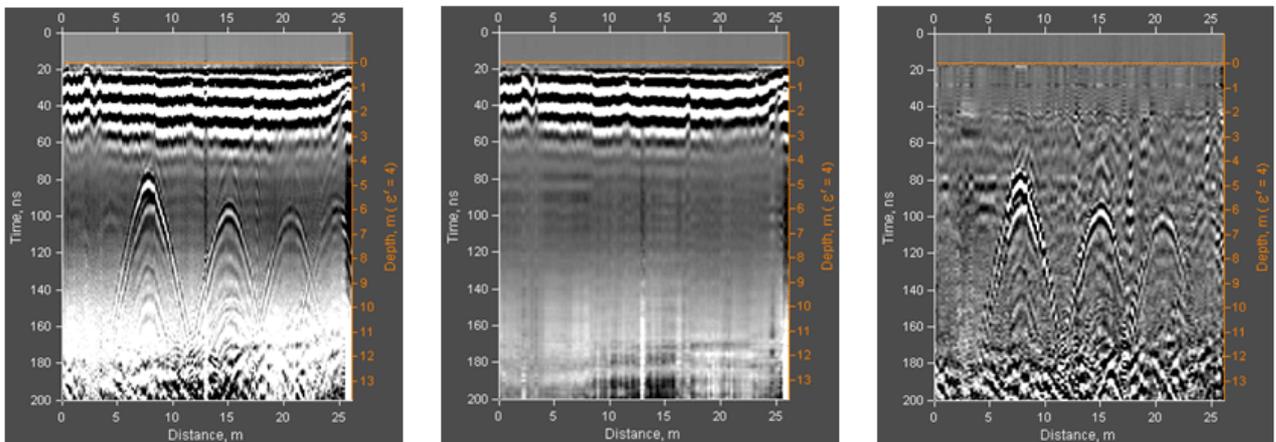
Пространственный фильтр, реализованный в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, позволяет решить эту проблему. В качестве примера подавления интенсивных маскирующих помех с помощью пространственного фильтра взят георадарный профиль, записанный георадаром 150 МГц, который пересекает трамвайные пути. На рисунке ниже слева показан необработанная запись. На этой записи интенсивные отражения от металлических рельсов и объектов инфраструктуры трамвайных путей накладываются на более слабые отражения от границ слоёв в грунтовой толще. Справа показан результат пространственной фильтрации. Дифрагированные отражения-помехи подавлены и не маскируют отражения от протяжённых границ



Наряду с пространственным фильтром, в программно комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ реализовано удаление помех с помощью разложения сигналов георадиолокационного профиля на компоненты. Если матрицу сигналов георадиолокационного профиля разложить на компоненты, а потом восстановить, предварительно отбросив те уровни разложения, которые содержат информацию о помехе, то на восстановленном георадиолокационном профиле помеха будет отсутствовать. Каждый уровень разложения содержит свои характерные особенности сигналов. Младшие уровни содержат пространственно протяжённые горизонтально ориентированные сигналы георадарного профиля. Чем выше уровень разложения, тем компактнее становятся компоненты разложения.

На рисунке далее слева представлен пример георадиолокационного профиля, который содержит два типа волн. Это протяжённые субгоризонтальные оси синфазности сигналов и хорошо просматриваемые дифрагированные отражения в форме гипербол. В центре показан результат

восстановления этого профиля по младшим уровням разложения. Заметно, на профиле исчезли характерные отражения в виде гипербол. Справа представлен результат восстановления по старшим уровням разложения. В этом случае отброшена информация о субгоризонтальных осях синфазности, а дифрагированные отражения не затронуты.



Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ насчитывает более двух десятков опций, предназначенных для обработки сигналов георадарного профиля. С помощью этих опций решается практически весь спектр задач, которые могут возникнуть у пользователя в процессе обработки георадиолокационных данных. Пользователь может сохранить последовательность шагов обработки данных в файл и применять эту последовательность в дальнейшем.

Автоматизация действий пользователя по обработке однотипной георадиолокационной информации освобождает его от присутствия за компьютером. В режиме пакетной обработки пользователю нужно лишь выбрать группу файлов георадарных данных, после чего загрузка, обработка и сохранение результата производится в автоматическом режиме, без участия пользователя.

В данном обзоре представлено описание лишь некоторых, специально разработанных для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, опций обработки георадиолокационной информации. Полное описание возможностей программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ смотрите в руководстве пользователя, которое можно скачать [ПО ЭТОЙ ССЫЛКЕ >>](#).

Обзор графического интерфейса пользователя

Графический интерфейс пользователя программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ организован в виде набора вкладок, объединённых в группы. Каждая группа вкладок предназначена для определённых задач и содержит панели с элементами управления этими задачами. Всего имеется три группы вкладок, условно названных по их расположению в главном окне программного комплекса – левая группа, верхняя и нижняя.

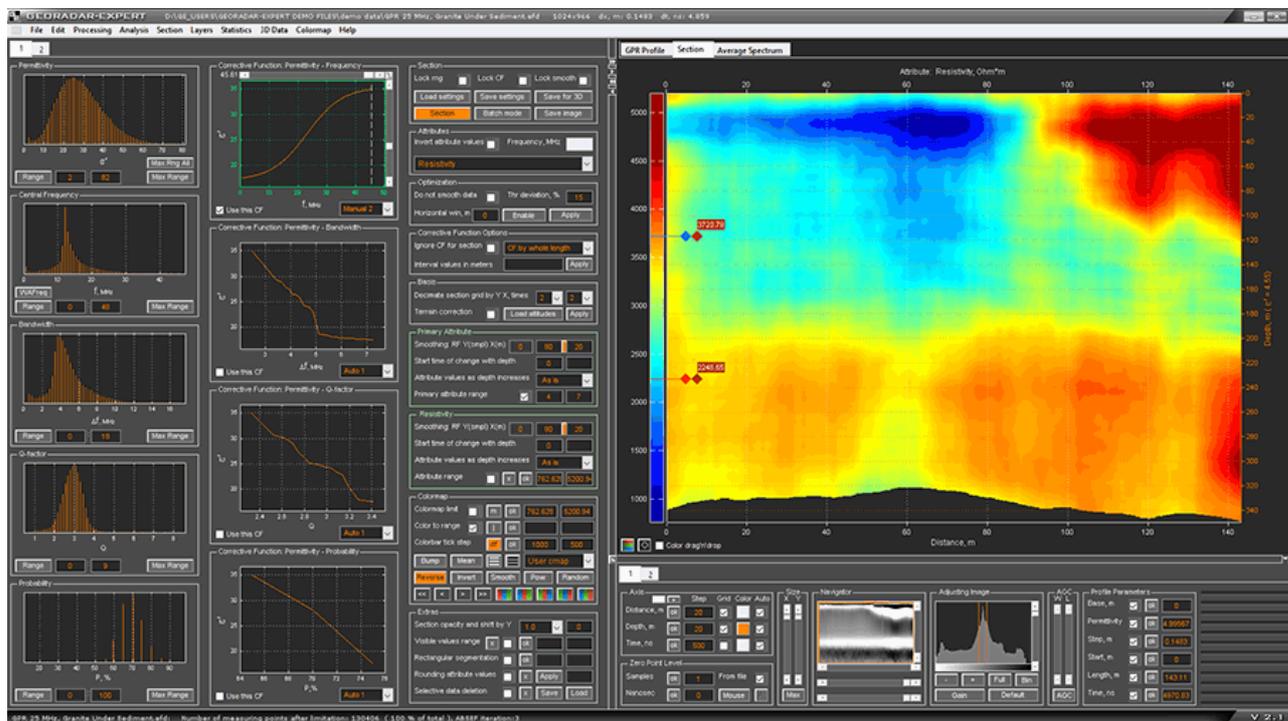
Левая группа вкладок находится в левой части рабочего окна программного комплекса и содержит панели визуализации результатов автоматизированного анализа BSEF в виде гистограмм, а также панели с элементами управления параметрами создания разреза атрибута. Когда в программу загружен файл данных георадиолокационного профиля, который не содержит результатов анализа BSEF, левая группа вкладок скрывается и в главном окне программного комплекса остаётся только верхняя и нижняя группы вкладок.

Нижняя группа вкладок находится в нижней части главного окна программного комплекса и служит для размещения панелей с элементами управления обработкой и визуализацией георадиолокационных профилей. Верхняя группа вкладок занимает пространство, ограниченное левой и нижней группами вкладок, и предназначена для размещения осей визуализации данных. Пользователь может менять соотношение размеров вкладок, а также скрывать левую и нижнюю группы, тем самым увеличивая область визуализации данных в верхней группе вкладок.

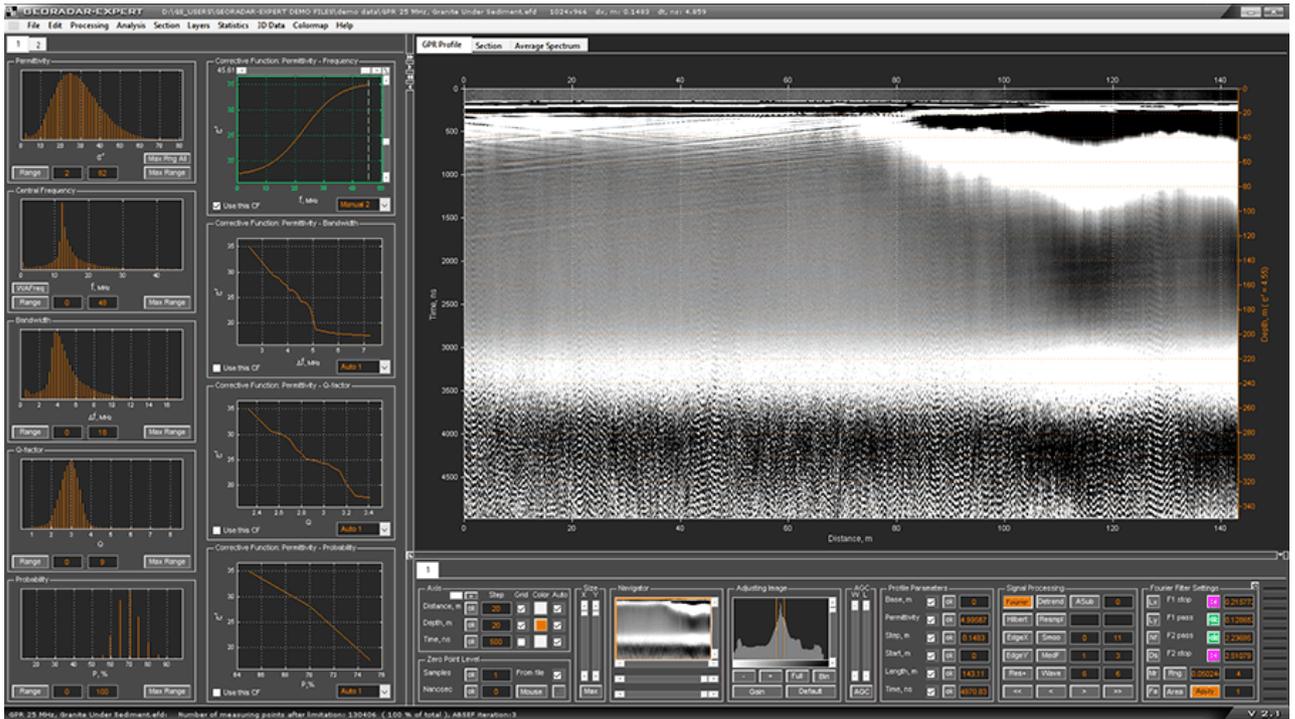
В ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предусмотрено два способа организации рабочего пространства главного окна программы – режим 2D и режим 3D. В зависимости от того, какой тип данных загружается в программу, программный комплекс автоматически выбирает соответствующий загружаемым данным режим рабочего пространства.

Режим 2D предназначен для работы с двумерными данными – георадиолокационным профилем и разрезом атрибута, созданным по результатам автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF. Режим 3D служит для работы с трёхмерной сборкой разрезов, созданной по результатам автоматизированного анализа BSEF георадиолокационных профилей, полученных в ходе площадного георадарного исследования.

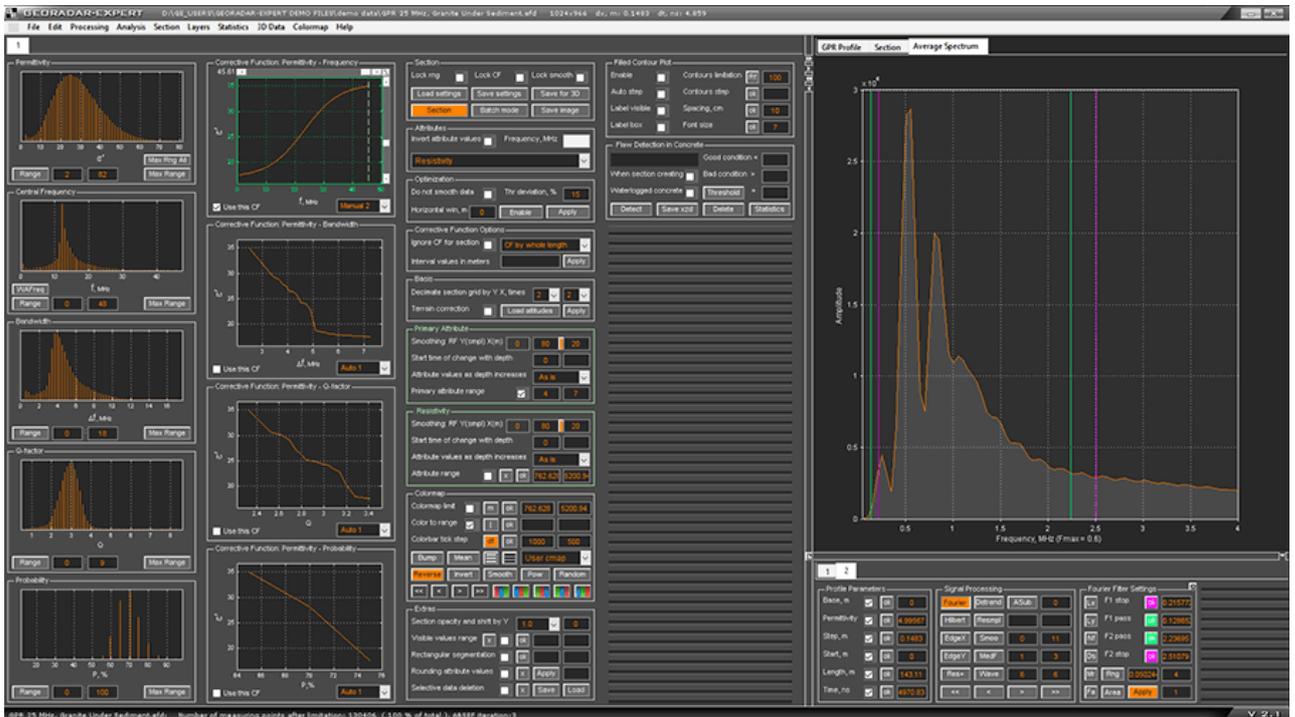
Далее представлена серия снимков экрана главного окна программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ в различной конфигурации. Ниже показано главное окно в режиме 2D с открытой вкладкой визуализации разреза атрибута. Соотношение вкладок установлено по умолчанию для экрана компьютера с разрешением Full HD.



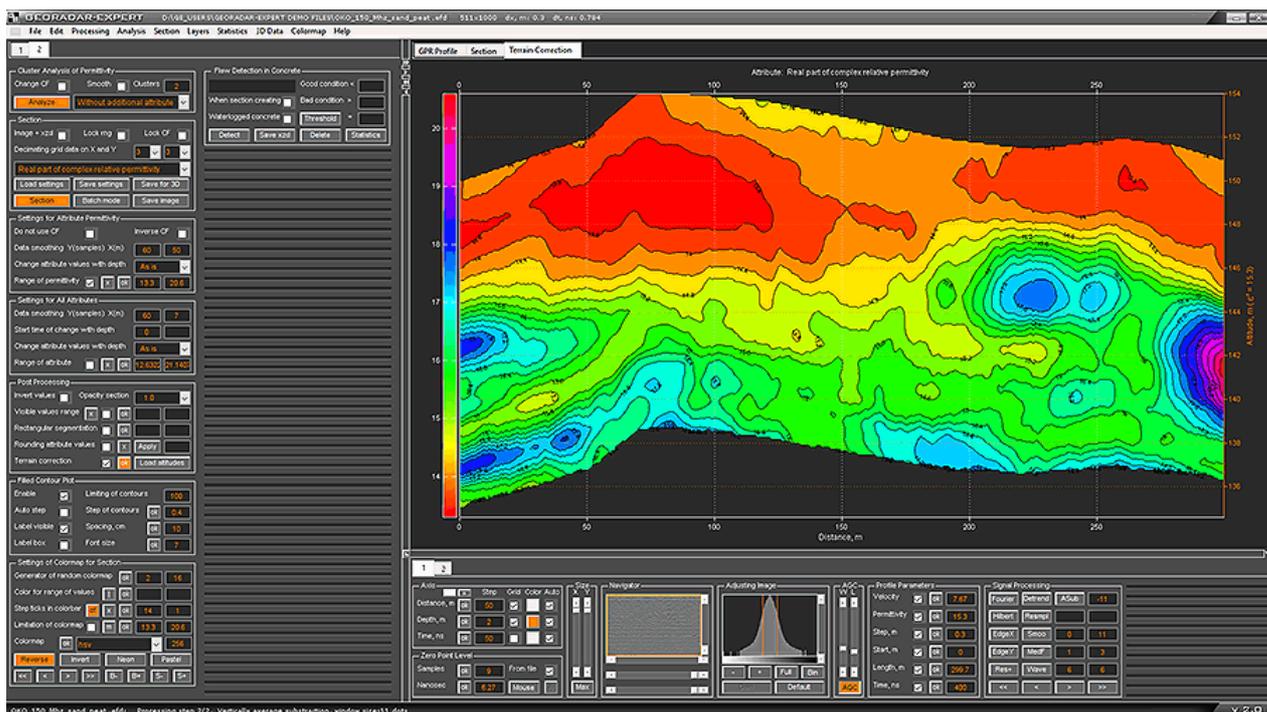
Ниже показано главное окно программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ с открытой вкладкой визуализации георадиолокационного профиля. В отличие от предыдущего примера, соотношение групп вкладок изменено, ширина верхней и нижней групп вкладок увеличены за счёт уменьшения ширины левой группы.



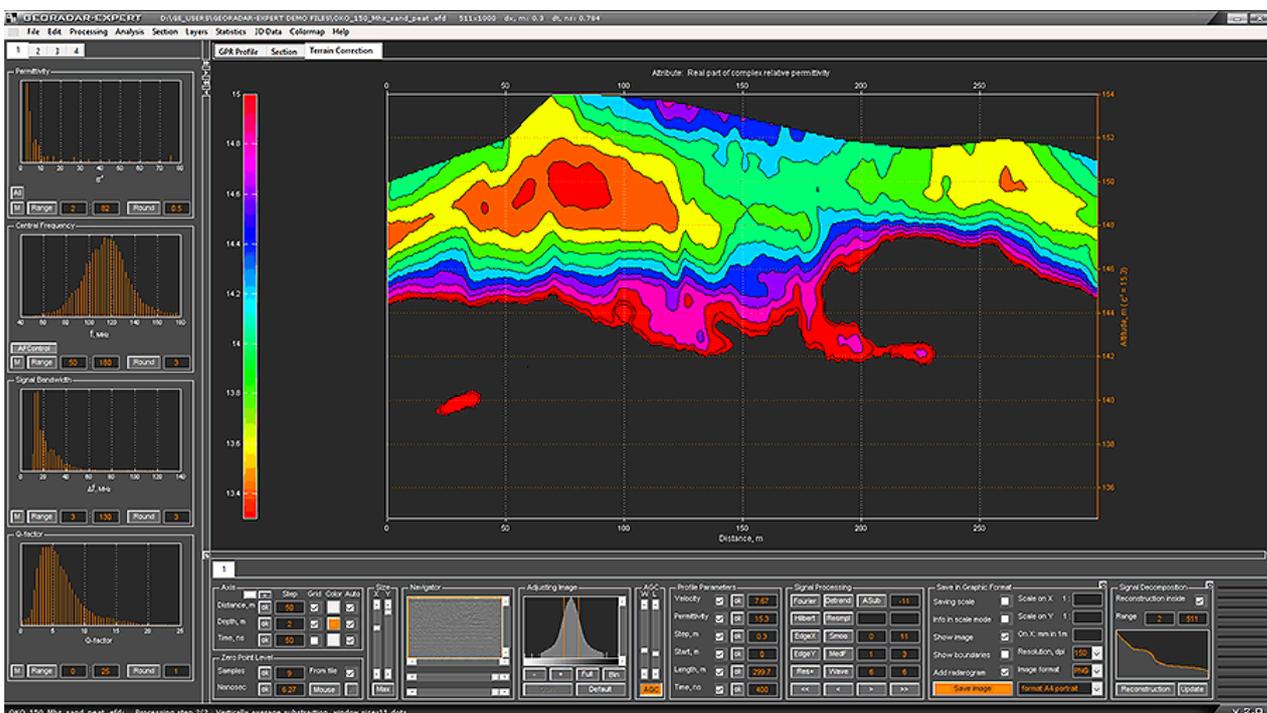
Далее показано главное окно программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ с открытой вкладкой отображения амплитудно-частотного спектра сигналов георадарного профиля. Ширина левой группы вкладок увеличена за счёт уменьшения ширины верхней и нижней групп.



Ниже показано главное окно программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ с открытой вкладкой визуализации разреза атрибута с учётом поправки за рельеф.



Далее показана вкладка визуализации разреза с учётом поправки за рельеф в режиме ограничения видимости атрибута. В этом режиме устанавливаются прозрачными те области разреза, значения атрибута которых выходят за границы заданного пользователем диапазона. Скрытые области не принимаются во внимание в процессе статистического, и других анализов разреза.

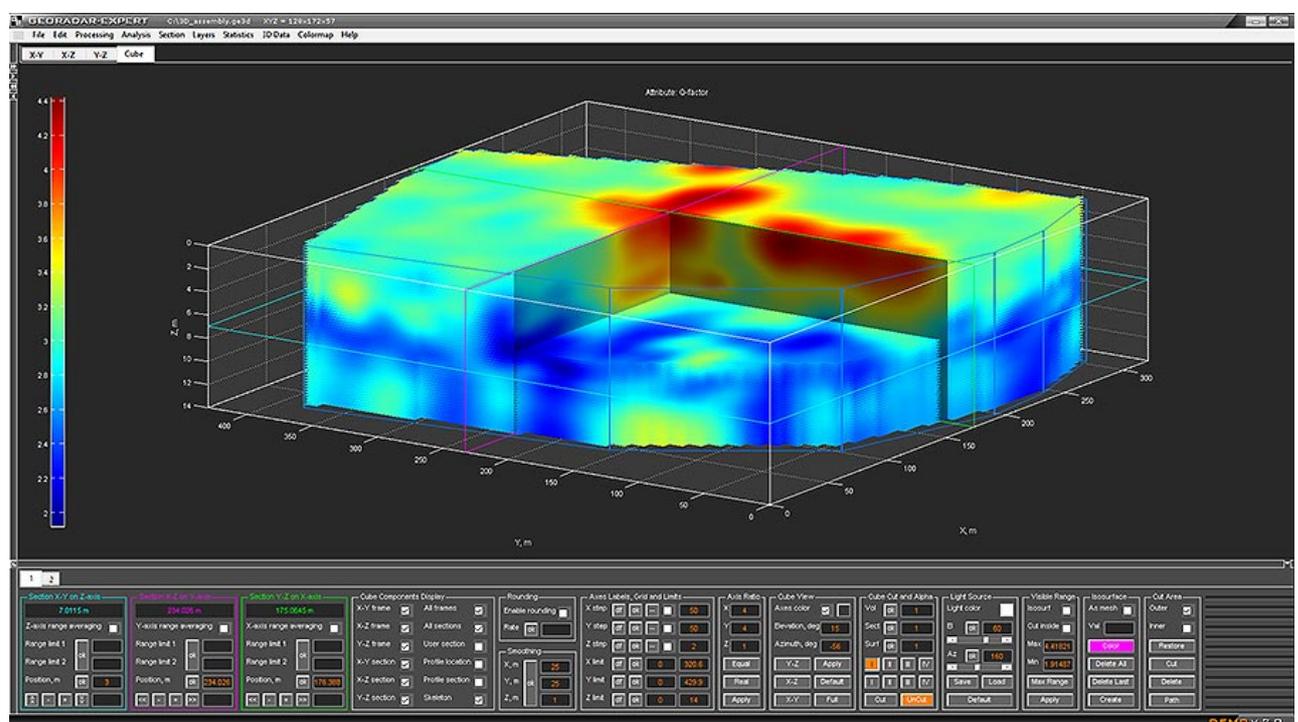


Как было отмечено выше, режим 3D главного окна программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предназначен для работы с результатами площадной георадарной съёмки. Этот режим служит для визуализации трёхмерной сборки разрезов, созданных по результатам автоматизированного анализа BSEF георадиолокационных профилей неодинаковой длины и произвольной ориентации. В процессе

формировании 3D сборки разрезов возможен учёт их положения в соответствии с координатами GPS или ГЛОНАСС.

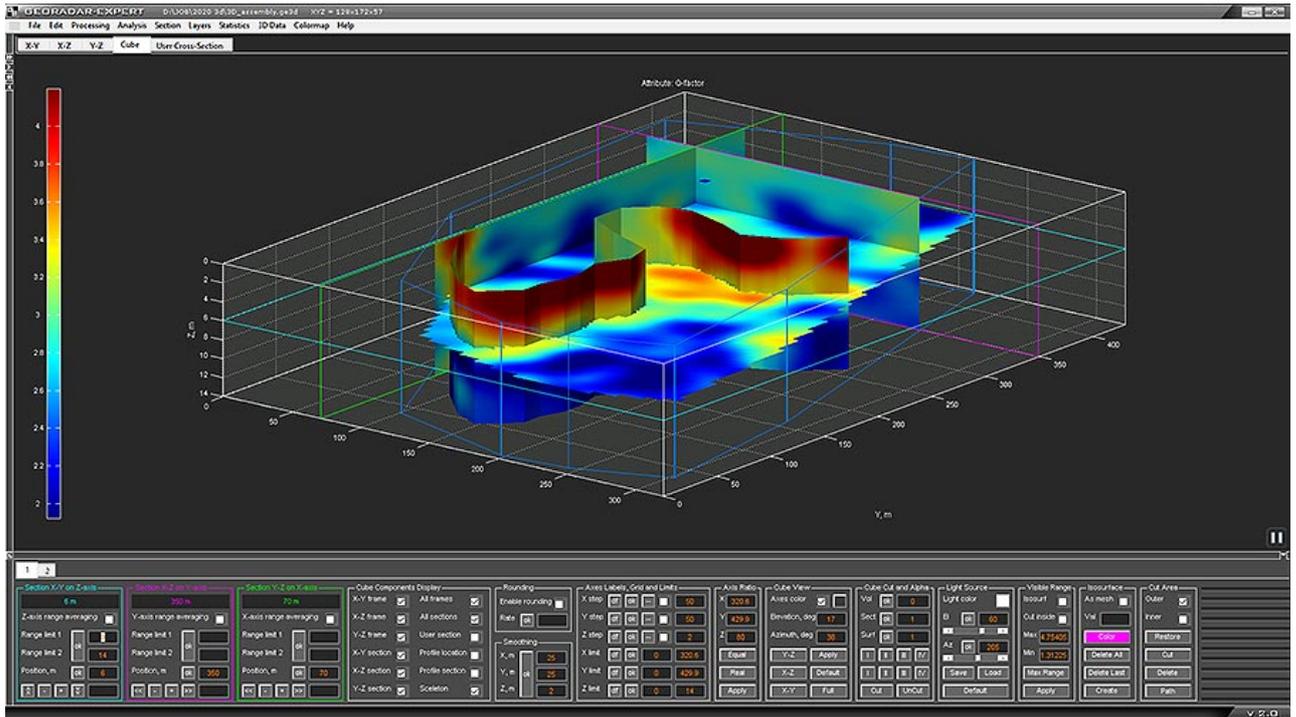
В режиме 3D левая группа вкладок скрыта. Верхняя группа вкладок состоит из вкладок визуализации 3D объёма, трёх взаимно перпендикулярных сечений 3D объёма, а также пользовательских сечений 3D объёма, которые в отличие от взаимно перпендикулярных сечений, могут иметь сложную форму. Нижняя группа вкладок служит для размещения элементов управления 3D визуализацией.

На рисунке ниже показано главное окно программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ в режиме 3D с открытой вкладкой визуализации объёма 3D сборки. Объём делится на части тремя ортогональными сечениями - одним горизонтальным и двумя вертикальными. В результате получается восемь подобъёмов – вокселей. Четыре вокселя лежат выше горизонтального сечения и четыре расположены ниже этого сечения. Менять размеры вокселей можно с помощью перемещения ортогональных сечений вдоль соответствующих им осей. На представленном примере вырезан один верхний воксель объёма 3D сборки.

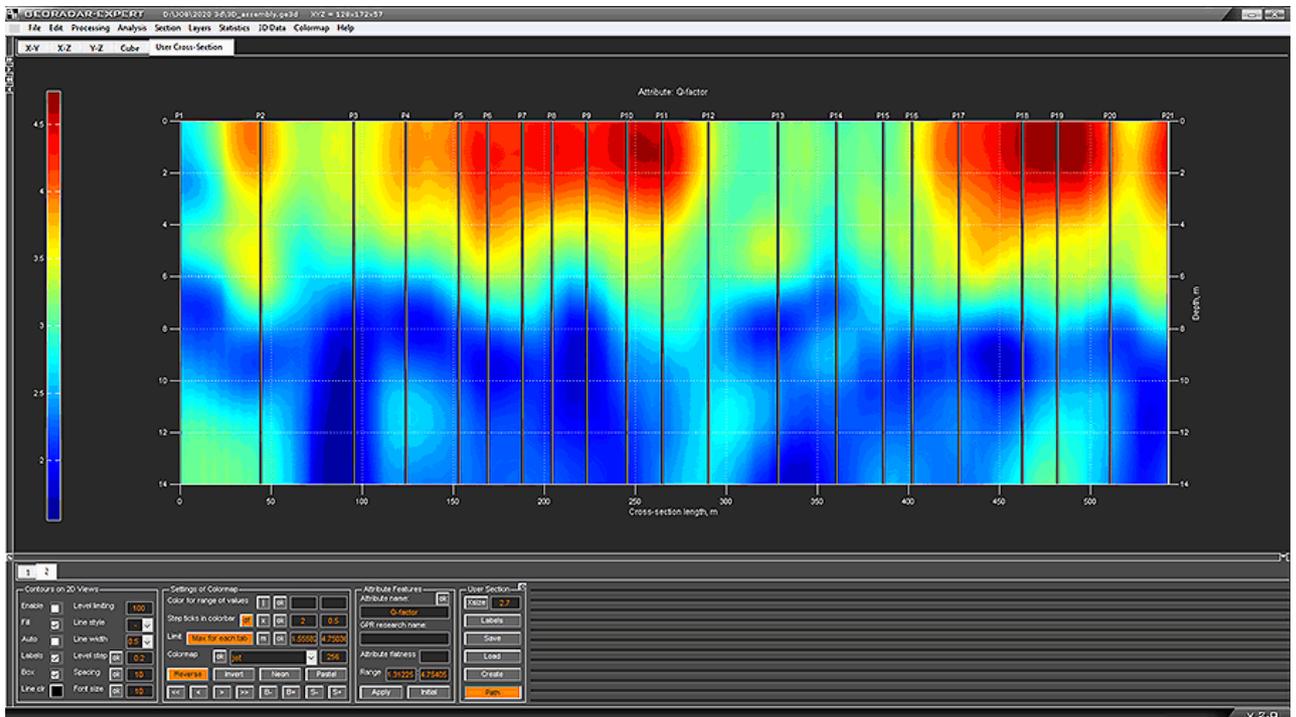


Пользователь может управлять ортогональными сечениями 3D сборки – менять их положение, усреднять заданную толщину 3D объёма по всем трём направлениям X Y Z, создавать свои сечения произвольной формы, сохранять эти сечения в файл и загружать их в 3D сборку из файла.

На рисунке ниже показано главное окно программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ с открытой вкладкой визуализации 3D объёма, содержащей три ортогональных сечения и одно пользовательское криволинейное сечение.

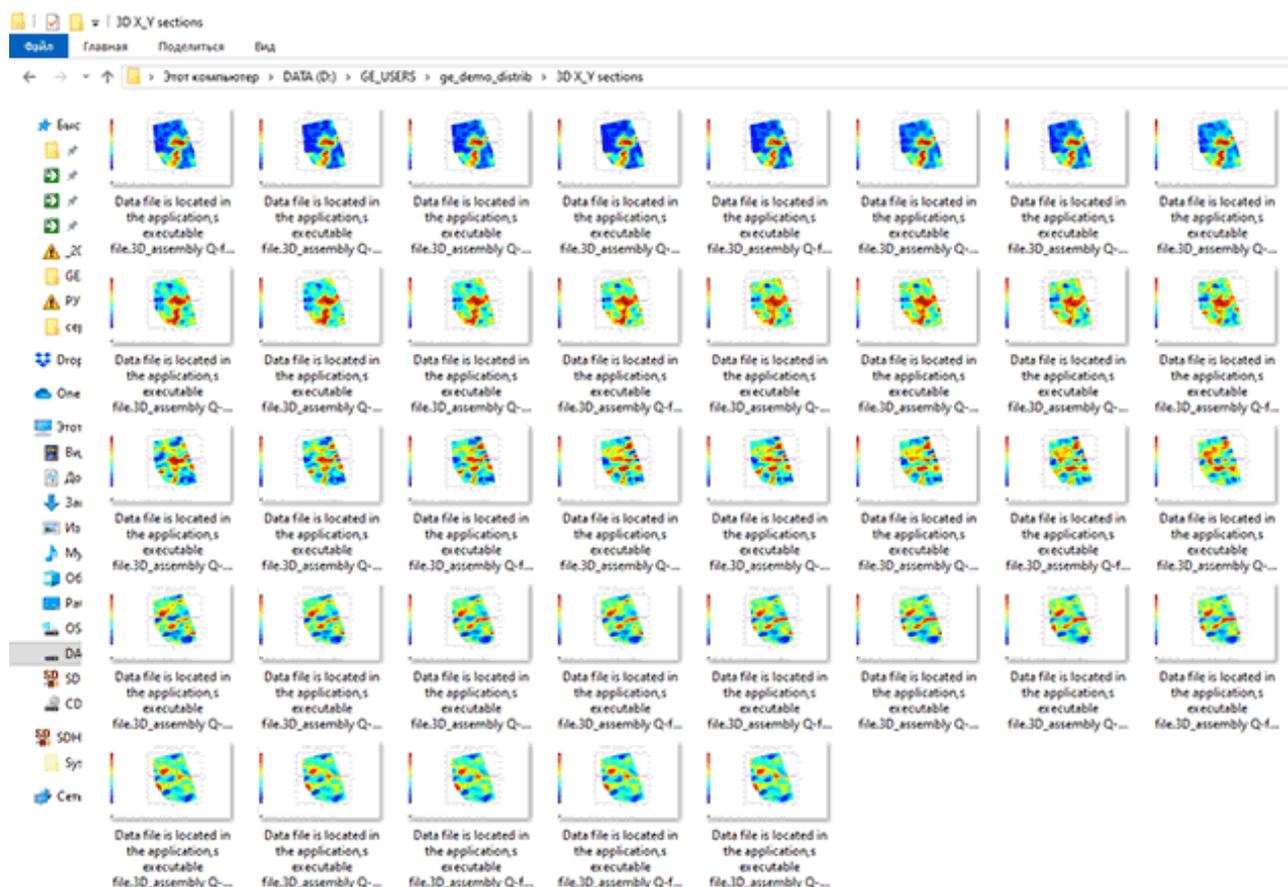


Ниже показана вкладка визуализации развёртки этого криволинейного сечения. Вертикальные линии обозначают положение узловых точек кривой, через которую проходит это сечение. Имена узловых точек отображаются над верхней границей сечения. Для каждой точки предусмотрена возможность получения графика каротажной кривой и таблицу её значений.



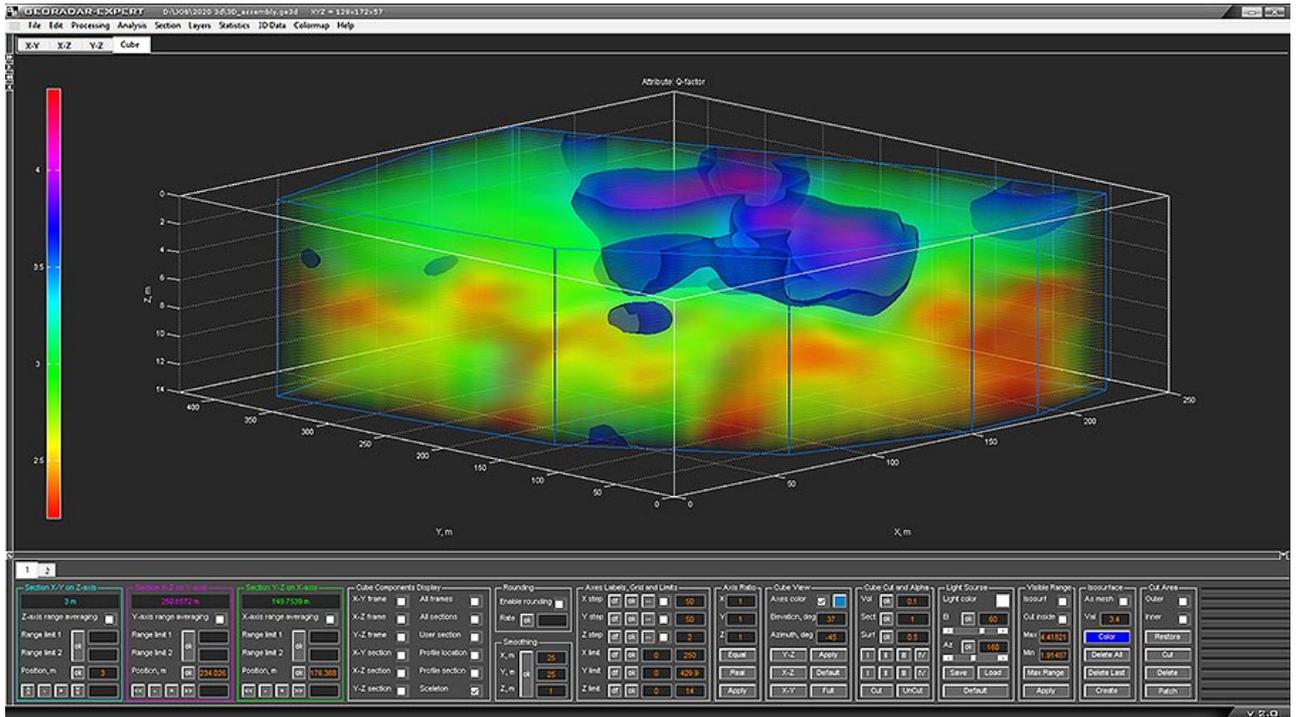
Пользователь может сохранять на жёсткий диск компьютера серию изображений ортогональных сечений 3D объёма в автоматическом режиме с заданным шагом по соответствующей оси. По сравнению с ручным режимом сохранения сечений, автоматический режим существенно экономит

время. В ручном режиме сначала нужно выполнить действия по перемещению сечения в нужную точку на оси, а потом взаимодействовать с диалоговым окном сохранения изображения. Когда количество сечений составляет несколько десятков, процесс ручного сохранения занимает сравнительно много времени. На рисунке ниже показана директория сохранения набора горизонтальных сечений в проводнике Windows в режиме показа содержимого файла.

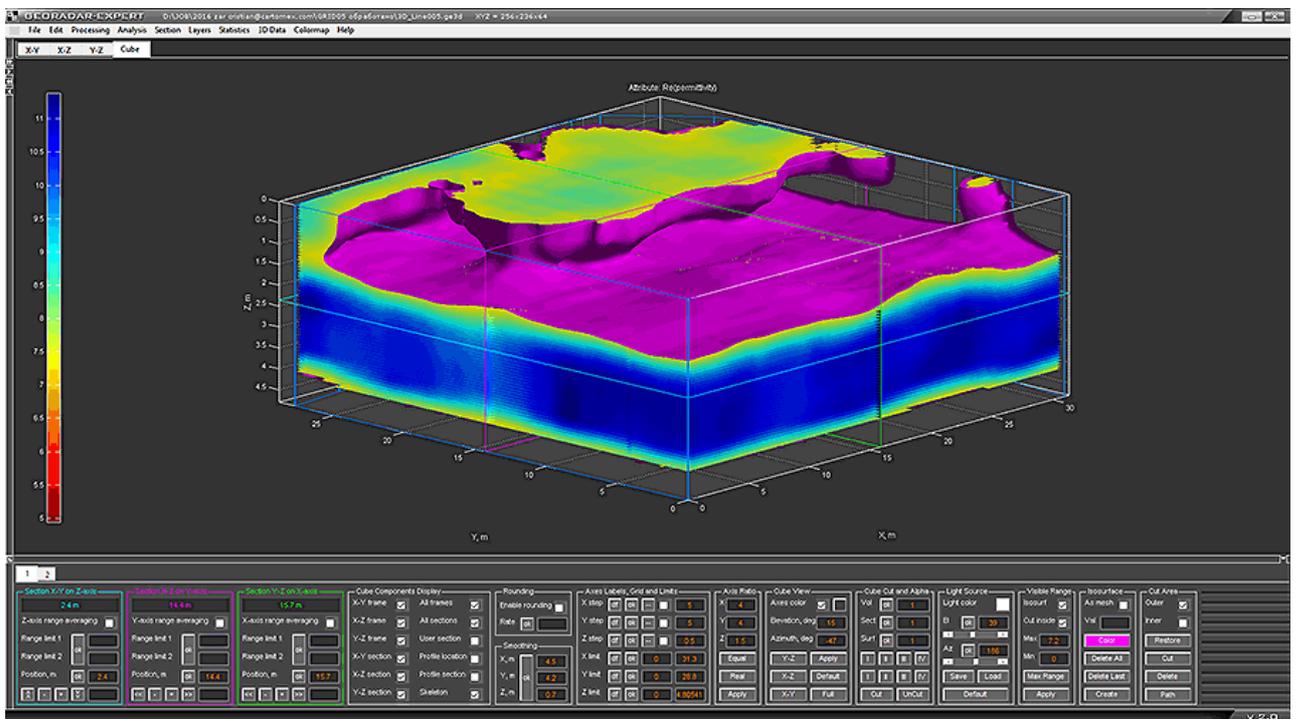


В режиме 3D предусмотрены все необходимые опции визуализации георадиолокационной информации, в том числе возможность управления прозрачностью элементов массива 3D сборки. Это позволяет показать объекты, скрытые внутри объёма 3D сборки, что даёт больше наглядности в представлении результатов георадиолокационного исследования.

На рисунке ниже показан пример 3D визуализации, состоящей из изоповерхности и объёма 3D сборки, которые обладают различной степенью прозрачности. В полупрозрачном объёме 3D сборки просматриваются прослой пород в виде областей красных оттенков. Границы грунтовых аномалий представлены изоповерхностями синего цвета. Полупрозрачные изоповерхности не заслоняют друг друга полностью, и это позволяет наблюдать форму этих аномалий.

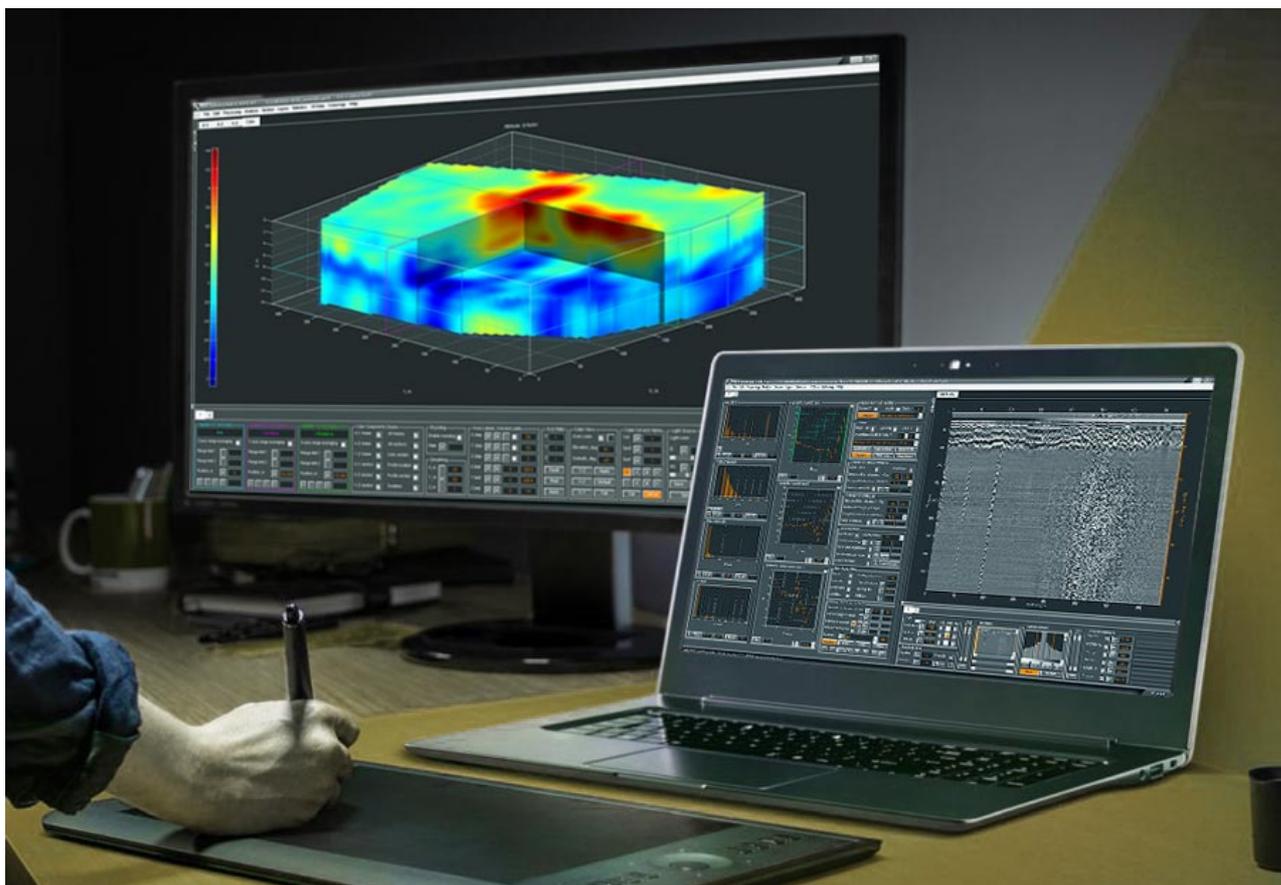


Ниже показан вариант визуализации объёма 3D сборки, в котором заданному пользователем диапазону значений атрибута определена полная прозрачность, а в качестве границы между прозрачной и непрозрачной областями объёма 3D сборки используется изоповерхность.



Когда 3D сборка содержит изоповерхности, эти изоповерхности делят объём 3D сборки на части. Пользователь может создать изоповерхности так, чтобы они проходили по границам контакта слоёв исследуемой толщи. В этом случае предусмотрена возможность расчёта объёма слоёв, ограниченных изоповерхностями, что представляет несомненный практический интерес.

Сравнительный анализ со сторонним программным обеспечением



Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, разработанный в результате обобщения многолетнего опыта обработки георадиолокационных данных, является эффективным инструментом для решения широкого спектра задач георадиолокации, в том числе и в тех случаях, когда использование программного обеспечения для обработки георадиолокационных данных сторонних производителей, не приводит к положительным результатам.

Информативность и качество камеральных работ, выполняемых с помощью программного комплекса, обеспечивает организации, использующей ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ в своих исследованиях, высокую конкурентоспособность на рынке геофизических услуг. Далее представлены результаты сравнительного анализа ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ со сторонним программным обеспечением для обработки георадиолокационных данных.

Сходство

В программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ реализован полный набор опций обработки данных, который входит состав каждого профессионального программного обеспечения для обработки георадиолокационной информации. Иными словами, в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ имеется всё, с чем привык работать специалист по георадиолокации.

Отличия

Отличие программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ от программных продуктов других производителей состоит в наличии специализированных алгоритмов, использование которых выводит на новый уровень качество обработки георадиолокационных данных. В состав ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ входят следующие опции, специально разработанные для данного программного комплекса:

- Автоматизированный анализ поля обратного рассеяния BSEF (Back-Scattering Electromagnetic Field). Осуществляет переход от представления данных о подповерхностной среде в виде совокупности амплитуд отражённых сигналов в форме радарограммы к характеристикам этой среды и отражённого от неё волнового поля в виде разреза атрибута. Такое представление делает более понятным результат обработки георадарных данных как самим специалистам по георадиолокации, так и специалистам в смежных областях. Например, геологам или инженерам-проектировщикам. Анализ BSEF эффективно работает в зонах сильного зашумления сигналов, расположенных в нижней части георадарного профиля, что позволяет увеличить глубинность георадарного исследования. Наряду с этим, анализ BSEF позволяет получить информацию о строении исследуемой подповерхностной среды даже в условиях плавного изменения её электрофизических характеристик, т.е. когда отражения от границ слоёв отсутствуют на георадиолокационном профиле. Использование автоматизированного анализа BSEF предоставляет специалисту больше возможностей для исследования сложно построенных подповерхностных сред.
- Метод B-Detector (Boundaries Detector). Данный метод предназначен для подавления помех и повышения вертикального разрешения сигналов георадиолокационного профиля, что облегчает прослеживание близлежащих, в вертикальном направлении, отражений от границ слоёв. С помощью B-Detector пользователь увеличивает частоту и ширину спектра сигналов на уже записанных георадарных данных, тем самым уменьшая длительность этих сигналов и увеличивая степень детализации георадиолокационного профиля. В результате обработки методом B-Detector георадиолокационный профиль, полученный с помощью низкочастотной антенны, выглядит так, как будто бы частота антенны георадара для записи этого профиля была настроена на частоту, в несколько раз превышающую реальную частоту антенны. Вертикальное разрешение сигналов этого георадиолокационного профиля также в разы выше. Также, при необходимости, можно понижать центральную частоту сигналов радарограммы.
- Метод разложения радарограммы на компоненты. Это не вейвлет разложение сигналов, хотя оно также реализовано в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. Данный метод преобразовывает матрицу сигналов георадарного профиля в набор матриц, каждая из которых содержит определённый тип отражённых волн. Пользователь отбрасывает матрицы с волнами, определёнными в качестве помех, после чего суммирует оставшиеся уровни разложения, тем самым исключая эти волны-помехи из совокупности сигналов георадарного профиля. Таким образом, можно убрать все дифрагированные отражения, в том числе и воздушные, оставив на радарограмме только протяжённые границы слоёв. Или наоборот, убрать все протяжённые границы, оставив только дифрагированные отражения для лучшего обнаружения арматуры в железобетонной

конструкции, например.

- Модуль статистического анализа. Данный модуль предназначен для обобщения результатов георадарного профилирования и наглядного представления изменчивости георадиолокационной информации. С помощью результатов статистического анализа, представленных в виде таблиц и графиков, можно устанавливать взаимосвязь между физико-механическими характеристиками исследуемой среды и различными статистическими показателями, формируя, таким образом, совокупность признаков, которую можно применять в дальнейшем для оценки состояния аналогичных объектов. Источником статистических данных являются георадиолокационные профили, разрезы атрибутов, рассчитанные на основе результатов автоматизированного анализа BSEF и сечения 3D сборки этих разрезов. Если на георадиолокационный профиль, разрез атрибута или сечение 3D сборки пользователь нанёс границы слоёв, то статистические показатели рассчитываются внутри каждого слоя, по границе каждого слоя и для источника статистики в целом, без учёта разделения на слои. Использование модуля статистического анализа программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ поднимает качество результатов георадиолокационного исследования на новый, более высокий уровень.
- Модуль дефектоскопии строительных конструкций. Дефектоскопия бетонных строительных конструкций основана на выявлении областей разреза с аномальными отклонениями значений атрибута Q-factor. Результаты дефектоскопии сохраняются в виде разреза с выделенными зонами нарушений, и сводной дефектной ведомости, в которой по каждому георадиолокационному профилю дана количественная и качественная оценка состояния объекта, в ходе исследования которого получен тот или иной профиль.
- Модуль суммирования 2D данных. Предназначен для суммирования разрезов разнородных атрибутов или сечений 3D сборки. В результате суммирования происходит устранение артефактов, вызванных накоплением ошибок в процессе сбора и обработки георадиолокационной информации, а также восстановление модели подповерхностной среды по элементам суммирования (разрезам или сечениям 3D сборки), каждый из которых содержит только некоторую часть полезной информации.
- Конвертирование изображения радарограммы из графического формата в полноценный формат георадиолокационного профиля. Необходимость такой конвертации может возникнуть, когда файл данных георадиолокационного профилирования утрачен, а имеется только изображение этого профиля на бумаге или на странице электронного документа. В результате конвертации, пользователь получает возможность применять к георадиолокационному профилю все опции цифровой обработки сигналов и все виды анализа георадарных данных, предусмотренные в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ.

Полезные ссылки

Сайт программы ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ:

<https://www.georadar-expert.ru/>

Руководство пользователя программой ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ на русском языке можно скачать по следующей ссылке:

https://www.georadar-expert.ru/ip_download.html.

Видео уроки на русском языке по работе с программой ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ можно посмотреть и скачать по следующей ссылке:

https://www.georadar-expert.ru/ip_video_rus.html

Техническая поддержка:

georadar@mail.ru

