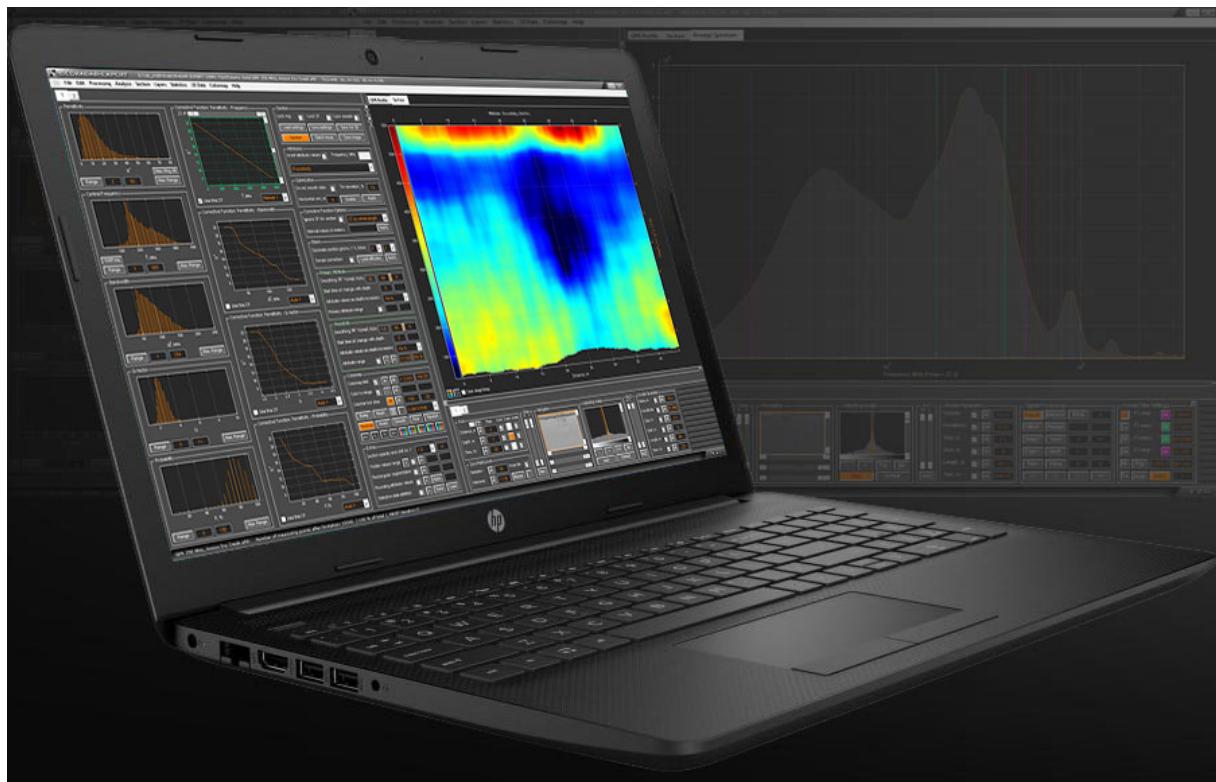


*С 2009 года на рынке  
программного обеспечения  
для георадиолокации*



## ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ  
ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

ОБЗОР

## Оглавление

Введение .....	2
Автоматизированный анализ BSEF .....	3
Описание метода .....	3
Пример применения .....	3
Преимущества метода .....	5
Суммирование разрезов .....	6
Поправка за рельеф .....	7
Трёхмерная сборка разрезов .....	7
Пикировка границ .....	9
Дефектоскопия строительных конструкций .....	10
Статистический анализ .....	11
Обработка сигналов георадарного профиля .....	12
Повышение разрешения сигналов с помощью вейвлет-преобразования .....	12
Повышение разрешения сигналов методом B-Detector .....	13
Подавление помех методом декомпозиции волнового поля .....	14
Подавление помех пространственной фильтрацией .....	15
Автоматизация обработки .....	16
Объединение данных мультиканального георадара .....	16
Графический интерфейс пользователя .....	17
Преимущества ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ .....	22
Полезные ссылки .....	23

## Введение

Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предназначен для автоматизированной обработки результатов георадиолокационного профилирования. Автоматизация в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ используется для выполнения трудоёмких задач по преобразованию исходных полевых измерений в интерпретируемую форму при минимальном участии оператора.

Программный комплекс объединяет стандартные методы обработки георадарных данных со специализированными алгоритмами, разработанными для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ с целью повышения информативности георадиолокационного исследования.

Ключевым элементом программного комплекса является метод автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF (Back-Scattering Electromagnetic Field), обеспечивающий переход от амплитудного представления данных в форме радарограммы к модели подповерхностной среды в виде разреза атрибута. Атрибуты представляют собой характеристики исследуемой среды и отражённого от её неоднородностей волнового поля, а также величины, вычисленные на их основе.

Анализ поля обратного рассеяния BSEF реализован с использованием нейросетевых алгоритмов, которые позволяют выявлять полезные сигналы в случаях, когда традиционные методы обработки оказываются неэффективными. К таким случаям относятся исследования малоконтрастных или сильно зашумлённых сред, а также сред с плавным изменением электрофизических характеристик по глубине, при котором на георадиолокационном профиле не формируются оси синфазности сигналов, интерпретируемые в качестве границ между слоями.

Набор разрезов атрибута, полученный в результате обработки данных площадного георадиолокационного исследования, может быть преобразован в трёхмерный массив. Такое преобразование даёт дополнительные возможности для анализа пространственного распределения характеристик исследуемой среды, а также для определения формы и объёма её структурных элементов.

Для выявления зависимостей между физико-механическими и электрофизическими свойствами среды, выраженными через атрибуты разрезов и их статистические показатели, реализован модуль статистического анализа. Выявленные закономерности могут быть использованы для исследования аналогичных объектов.

Для работы с амплитудным представлением результата исследования – георадиолокационным профилем, программный комплекс содержит необходимый набор функций обработки сигналов для подавления помех и выделения полезных отражений, а также разработанные для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ алгоритмы программного повышения разрешающей способности георадарных данных.

Применение алгоритмов повышения разрешающей способности позволяет ослабить обратную зависимость между разрешением и глубинностью георадиолокационного исследования, обусловленную частотными характеристиками зондирующего импульса. Сигналы низкой частоты с высокой проникающей способностью преобразуются в более короткие по длительности волновые формы, в результате чего отражения от близко расположенных границ слоёв локализуются точнее.

В программном комплексе реализована поддержка форматов файлов георадарных данных большинства известных производителей геофизического оборудования. Результаты обработки этих данных могут экспортirоваться в графические, текстовые и табличные файлы, а также в сеточные форматы для дальнейшего использования в системах ГИС или CAD.

ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ содержит все необходимые опции обработки для решения задач георадиолокации, в том числе и в случае низкой информативности полевых измерений. Далее представлен более развёрнутый обзор ключевых возможностей программного комплекса.

## Автоматизированный анализ BSEF

### Описание метода

Метод автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF основан на выделении и исследовании дифракционной компоненты георадиолокационного профиля с целью построения модели подповерхностной среды.

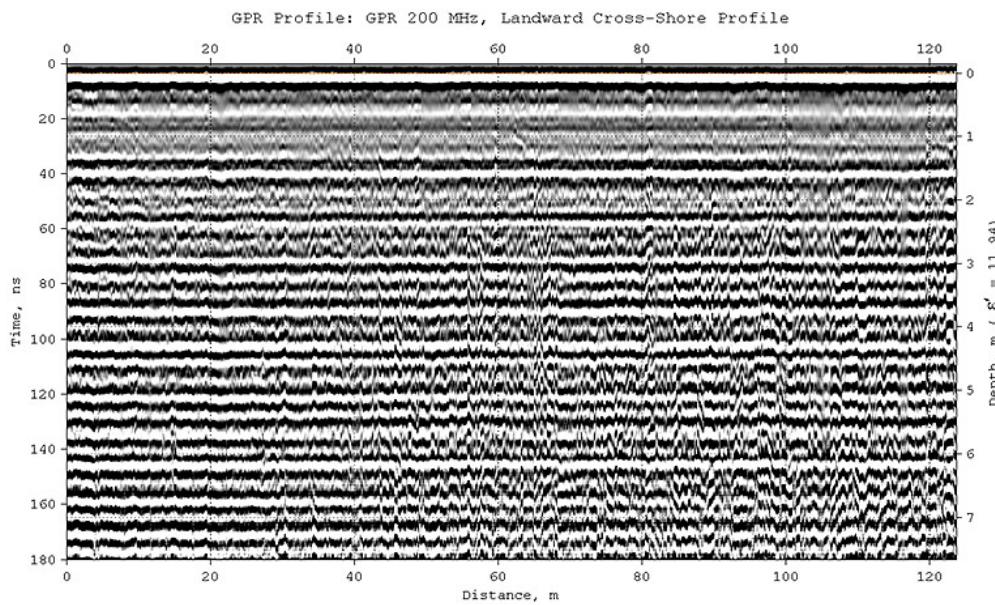
В результате анализа формируется набор точек анализа волнового поля на георадиолокационном профиле. Каждая точка характеризуется совокупностью атрибутов, включающей как непосредственно измеренные кинематические и динамические параметры отражённых волн в окрестности точки, так и величины, вычисленные на основе этих параметров. Каждый атрибут отражает определённое электрическое или физико-механическое свойство подповерхностной среды.

С помощью нейросетевого алгоритма производится преобразование массива точек анализа поля в модель подповерхностной среды (нейромодель), представленную в виде набора кластеров. Кластеры формируются по критерию пространственной близости точек анализа и сходства набора их атрибутов. Свойства среды в пределах каждого кластера характеризуются статистической однородностью.

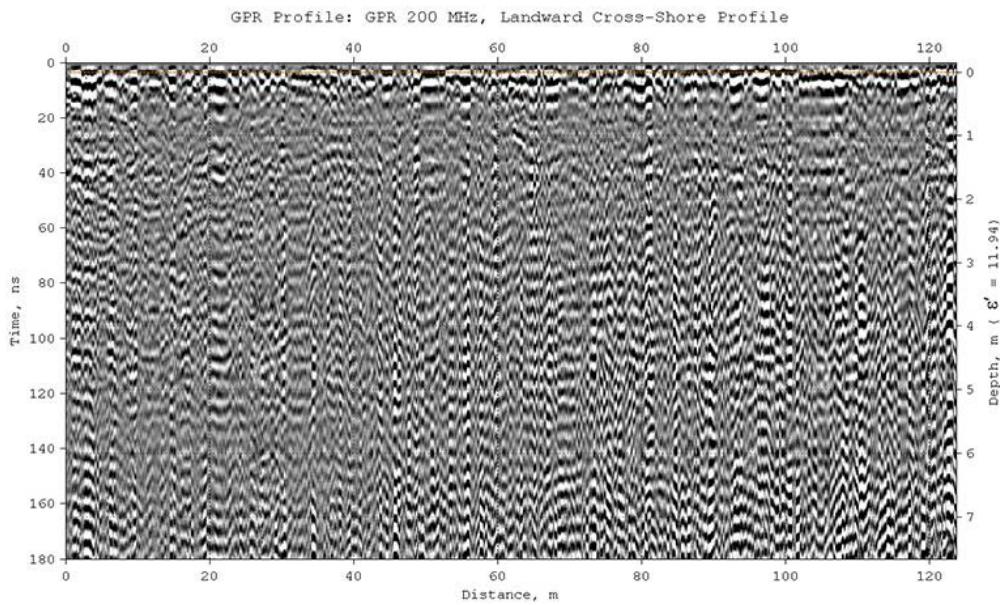
На основе нейромодели формируется разрез атрибута, отображающий пространственное распределение его значений вдоль георадиолокационного профиля. Параметры создания разреза корректируются пользователем в зависимости от задачи георадиолокационного исследования.

### Пример применения

На рисунке ниже показан пример георадиолокационного профиля, полученного георадаром с центральной частотой 200 МГц на морском пляже. Профилирование выполнялось в перпендикулярном береговой линии направлении, на некотором удалении от уреза воды.

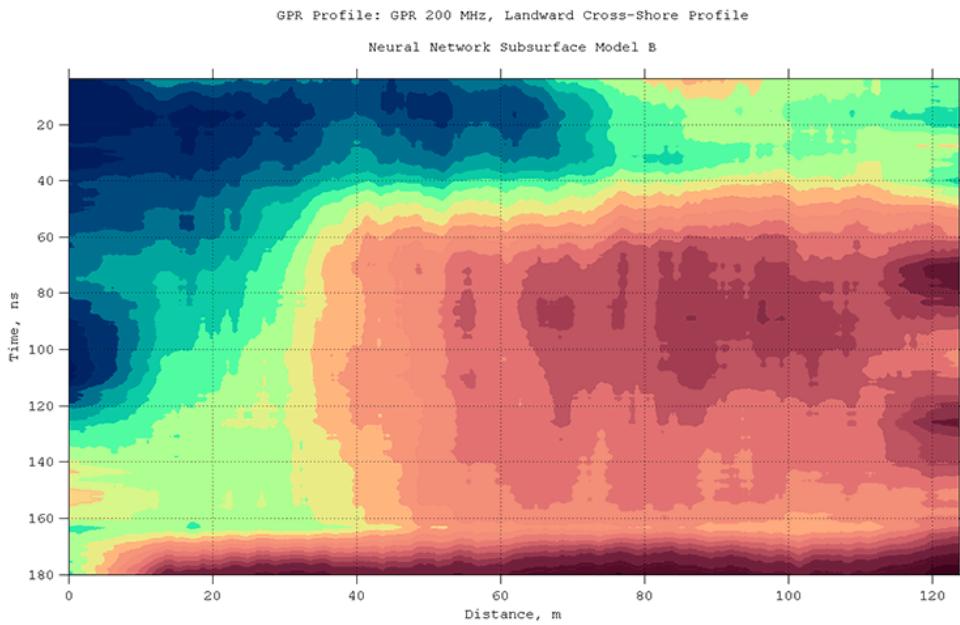


Исследуемый грунт характеризуется высоким затуханием электромагнитных волн, обусловленным засоленностью прибрежных отложений. На профиле наблюдаются интенсивные горизонтальные помехи, которые маскируют полезные отражения. На следующем рисунке показан результат применения алгоритма подавления помех.



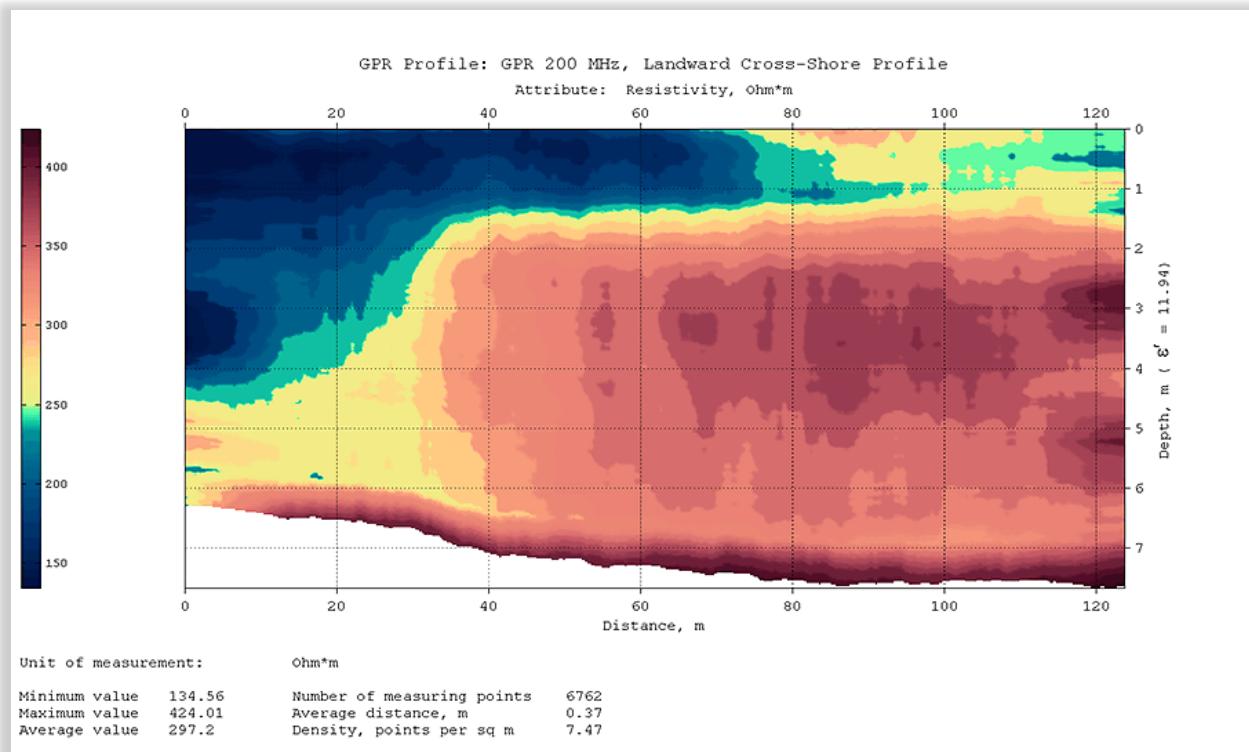
Визуальный анализ обработанного профиля не выявляет характерных осей синфазности, которые могли бы быть интерпретированы как отражения от границ слоёв. Данный факт свидетельствует о плавном характере изменения электрофизических характеристик грунта по глубине, не создающем условий для формирования отражающих границ.

В подобных случаях получение информации о строении подповерхностной среды представляется возможным только при использовании метода автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF. На рисунке ниже представлена нейромодель исследуемой среды в виде системы кластеров, построенная по результатам анализа BSEF.



Кластеры нейромодели визуализируются уникальными цветами, при этом степень сходства цветовых оттенков кластеров соответствует степени близости свойств среды в пределах этих кластеров. Завершающим этапом обработки рассматриваемого георадиолокационного профиля является построение разреза атрибута Resistivity (удельное электрическое сопротивление), основанного на нейромодели.

На рисунке ниже показан результат экспорта указанного разреза в графический формат для вставки в технический отчёт о георадиолокационном исследовании.



Разрез атрибута даёт наглядное представление о строении исследуемого грунта, отображая изменение мощности прибрежных отложений и распределение удельного электрического сопротивления в направлении от береговой линии. При построении разреза автоматически учитываются поправки, основанные на скоростной модели среды, создаваемой в процессе расчёта разреза.

#### Преимущества метода

Использование метода автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF позволяют получить следующие преимущества по сравнению с традиционными методами обработки георадиолокационных данных:

- Увеличение информативности исследований, так как разрез атрибута позволяет получать данные о строении подповерхностной среды даже при плавном изменении её электрофизических характеристик, когда традиционные методы интерпретации радарограмм не применимы;
- Обеспечение комплексного анализа среды за счёт разнообразия атрибутов, где каждый параметр количественно характеризует определённое электрофизическое или физико-механическое свойство подповерхностной толщи, что формирует более полное представление о её строении и свойствах;
- Повышение глубинности георадиолокационного исследования за счёт высокой избирательности алгоритма анализа и эффективного обнаружения полезных отражений в условиях сильной зашумлённости на больших глубинах;
- Расширение возможностей для исследования сложнопостроенных сред, недоступных при использовании других методов обработки;
- Существенное сокращение времени обработки полевых данных, что особенно значимо при больших объёмах работ;

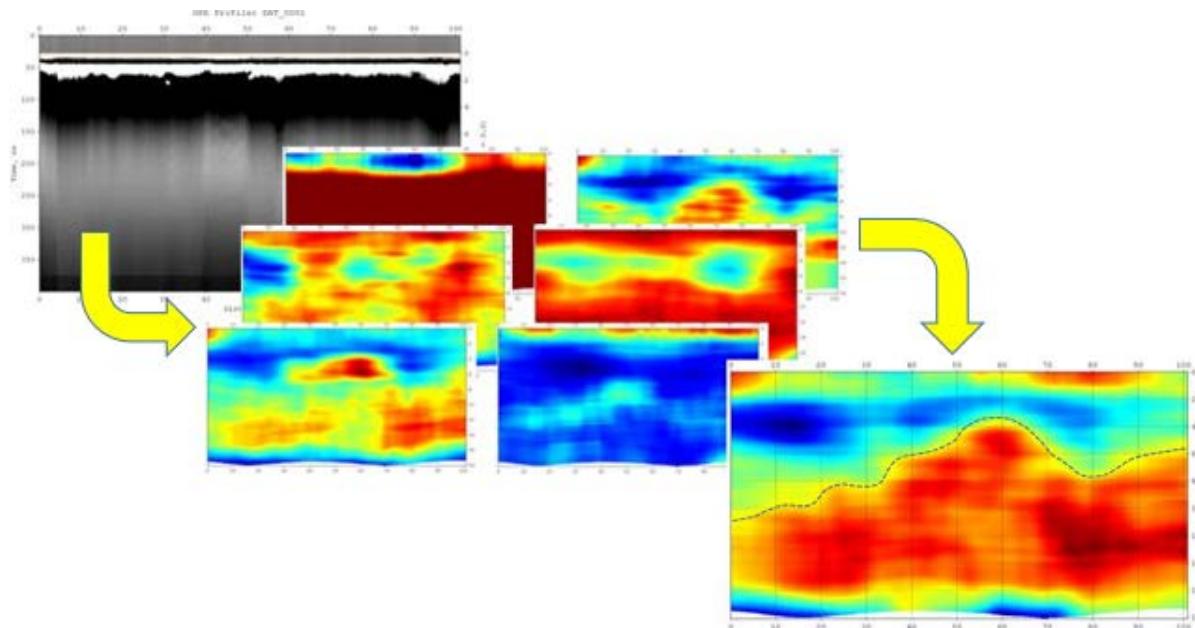
- Отсутствие стадии предварительной обработки сигналов профиля перед выполнением анализа BSEF, которая требует дополнительных временных затрат и квалификации;
- Расширение областей применения георадиолокации и перечня решаемых задач;
- Минимизация влияния субъективного человеческого фактора на процессы обработки и интерпретации данных.

### Суммирование разрезов

Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ располагает широким набором атрибутов для решения разнообразных задач георадиолокации. В случаях, когда разрез отдельного атрибута не даёт достаточного представления об исследуемом объекте, применяется операция суммирования разрезов различных атрибутов, созданных для одного георадиолокационного профиля.

Данная процедура позволяет объединить разрозненные данные, распределённые между несколькими атрибутами, в единый суммарный разрез. Дополнительным эффектом суммирования является устранение артефактов, обусловленных накоплением погрешностей на этапах сбора и обработки георадиолокационной информации.

На рисунке ниже представлены результаты исследования погребённой долины с использованием георадара 100 МГц. Слева показан исходный георадиолокационный профиль, в центре — набор разрезов атрибутов, подготовленных для суммирования на основе автоматизированного анализа BSEF, справа — результат операции суммирования.



Визуальный анализ георадиолокационного профиля свидетельствует о малой информативности волновой картины на глубинах свыше 2 метров. Согласно априорным данным, подошва долины залегает ниже указанной отметки. На разрезах атрибутов наблюдаются отдельные элементы погребённого рельефа, однако ни один из разрезов в отдельности не характеризует в достаточной мере строение исследуемой толщи.

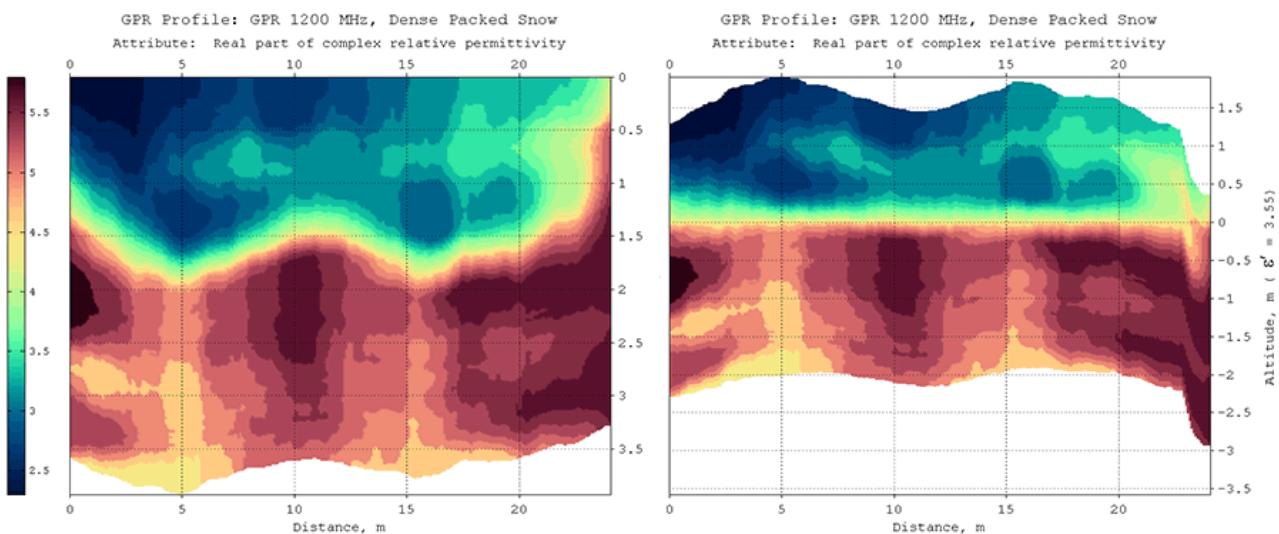
Операция суммирования обеспечила интеграцию разрозненных данных в целостную модель. На результирующем разрезе чётко прослеживается рельеф подошвы погребённой долины (обозначен пунктирной линией) по всей протяжённости профиля. Представленный пример демонстрирует эффективность модуля суммирования для преодоления ограниченной информативности георадиолокационного профиля и отдельных разрезов атрибута.

## Поправка за рельеф

При построении разреза атрибута в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предусмотрена возможность учёта топографических особенностей местности. Поправка за рельеф применяется при наличии данных о высотных отметках вдоль линии профилирования. Исходные данные могут быть представлены в виде таблиц, подготовленных вручную, или файлов систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС.

Учёт рельефа исключает искажения, вызванные кривизной поверхности зондирования, и позволяет корректно определять глубину залегания и пространственное положение объектов подповерхностной среды. Особое значение поправка приобретает при работе на сложном рельефе — склонах, откосах, искусственных насыпях.

На рисунке ниже слева показан разрез диэлектрической проницаемости по снежному валу в продольном направлении без поправки за рельеф, слева — разрез с введёнными поправками.



## Трёхмерная сборка разрезов

Для детального изучения строения подповерхностной среды и обнаружения объектов в её толще применяется метод площадного георадарного обследования. В рамках данного метода исследуемый объект покрывается сетью георадиолокационных профилей с точной координатной привязкой. Профили могут иметь произвольную длину, ориентацию и криволинейную форму.

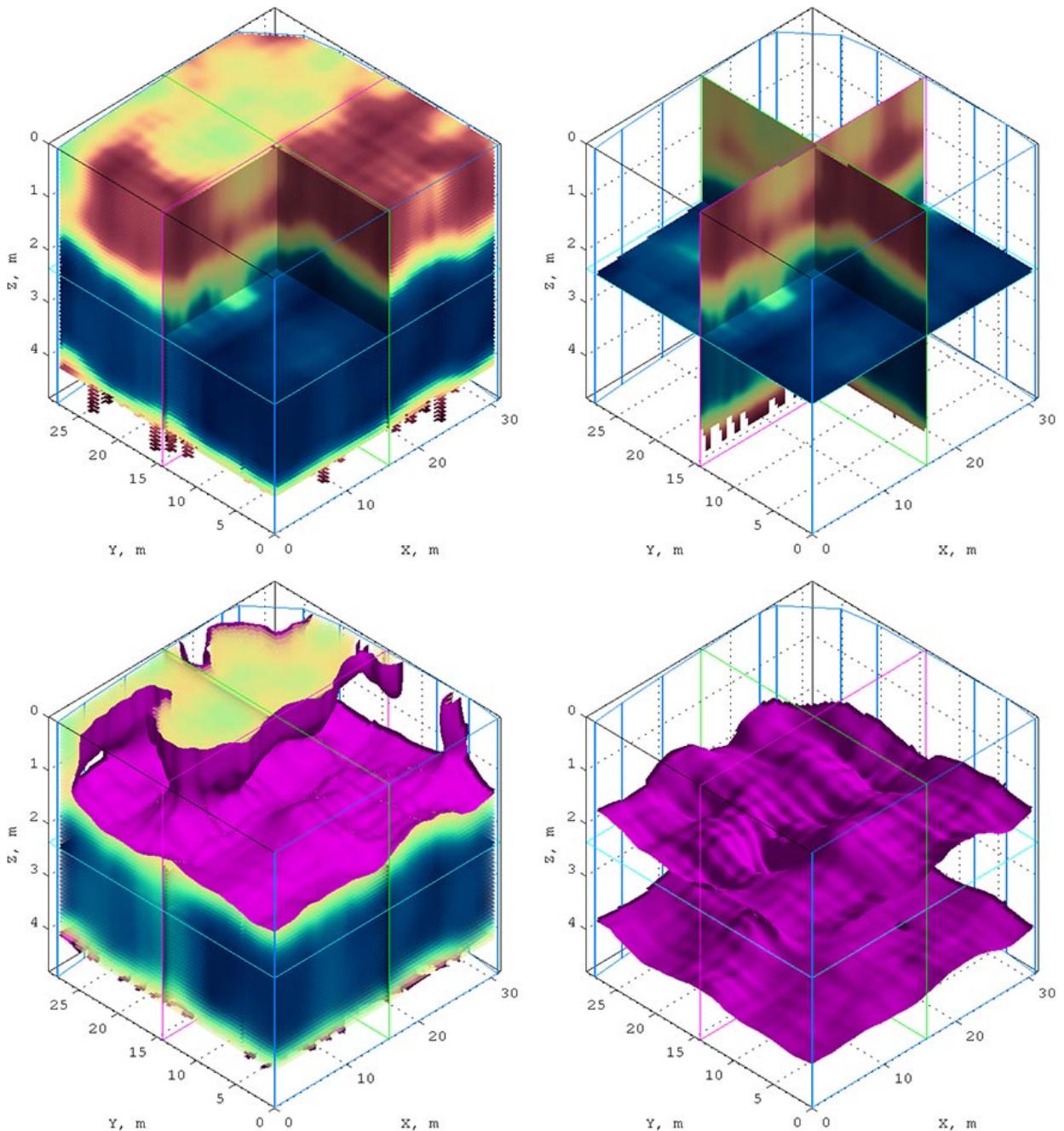
На основе метода автоматизированного анализа BSEF для каждого профиля площадного исследования строится разрез атрибута. Полученные разрезы объединяются в трёхмерный массив данных, где значения атрибута между разрезами определяются методом интерполяции.

Пространственное положение разрезов при формировании сборки задаётся по координатам из файлов систем глобального позиционирования GPS или ГЛОНАСС, а также с использованием таблиц координат ручного ввода.

Программный комплекс предоставляет широкий набор инструментов для работы с трёхмерной сборкой. Реализованы возможности визуализации объёма сборки и его отдельных сечений — как ортогональных, так и произвольной конфигурации. Предусмотрено построение изоповерхностей, проходящих через заданные значения атрибута и разделяющих объём на области, с последующим расчётом их объёмов.

Реализована возможность удаления фрагментов объёма, управления прозрачностью элементов сборки и задания прозрачности по диапазону значений атрибута. Для сечений трёхмерной сборки предусмотрены операции ручного выделения границ слоёв, статистического анализа и экспорта данных в различные форматы.

На рисунке ниже представлены некоторые из вариантов визуализации объёма 3D сборки разрезов. В верхнем ряду слева – массив с вырезанной верхней четвертью объёма, справа – ортогональные сечения. Слева внизу массив с вырезанным объёмом заданного диапазона атрибута, справа – изоповерхности в качестве границ слоёв.



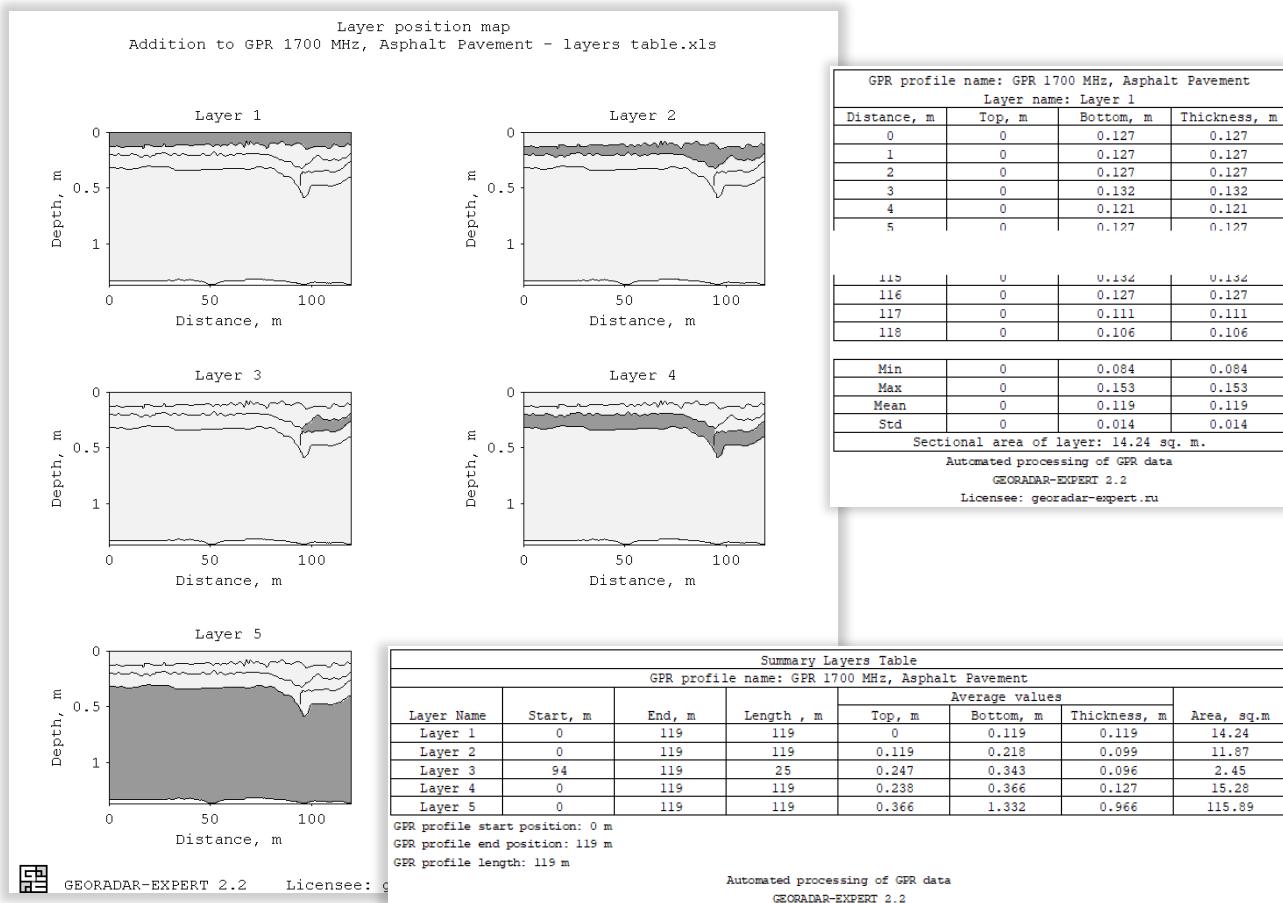
## Пикировка границ

Пикировка границ представляет собой альтернативный метод кластеризации модели подповерхностной среды, дополняющий автоматическую кластеризацию, выполняемую нейросетевым алгоритмом. Процесс пикировки поддерживает полностью ручной и полуавтоматический режимы. В полуавтоматическом режиме пользователь задаёт верхнюю и нижнюю границы области, внутри которой автоматически строится граница по экстремумам сигнала.

Когда на георадиолокационном профиле созданы границы, образованные ими слои могут учитываться при построении разреза. Если границы заданы на разрезе атрибута, становится доступна индивидуальная настройка его визуализации в пределах каждого слоя. При выполнении статистического анализа наличие границ также учитывается: статистические показатели рассчитываются для каждого слоя, выделенного границами, а также вдоль самих границ.

Границы можно редактировать: разбивать на части, объединять, менять названия. Данные границ сохраняются в файл и могут быть загружены для последующего использования. На основе созданных границ, с заданным шагом формируется таблица слоёв, содержащая значения положения кровли, подошвы, мощности, статистические характеристики и площадь каждого слоя. Дополнительно создаётся сводная таблица с характеристиками всех слоёв и схемой их расположения.

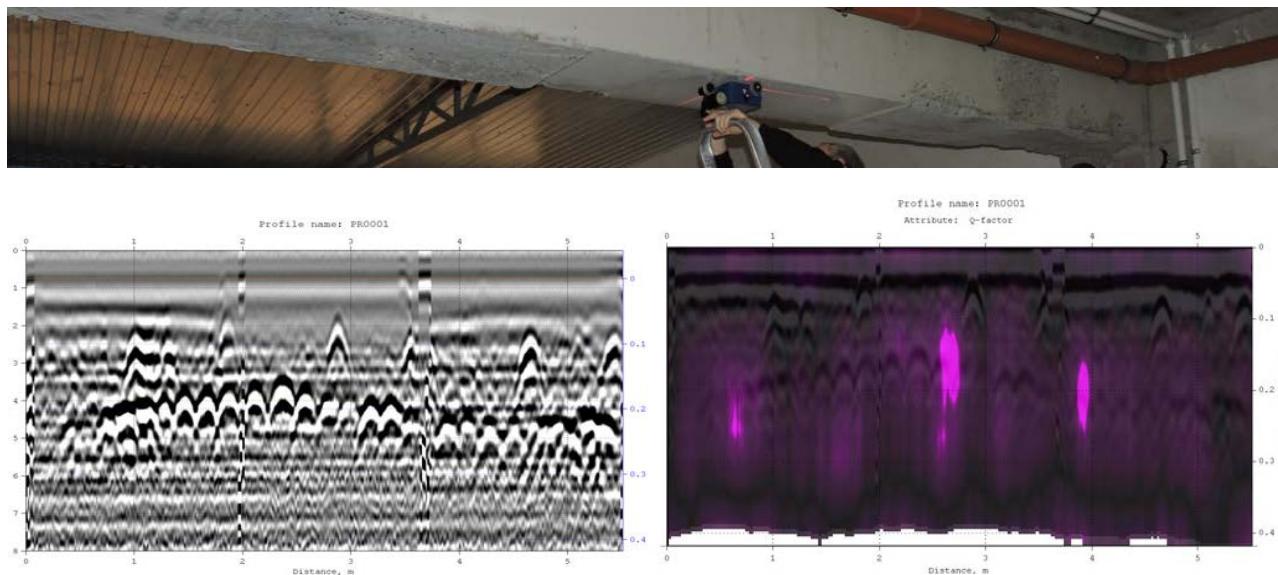
На рисунке слева показан результат экспорта в графический формат схемы расположения слоёв, где для каждого слоя создана миниатюра разреза, а целевой слой выделен тёмной заливкой. Справа показаны верхний и нижний фрагменты таблицы данных по слою Layer 1, экспортированные с шагом 1 метр, а также сводная таблица характеристик всех слоёв.



## Дефектоскопия строительных конструкций

Дефектоскопия основана на выявлении областей разреза со значениями атрибута Q-factor, превышающих определённое пороговое значение. Объектами дефектоскопии являются бетонные конструкции, слои дорожной одежды, грунтовые толщи.

Ниже приведён пример георадиолокационного профилирования железобетонной балки перекрытия. Слева показана радарограмма, полученная в ходе исследования, справа — результат обработки в модуле дефектоскопии, где зоны ослабленного бетона визуализируются как ярко выраженные аномальные области.



Для набора разрезов автоматически формируется дефектная ведомость в формате MS Excel. В ведомости по каждому профилю представлены результаты дефектоскопии с указанием доли дефектных областей в процентах от площади разреза и другая необходимая информация. Для наглядного отображения состояния конструкции в таблице используется цветовая индикация: красный цвет соответствует неудовлетворительному состоянию, жёлтый отражает удовлетворительное состояние, зелёный указывает на хорошее состояние исследуемого объекта.

A	B	C	D
1 Flaw detection			
2 Profile	Length, m	Percentage of defect	Average value of Q-factor
3 PR0001	5.504	3.4 (bad condition)	4.010154563
4 PR0005	5.712	5.1 (bad condition)	4.116571617
5 PR0006	5.52	3.5 (bad condition)	3.96010161
6 PR0013	4.768	0 (good condition)	3.882983155
7 PR0014	4.984	0.2 (good condition)	3.988803473
8 PR0015	5.064	0 (good condition)	3.421331768
9 PR0017	2.848	0.1 (good condition)	3.967186861
10 PR0018	2.912	1.6 (satisfactory condition)	3.973430245
11 PR0019	2.928	0.8 (good condition)	3.796458625
12 PR0020	5.304	4.5 (bad condition)	4.082640406
13 PR0021	5.752	0.3 (good condition)	3.574097381
14 PR0023	4.512	1.6 (satisfactory condition)	3.85229483
15 PR0024	4.704	2.4 (satisfactory condition)	3.919674657
16 PR0025	4.888	1.5 (satisfactory condition)	3.907902669
17 PR0026	4.8	3.1 (bad condition)	4.092442579
18 PR0027	1.312	2.1 (satisfactory condition)	3.997140071
19 PR0028	1.304	0 (good condition)	3.820281343
20 PR0029	1.16	1 (good condition)	3.855245325
21 PR0030	1.136	0.2 (good condition)	3.64604494
22 PR0031	1.104	0 (good condition)	3.68049131
23 PR0032	1.568	1.4 (good condition)	3.874556741
24 PR0033	1.552	0 (good condition)	3.858071825
25 PR0034	1.4	0 (good condition)	3.683725269
26 PR0035	5.224	0.5 (good condition)	3.807352914
27 PR0036	5.608	1 (good condition)	3.738205661
28 PR0037	5.384	3.1 (bad condition)	3.790646495
29 Total length:	96.952		
30 Number of profiles	26		
31 Of them in bad condition:	6 (23.1%)		
32 Of them in satisfactory condition:	5 (19.2%)		
33 Of them in good condition:	15 (57.7%)		
34 Global average value of Q-factor:	3.85760909		
35 Color cells where values > global average value:			
36 Color cells where values < global average value:			

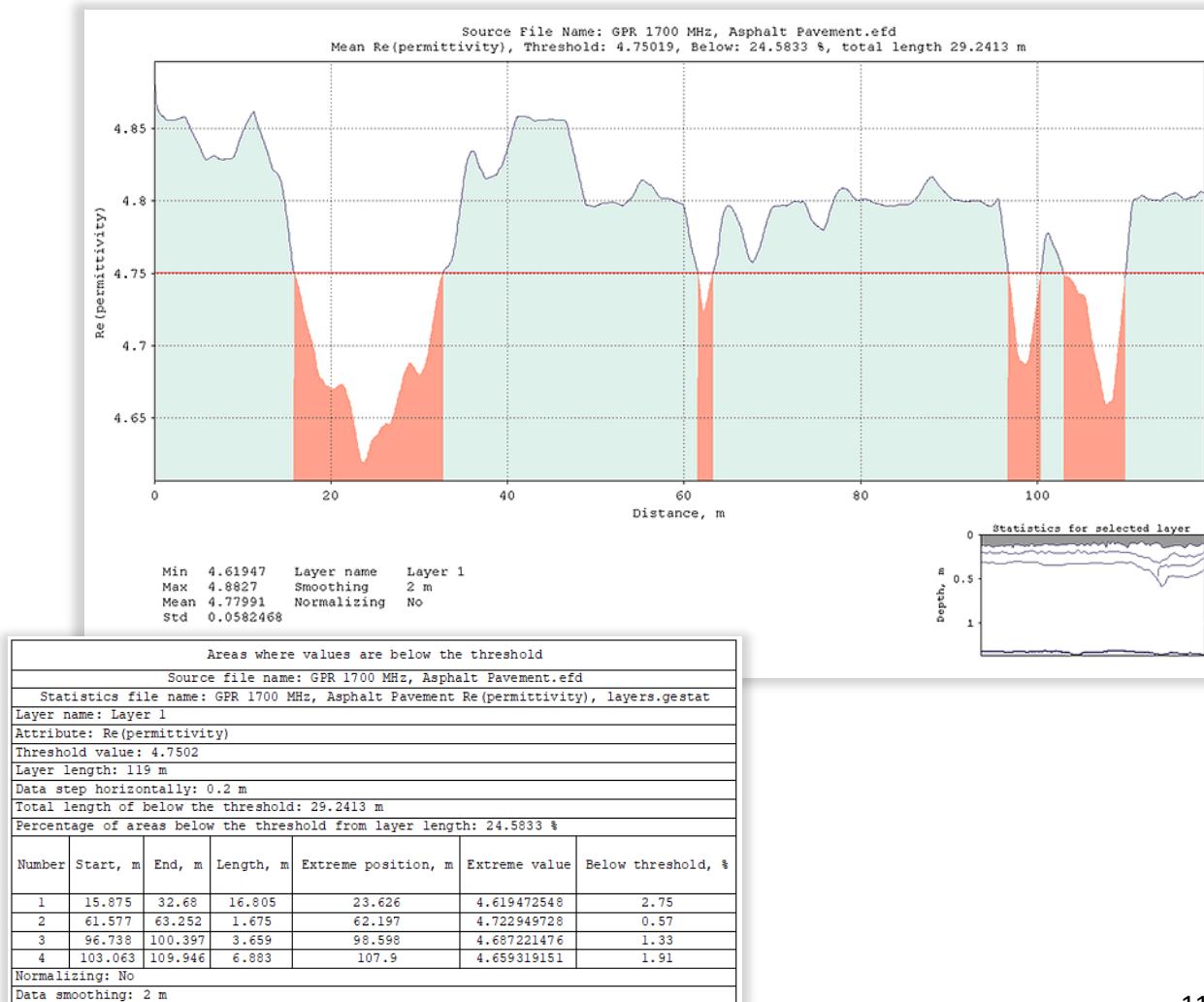
## Статистический анализ

Статистический анализ результатов георадиолокационного профилирования предоставляет информацию об изменчивости атрибута как для исследуемого разреза в целом, так и для его отдельных структурных элементов. Результаты анализа можно использовать для выявления зависимостей между физико-механическими и электрофизическими свойствами среды, которые выражаются через статистические показатели атрибутов.

Анализ выполняется по 12 статистическим показателям для георадиолокационного профиля, разреза атрибута и сечения трёхмерной сборки разрезов. Результаты представляются в табличной и графической форме. Реализована пороговая обработка данных, при которой области графика, превышающие или не достигающие заданного уровня, выделяются визуально, а их характеристики сводятся в таблицу. Данный подход эффективно применяется для обнаружения и документирования аномалий, например, при диагностике дефектов дорожного покрытия.

Ниже представлен пример экспорта в графический формат графика изменения средних значений диэлектрической проницаемости в верхнем слое дорожного покрытия, находившемся на момент исследования в сухом состоянии. Справа под графиком показана миниатюра разреза с границами слоёв. Заливкой выделен слой, данные которого отображаются на графике.

На графике установлен пороговый уровень, значения ниже которого интерпретируются как признаки дефекта покрытия. Соответствующие области графика выделены красным цветом. Под графиком показана таблица выявленных областей нарушения, содержащая характеристики каждой области. Таблица сохраняется автоматически при экспорте изображения статистического графика.



## Обработка сигналов георадарного профиля

В состав программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ входит стандартный набор методов редактирования и обработки георадиолокационных данных, применяемых в профессиональном программном обеспечении.

Наряду со стандартными методами, в программном комплексе реализованы специализированные алгоритмы, разработанные для ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. Данные алгоритмы обеспечивают повышение разрешающей способности сигналов георадиолокационных профилей и эффективное подавление сложных видов помех.

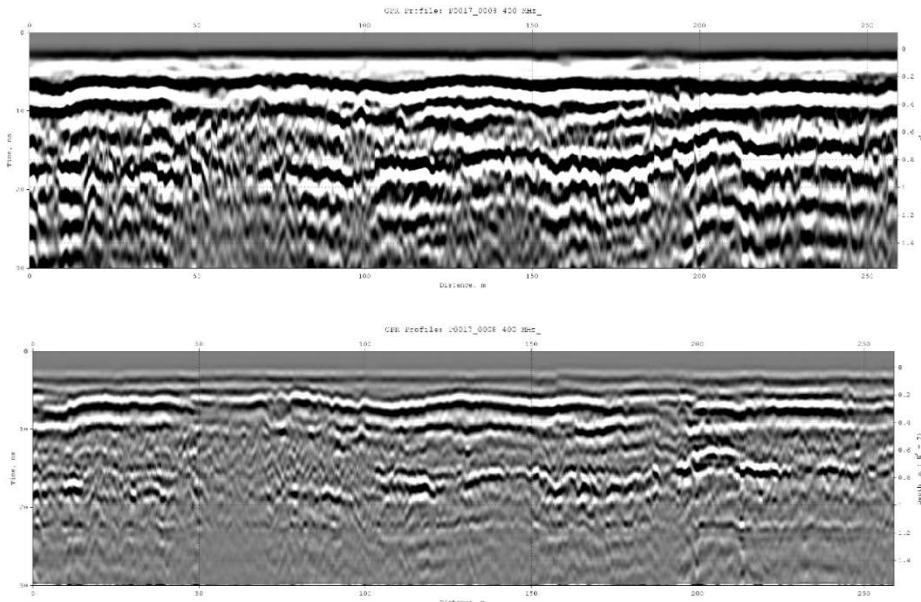
### Повышение разрешения сигналов с помощью вейвлет-преобразования

Разрешающая способность сигналов георадиолокационной трассы определяется частотными характеристиками антенны и передающе-приёмного тракта георадара, которые формируют эффективную полосу частот и, соответственно, эффективную длительность зондирующего импульса. Вейвлет-преобразование позволяет повысить разрешение сигналов на этапе камеральной обработки за счёт адаптивного выделения и усиления высокочастотных компонент.

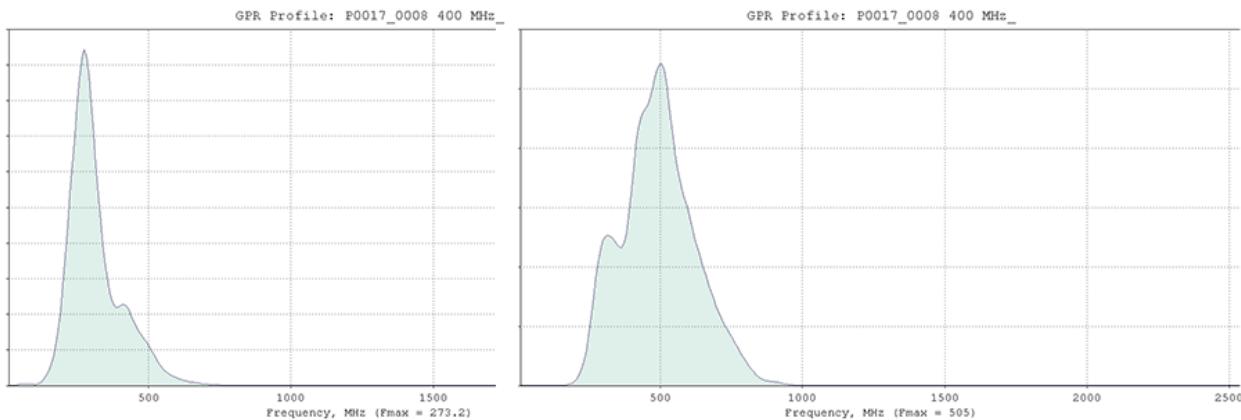
При вейвлет-преобразовании георадиолокационная трасса представляется в виде набора волновых компонент - вейвлетов, локализованных во времени и по частоте, близких по виду к зондирующему импульсу. Каждая компонента характеризует вклад определённого диапазона частот на соответствующем интервале временной оси. В результате формируется двумерное представление «время–уровень разложения», в котором уровни разложения соответствуют различным диапазонам частот.

Исключение низкочастотных уровней разложения с последующим восстановлением сигнала приводит к уменьшению длительности отражений и повышению чёткости границ раздела сред на георадиолокационном профиле. Побочные осцилляции при этом, как правило, выражены слабее, поскольку преобразование и фильтрация выполняются локально по времени, в отличие от классической частотной фильтрации на основе преобразования Фурье.

На рисунке ниже представлен георадиолокационный профиль, полученный георадаром с частотой 400 МГц при исследовании автомобильной дороги в продольном направлении и результат вейвлет-преобразования этого профиля.



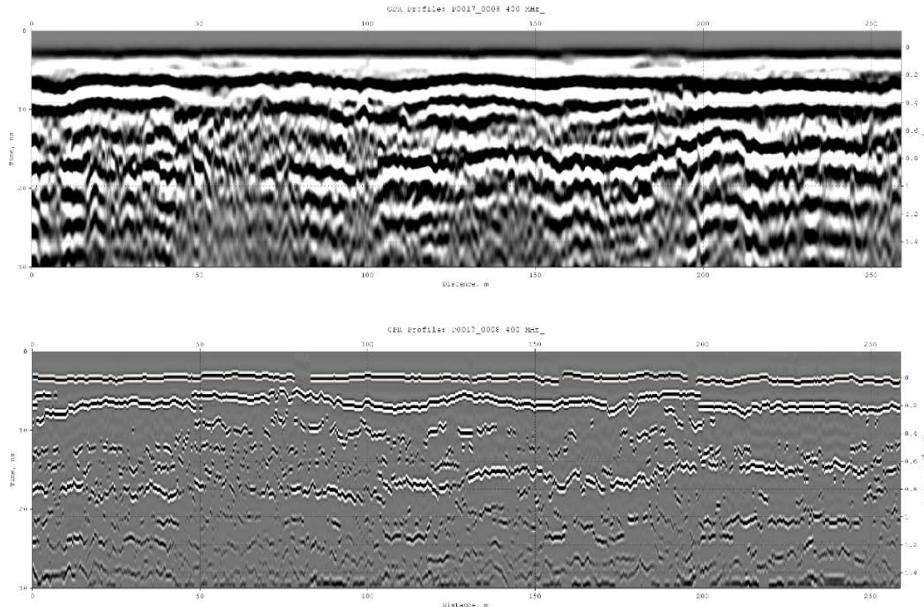
Результат вейвлет-преобразования демонстрирует улучшенную временную локализацию отражений от слоёв дорожной конструкции по сравнению с исходными данными. На рисунке слева представлен частотный спектр сигналов исходного профиля, справа - спектр после обработки. После применения преобразования спектр сигналов характеризуется увеличенной полосой частот и смещением центральной частоты, значение которой возросло в 1.8 раза – с 273 МГц до 505 МГц.



#### Повышение разрешения сигналов методом B-Detector

Метод B-Detector (Boundaries Detector) разработан для программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ с целью подавления помех и повышения разрешения сигналов георадиолокационного профиля на этапе камеральной обработки. В основу метода положена свёртка георадиолокационной трассы с коротким высокочастотным импульсом; частотный диапазон импульса выбирается выше основной полосы исходных сигналов.

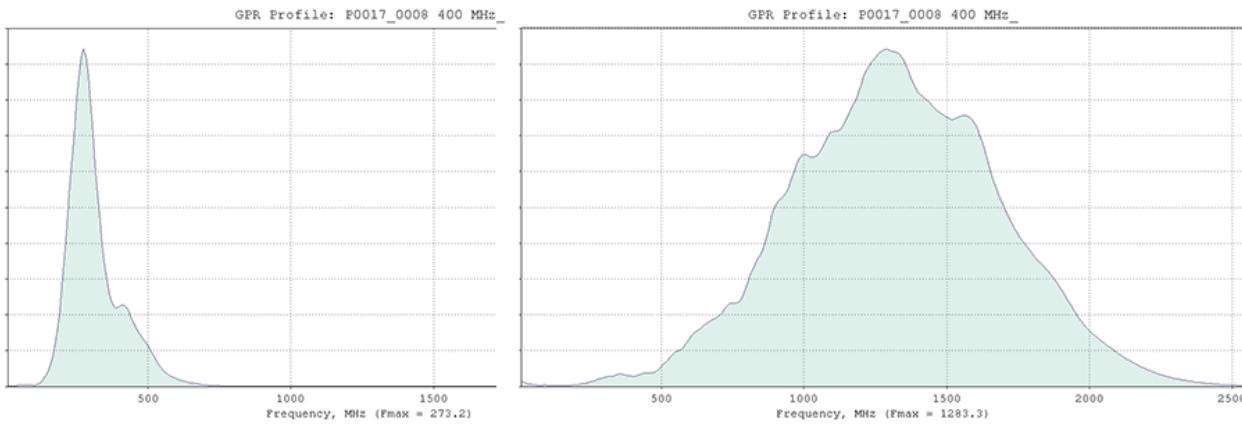
На рисунке представлен георадиолокационный профиль, рассмотренный в предыдущем разделе. Профиль записан георадаром с центральной частотой антенны 400 МГц при исследовании автомобильной дороги в продольном направлении. Ниже показан результат обработки данного профиля методом B-Detector.



Результаты применения метода демонстрируют улучшенную временную локализацию отражений от слоёв дорожной конструкции по сравнению как с исходными данными, так и с результатами обработки методом вейвлет-преобразования. Нижняя граница асфальтобетонного покрытия,

положение которой в конечной части профиля составляет 0.2 м, уверенно прослеживается на всём его протяжении.

На рисунке слева представлен частотный спектр сигналов исходного профиля, справа — спектр после обработки. В результате использования метода B-Detector наблюдается значительное увеличение ширины спектра сигналов и центральной частоты, значение которой возросло в 4.7 раза — с 273 МГц до 1283 МГц.



Дополнительным преимуществом метода является выравнивание фазы сигналов, что упрощает их прослеживание и автоматизированную пикировку границ раздела сред, которая реализована в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ.

Программное повышение разрешающей способности позволяет преодолеть компромисс между разрешением и глубинностью георадиолокационного исследования. Применение вейвлет-преобразования и метода B-Detector для обработки данных, полученных низкочастотными антеннами, повышает детализацию радарограмм до уровня, сопоставимого с высокочастотными антеннами. Тем самым расширяется круг задач, решаемых с помощью низкочастотных антенн, включая задачи, для которых ранее требовалась более высокочастотная георадиолокация.

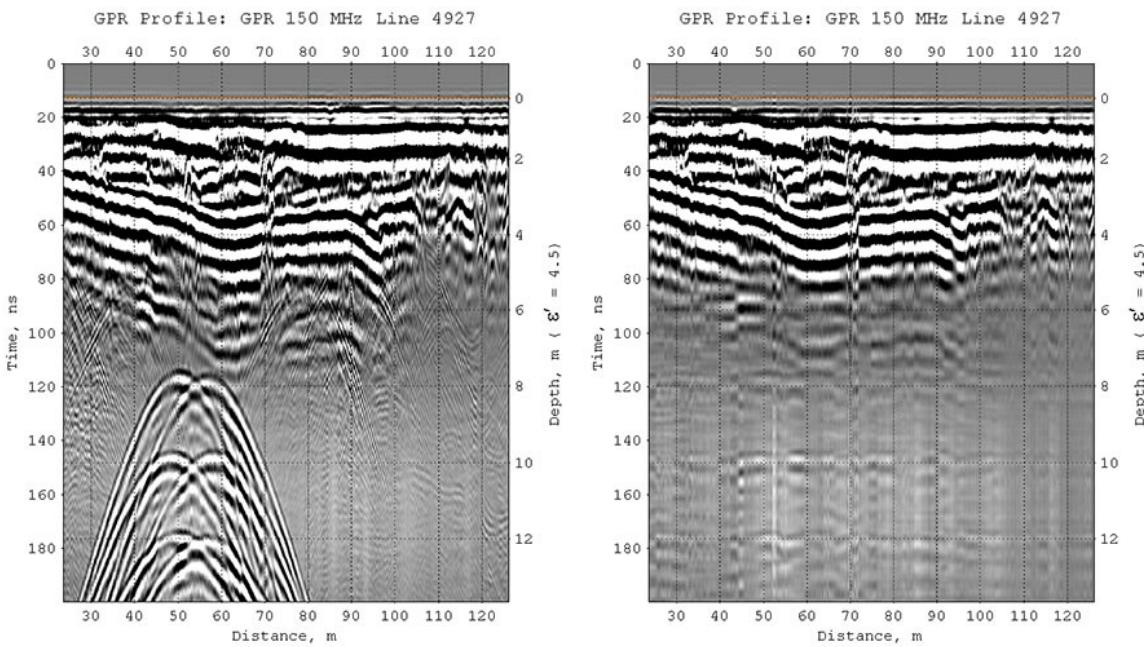
#### Подавление помех методом декомпозиции волнового поля

Одной из ключевых задач камеральной обработки георадиолокационных данных традиционными методами, без использования анализа BSEF, является подавление отражений от объектов, расположенных на дневной поверхности. Такие воздушные отражения имеют высокий уровень амплитуд, что приводит к маскировке полезных сигналов от подповерхностных структур.

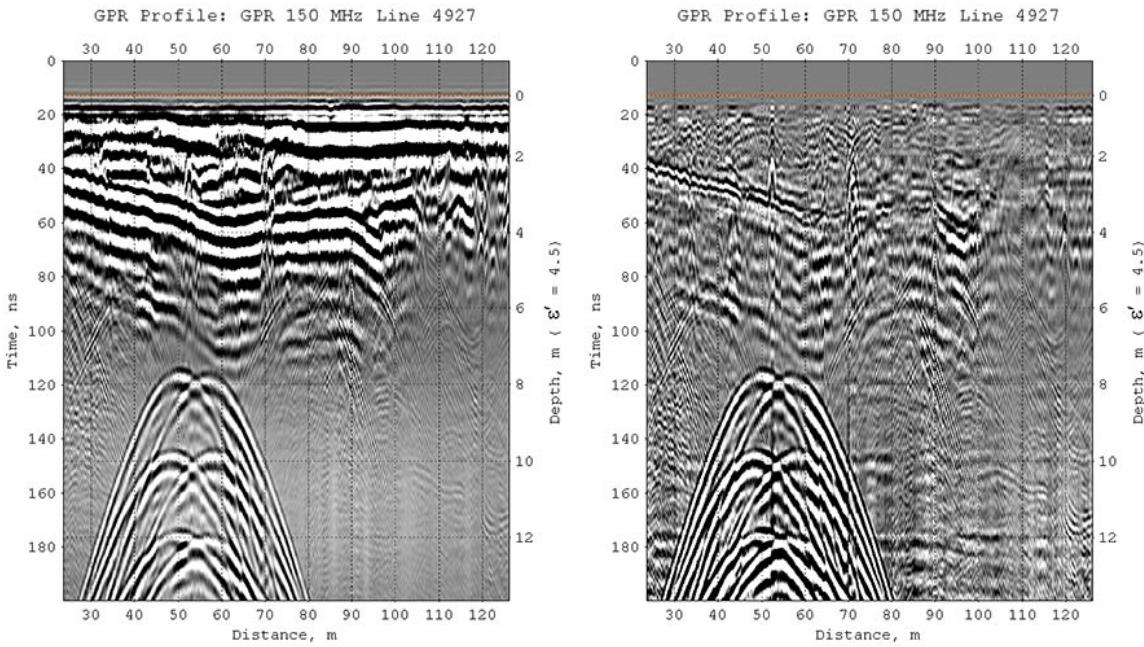
Экранирование антенн георадара не обеспечивает полного устранения воздушных отражений. Наиболее выраженно данные помехи проявляются на радарограммах, полученных с использованием дипольных низкочастотных антенн, конструкция которых не предусматривает экранирования. Дополнительными источниками помех для выделения полезных отражений на глубине выступают дифрагированные отражения от контрастных локальных объектов приповерхностного слоя.

Для удаления помех, в том числе и воздушных отражений, в программном комплексе реализован метод декомпозиции волнового поля. Идея метода состоит в разложении георадиолокационного профиля на независимые компоненты, соответствующие различным типам волновых объектов. После исключения компонент, содержащих помехи, профиль восстанавливается по оставшимся составляющим. В результате, на восстановленном профиле отсутствуют исключённые волны-помехи.

Ниже показан пример удаления волновых компонент, сформированных воздушными отражениями. Слева показан исходный профиль, записанный георадаром с центральной частотой 150 МГц, справа — результат применения метода декомпозиции.



Для изучения локальных неоднородностей сохраняются компоненты с дифрагированными волнами; компоненты отражений от преимущественно горизонтальных границ раздела сред подавляются. Ниже слева приведены исходные данные, справа – результат выделения дифрагированных волн.



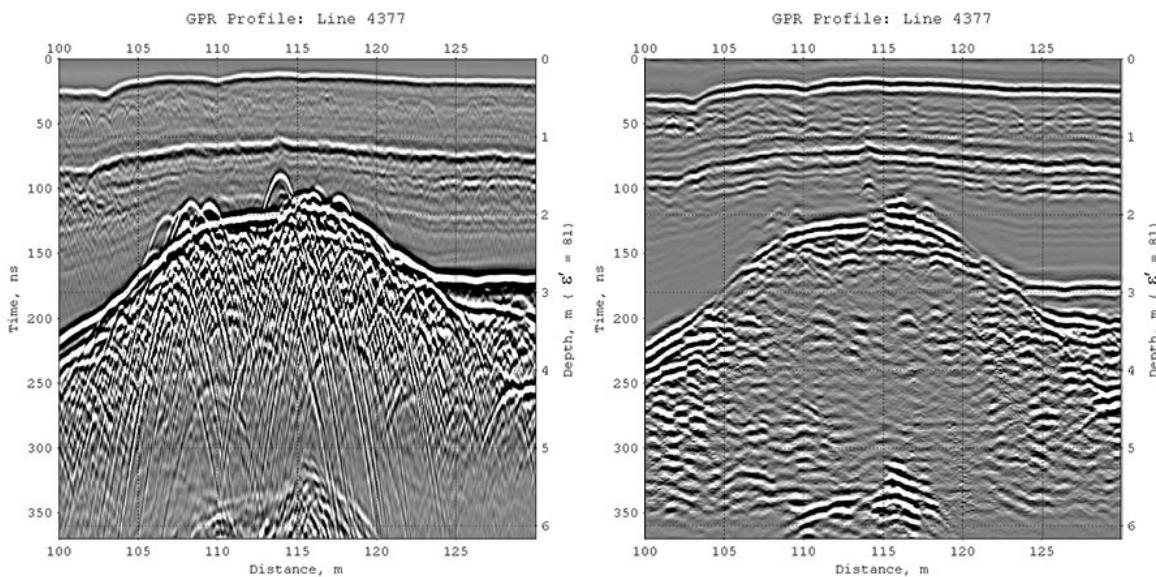
#### Подавление помех пространственной фильтрацией

Наряду с методом декомпозиции волнового поля, в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ реализовано удаление помех с помощью пространственной фильтрации. Фильтрация осуществляется путём анализа пространственно-временных параметров дифрагированных отражений и выделения волн с определённой кажущейся скоростью и направлением распространения, после чего сигналы выделенных волн вычитаются из сигналов георадиолокационного профиля.

Пространственная фильтрация эффективно устраниет помехи в виде воздушных волн и интенсивных дифрагированных отражений от локальных объектов, при этом отражения от границ раздела сред

сохраняются. Алгоритм позволяет гибко настраивать параметры фильтрации в соответствии с особенностями волновой картины каждого конкретного профиля.

Ниже представлен пример применения пространственной фильтрации для удаления многочисленных отражений от тополя и валунов, находящихся на поверхности речного дна и в иловых отложениях. Слева показан исходный профиль, справа – результат пространственной фильтрации.



### Автоматизация обработки

В программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предусмотрено сохранение параметров обработки сигналов георадиолокационного профиля в отдельный файл и последующее применение сохранённых данных для обработки группы профилей в автоматизированном режиме.

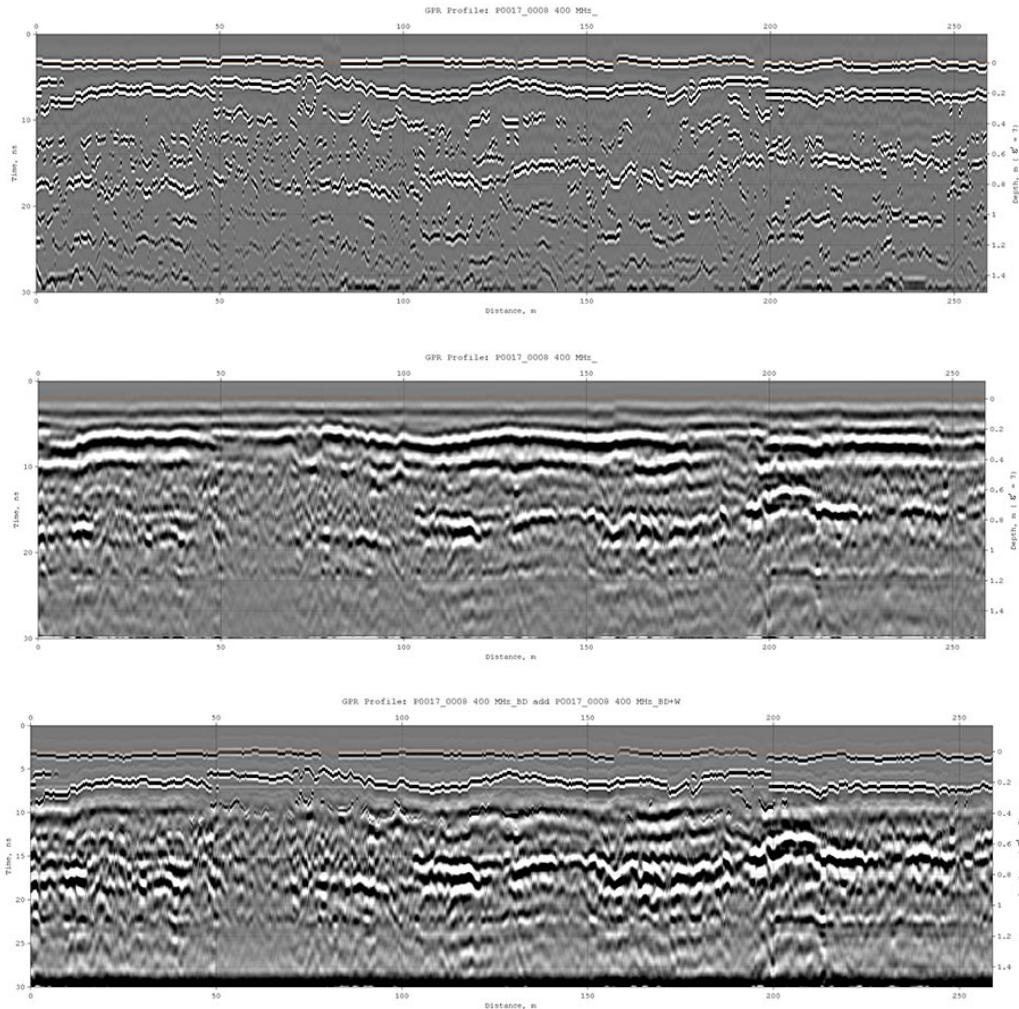
Автоматизация обработки однотипных данных исключает необходимость постоянного взаимодействия с интерфейсом программы. В режиме пакетной обработки выполняется автоматическая загрузка выбранных файлов профилей, запуск процедур обработки, указанных в файле данных, и сохранение результатов без дополнительного участия оператора. Подход особенно эффективен при работе с большими массивами георадиолокационных данных.

### Объединение данных мультиканального георадара

В программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ предусмотрено объединение георадиолокационных профилей, состоящих из одинакового количества трасс, в единый георадиолокационный профиль. Функция применяется при обработке и интерпретации данных многоканального георадара, при котором за один проход различными антennами регистрируется несколько профилей.

В результате объединения отдельных радарограмм многоканального комплекса формируется единая временная и пространственная привязка отражений, что снижает разброс в позиционировании подповерхностных объектов. Также может быть выполнено объединение результатов обработки одного георадиолокационного профиля, полученных с различными параметрами, что повышает информативность итогового профиля.

Ниже показаны результаты обработки профиля, полученного при обследовании дорожной конструкции георадаром 400 МГц: сверху – после повышения разрешающей способности методом B-Detector; посередине – после применения вейвлет-преобразования; внизу – результат объединения этих двух профилей по вертикали.



В дорожных исследованиях измерение толщины покрытия требует повышенной точности. Результат, полученный методом B-Detector, хорошо локализует нижнюю границу асфальтового покрытия, которая уверенно прослеживается на всём протяжении георадиолокационного профиля. При этом границы более глубокого залегания характеризуются определённой фрагментарностью.

На профиле, обработанном с использованием вейвлет-преобразования, граница асфальта выражена менее локализовано, однако нижележащие границы выглядят более целостными. На результирующем профиле, сформированном путём объединения результатов указанных обработок, достигается оптимальное отображение границ слоёв дорожной конструкции: слой асфальтового покрытия, затем щебёночный и песчаный слои.

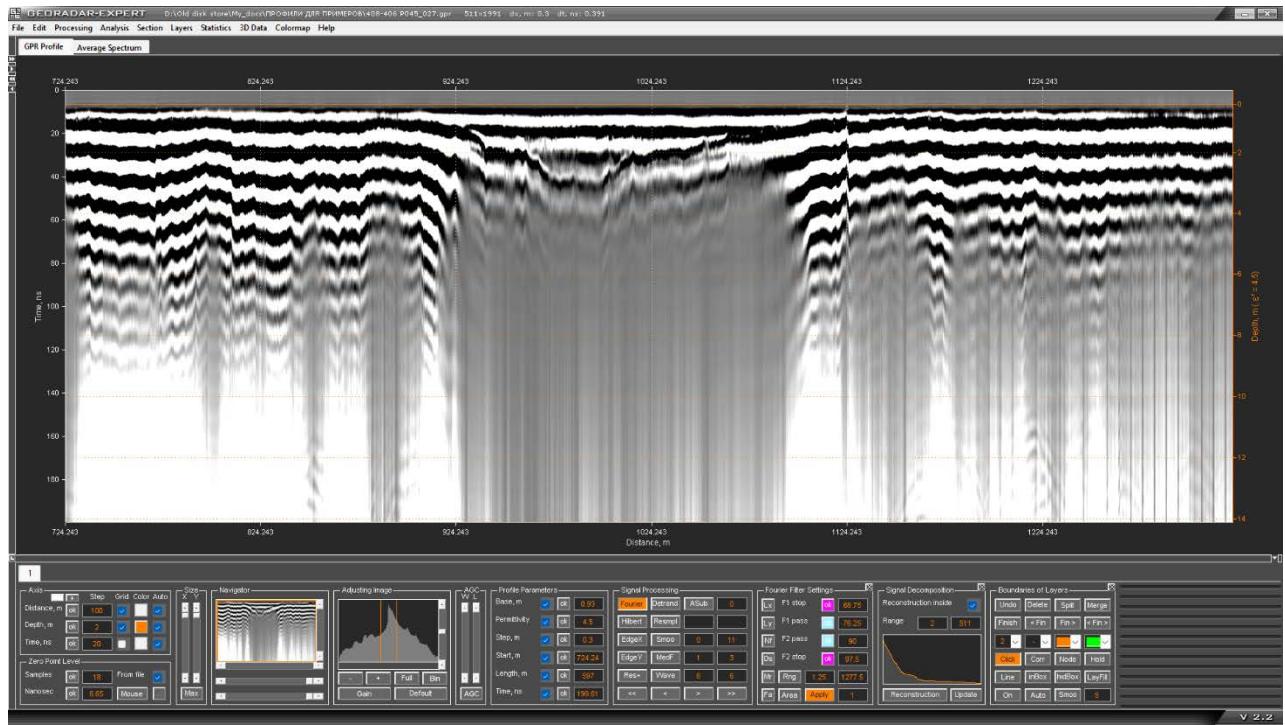
### Графический интерфейс пользователя

В программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ поддерживается работа с двумерным и трёхмерным представлением данных георадиолокационного профилирования и результатов их обработки. При открытии файла автоматически формируется рабочее пространство, адаптированное под специфику работы с загружаемым типом данных.

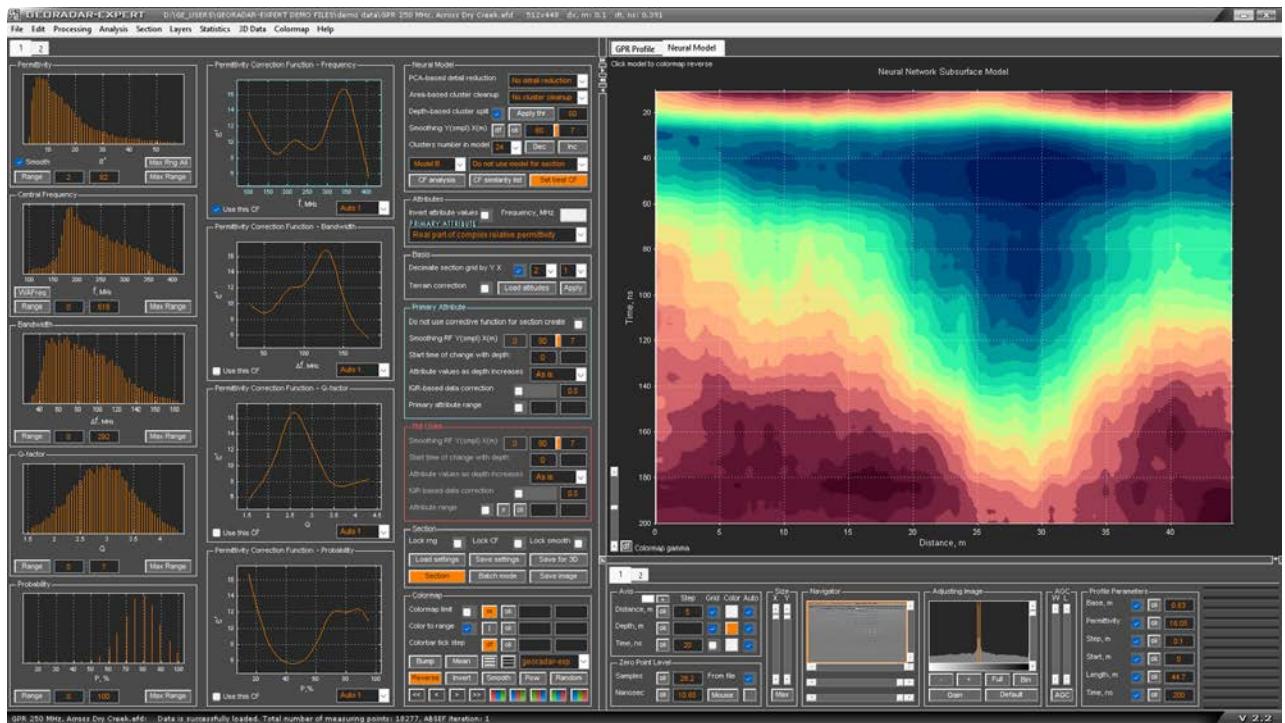
Рабочее пространство программного комплекса организовано в виде групп вкладок. Каждая группа объединяет панели управления по функциональному назначению. Оперативное переключение между вкладками позволяет пользователю сосредоточиться на текущей задаче, отображая только актуальные элементы управления для обработки и визуализации данных.

Далее представлены примеры главного окна программного комплекса в различных конфигурациях рабочего пространства.

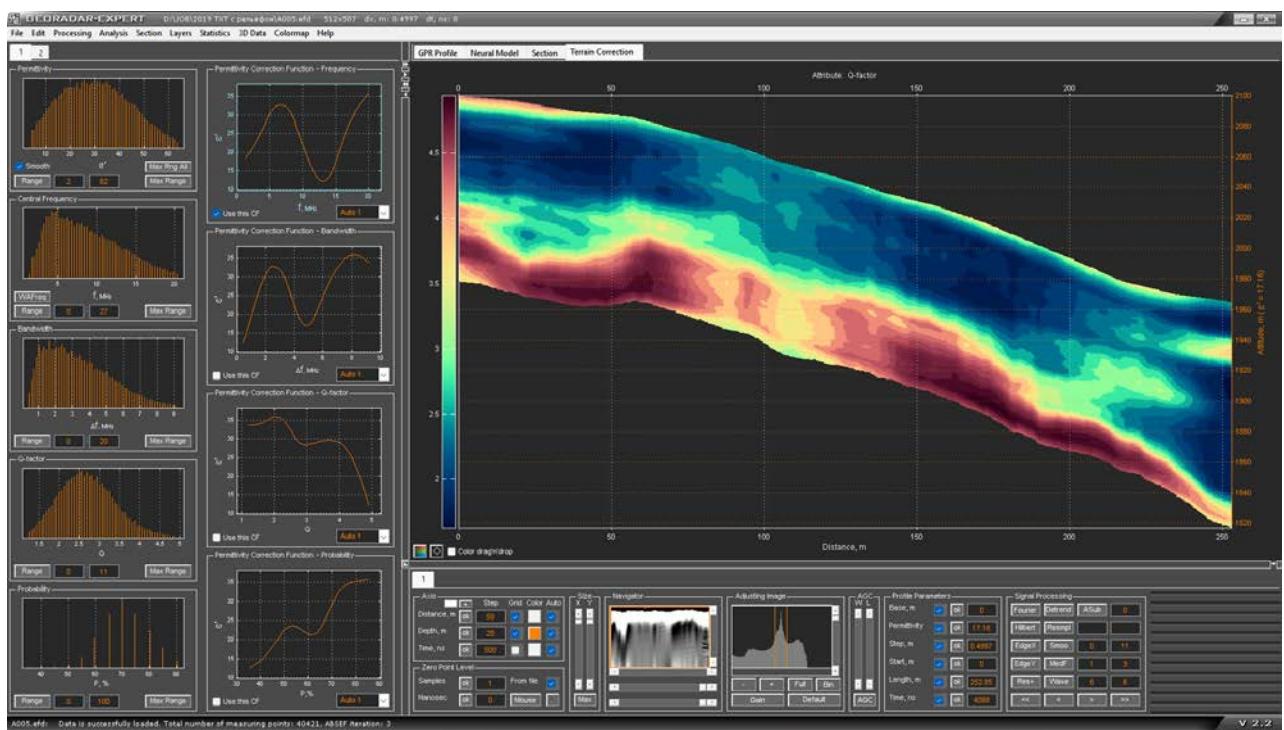
Вкладка визуализации георадиолокационного профиля. В нижней группе вкладок находятся панели управления визуализацией профиля, его параметрами и обработкой.



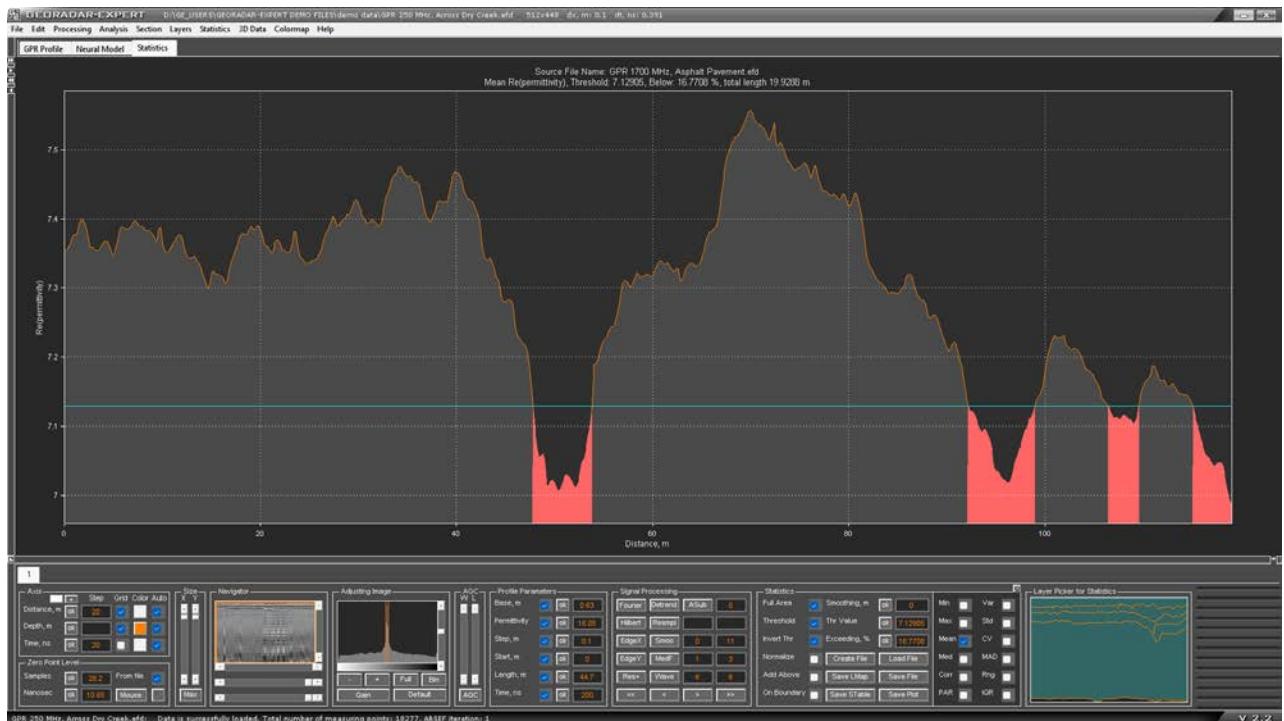
Вкладка настройки создания разреза и вкладка визуализации нейромодели подповерхностной среды. В левой части рабочего пространства располагаются гистограммы визуализации результата автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF.



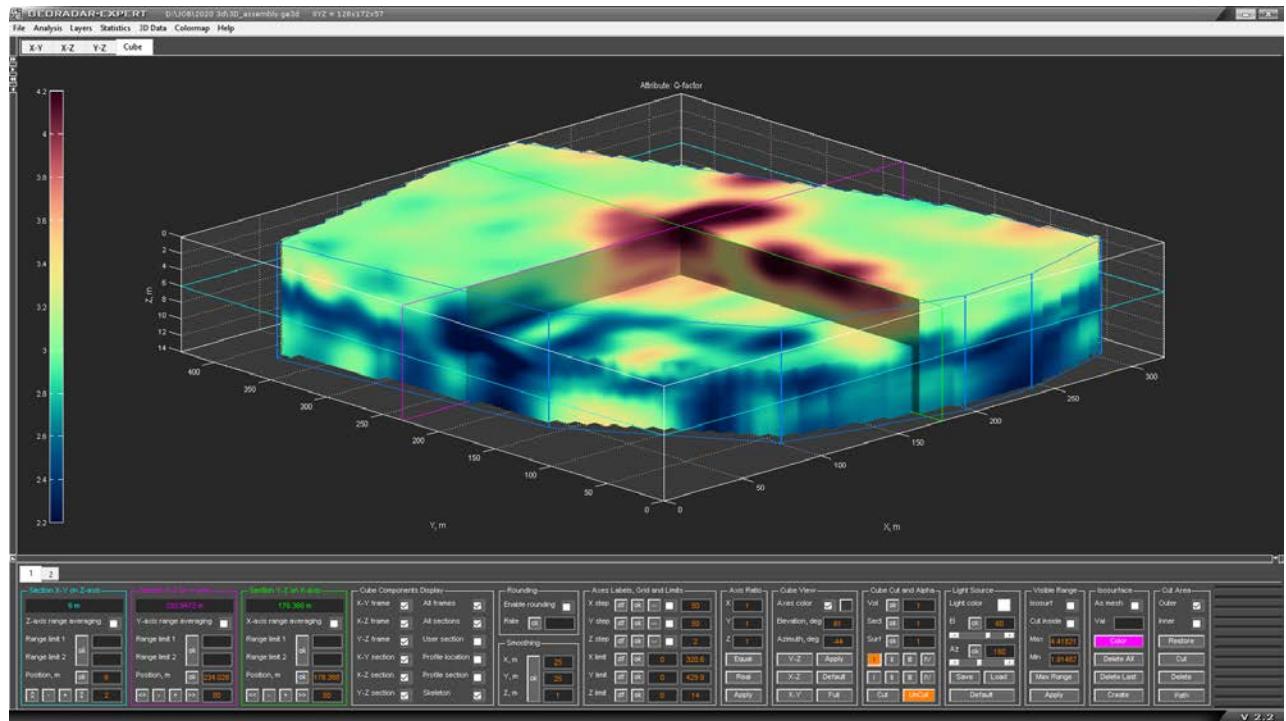
### Вкладка разреза с поправкой за рельеф.



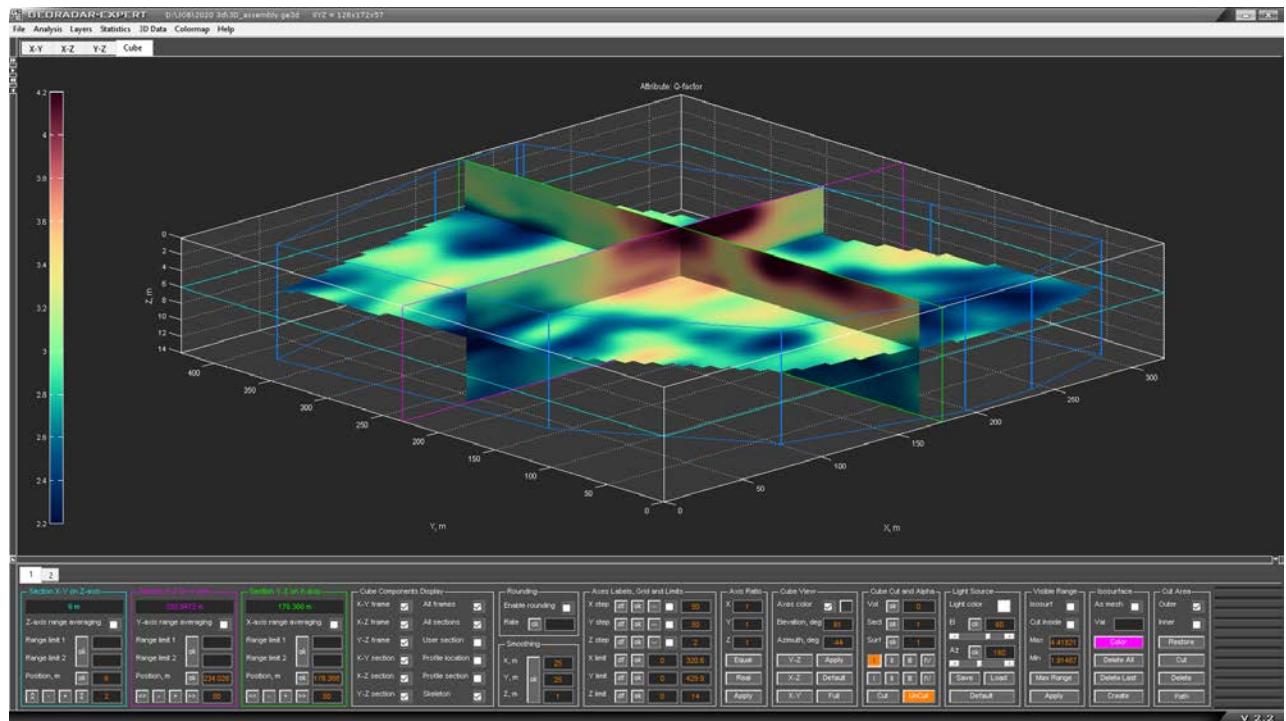
Вкладка визуализации результата статистического анализа георадиолокационных данных. На интерактивном графике предусмотрена установка порога для выявления нарушений по установленному правилу. Области нарушения порогового уровня отображаются красным цветом. Положение областей нарушения и их характеристики экспортируются в электронную таблицу MS EXCEL.



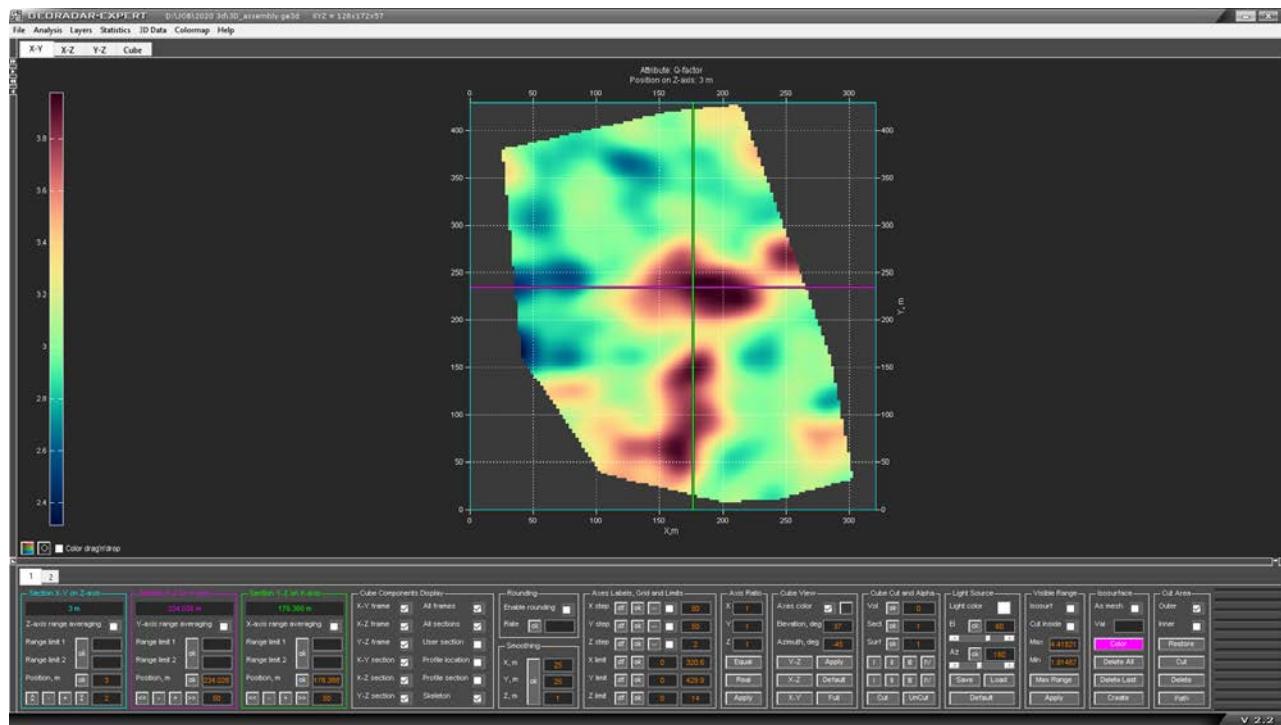
Вкладка визуализации 3D сборки разрезов с вырезанной верхней четвертью объёма. Оси визуализации врачаются с помощью мыши, углы обзора 3D сборки и положение источника освещения могут быть заданы численно через соответствующие параметры.



Вкладка визуализации объёма 3D сборки разрезов с ортогональными сечениями. Положение каждого сечения может регулироваться интерактивно с помощью мыши или путём точного числового задания координат. Также, предусмотрено создание пользователем криволинейного вертикального сечения.

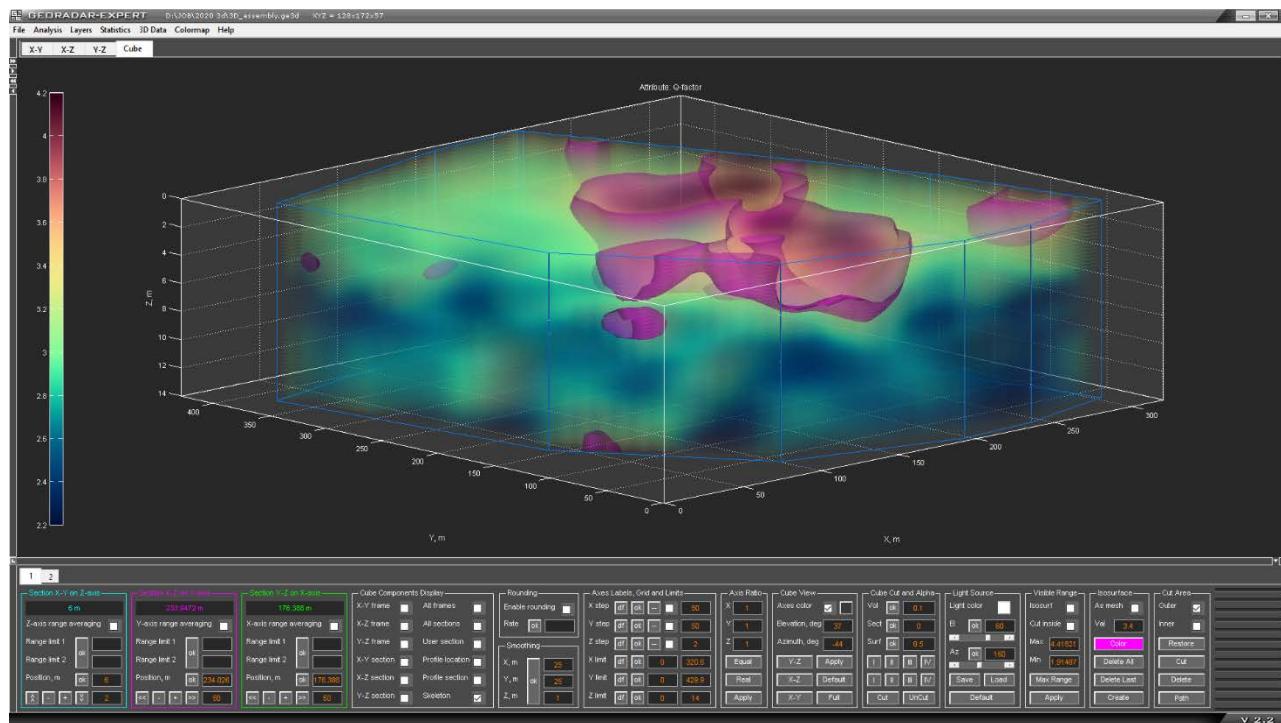


Вкладка горизонтального сечения объёма 3D сборки разрезов. Аналогичные отдельные вкладки предусмотрены для вертикальных сечений.

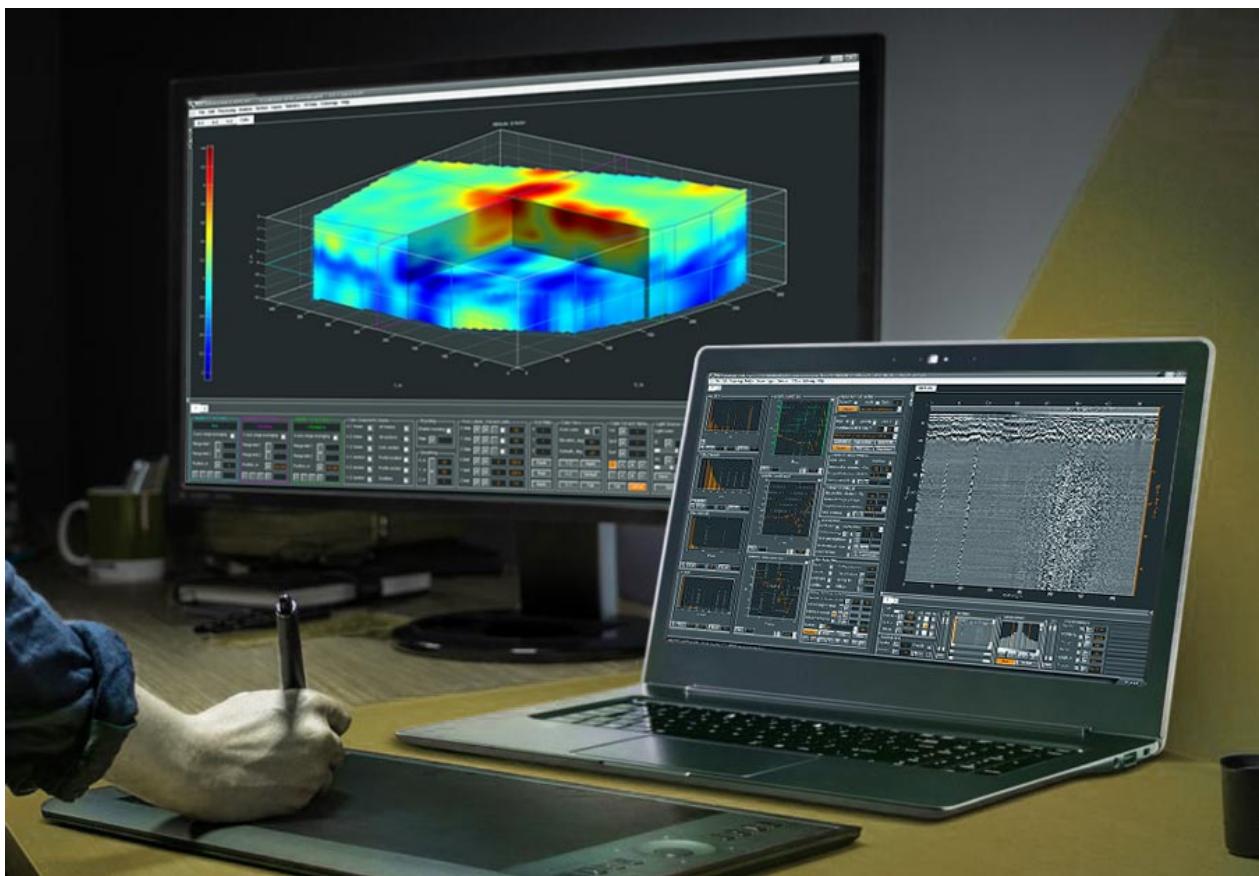


Объём 3D сборки разрезов может быть разделён для визуализации с помощью изоповерхностей, построенных по заданным значениям атрибута. Это позволяет выделить границы слоёв или контуры аномальных зон. После построения изоповерхностей становится доступен экспорт таблицы с рассчитанными объёмами выделенных областей в формате MS EXCEL.

Ниже показана вкладка визуализации, на которой изоповерхности отображены пурпурным цветом, а объём 3D сборки для наглядности сделан полупрозрачным.



## Преимущества ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ



Программный комплекс ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, разработанный с учётом многолетнего опыта обработки георадиолокационных данных, предназначен для решения широкого спектра задач георадиолокации, включая сложные случаи, для которых применение программных решений других производителей оказывается недостаточным.

Повышенная информативность и качество камеральных работ, выполняемых с помощью программного комплекса, способствуют улучшению конкурентоспособности организации, использующей ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, на рынке геофизических услуг. Ниже приведены общие и отличительные свойства программного комплекса по сравнению с другими решениями для обработки георадиолокационных данных.

### **Сходство**

В состав программного комплекса входит набор функций редактирования и обработки данных, характерный для профессиональных систем камеральной обработки георадиолокационных данных. Реализованные функции обеспечивают решение типовых задач георадиолокационного исследования.

### **Отличие**

Основное отличие программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ заключается в реализации специализированных алгоритмов, предназначенных для решения сложных задач камеральной обработки и интерпретации георадиолокационных данных. Реализованные методы повышают информативность результатов и расширяют возможности интерпретации, в том числе при обработке данных полевых измерений, полученных в условиях сильного затухания сигнала и сложной помеховой обстановки.

## Полезные ссылки

Официальный сайт ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ на русском языке:  
<https://www.georadar-expert.ru/>

Загрузить обзор ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ на русском языке:  
[https://www.georadar-expert.ru/download/georadar\\_expert\\_overview\\_rus.pdf](https://www.georadar-expert.ru/download/georadar_expert_overview_rus.pdf)

Загрузить руководство пользователя ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ на русском языке:  
[https://www.georadar-expert.ru/download/georadar\\_expert\\_manual\\_rus.pdf](https://www.georadar-expert.ru/download/georadar_expert_manual_rus.pdf)

Просмотр и загрузка видео уроков на русском языке:  
<https://www.georadar-expert.ru/Video.html>

Техническая поддержка:  
[georadar@mail.ru](mailto:georadar@mail.ru)



Microsoft Windows xp  
Windows 7  
Windows 8  
Windows 10  
Windows 11