

Научно-популярные материалы

«Использование компьютерных технологий в геофизических исследованиях»

**Персова М.Г., проф. каф. Прикладная математика
Новосибирский государственный технический университет**

Цель: Ознакомление слушателей с инновационными технологиями электроразведки.

Электроразведка – это один из основных методов поиска полезных ископаемых, базирующийся на изучении электромагнитного поля в Земле.

Помимо поиска полезных ископаемых электроразведка используется для решения задач инженерной геофизики, к которым относятся задачи обнаружения документально утраченных подземных сооружений, мониторинга коммуникаций, локализации зон обводнения, определения уровня грунтовых и техногенных вод и т.д.

Общие принципы работы технологий наземной электроразведки заключаются в следующем. Посредством различных источников в земле возбуждается электромагнитное поле, а на дневной поверхности с помощью электрически заземленных линий (измеряющих разность потенциалов) или индукционных датчиков (измеряющих ЭДС) выполняются его измерения. По данным измерений определяется структура проводимости в Земле. В свою очередь, по распределению проводимости судят, например, о наличии или отсутствии в изучаемом объеме Земли полезных ископаемых.

В настоящее время существует довольно много технологий электроразведки, отличающихся источниками возбуждения электромагнитного поля, к которым относятся как контролируемые источники (т.е. источники, работой которых управляет человек), так и естественные (природные) источники. К контролируемым источникам относятся, например, горизонтальная и вертикальная заземленные электрические линии. При этом горизонтальная электрическая линия заземляется на поверхность Земли, а вертикальная электрическая линия – в скважине. При работе с такими источниками электромагнитное поле может изучаться как в стационарном режиме (на постоянном токе), так и при переменном токе: на различных частотах или в так называемом режиме становления – в этом случае поле, как правило, изучается после выключения тока в источнике.

Общие сведения об электроразведке

Кроме гальванически заземленных источников используют незаземленные источники в виде замкнутых токовых контуров различной формы. В этом случае измерения ведутся только на переменном токе.

Эффективность применения методов электроразведки определяется не только высокой точностью полевых измерений (что является необходимым требованием к проведению работ), но и программным обеспечением, которое применяется для обработки экспериментальных данных.

Современное программное обеспечение, предназначенное для обработки данных электроразведки, предоставляет возможность численного моделирования, основанного на решении системы уравнений Максвелла в трехмерных областях. Для разработки такого программного обеспечения, квалифицируемого как наукоемкое, требуются знания не только языков программирования, но и курсов математического анализа, численных методов, а также уравнений математической физики.

Такое программное обеспечение позволяет по снятым в поле экспериментальным данным восстановить структуру слоев Земли и, при необходимости, выделить в них локальные поисковые объекты, - другими словами выполнять **инверсию**. Соответствующие подходы к инверсиям основаны на минимизации отклонений между экспериментальными данными и модельными, которые получаются путем численного моделирования электромагнитного поля для подбираемого распределения проводимости в земле.

До самого последнего времени программное обеспечение, предназначенное для обработки экспериментальных данных, было основано на одномерных подходах – **1D-инверсиях**, которые, в свою очередь, основаны на восстановлении параметров слоев Земли под каждой точкой измерения (т.е. на получении проводимости земли только в зависимости от координаты z). Получение общей структуры проводимости среды в изучаемом объеме получается фактически «склейкой» восстановленных одномерных сред.

Естественно, изучаемые среды, как правило, трехмерны, однако бытует мнение, что 1D-инверсия позволяет в целом правильно восстановить проводимость, указав наличие в среде поисковых объектов, а то, что в какой-либо ситуации 1D-инверсия «не работает» определяется только по уровню отличий в практических и теоретических данных. Однако это вовсе не так.

Очень важной проблемой 1D-инверсий является то, что исследователю-геофизику, использующему программы одномерного подбора, даже довольно грубые ошибки интерпретации, как правило, не видны, поскольку наблюдаемые им отличия в практических и теоретических данных при подборе среды под каждой точкой могут быть довольно малы, т.е. очень часто находится какая-нибудь эквивалентная горизонтально-слоистая среда, отклик от которой совпадает с практической кривой даже в случае, если среда, над которой проводятся измерения, реально является трехмерной. Все это мы на примерах постараемся продемонстрировать.

Общие сведения об электроразведке

Широкое распространение 1D-подходов к обработке данных электроразведки обусловлено простотой и быстротой их использования, а также относительной простотой разработки соответствующего программного обеспечения. При этом, как уже говорилось выше, очень часто его применение может обернуться серьезными ошибками в геофизических прогнозах.

Все это сильно снижает эффективность электроразведки и не позволяет использовать все ее (достаточно большие) возможности.

Решением этих проблем является переход к 3D-инверсиям при обработке электроразведочных данных, который возможен только при наличии соответствующего программного обеспечения. Разработка такого программного обеспечения и его внедрение в практику электроразведочных работ является на сегодняшний день самой актуальной проблемой в этой области.

Конечно, в последнее время довольно много говорят об использовании 3D-подходов к интерпретации данных электроразведки. Однако все сводится к тому, что это очень сложно, очень долго, на практике пока не реально.

Одной из главных задач этого курса является показать, что 3D-интерпретация – да, сложно, да, долго, но реально! И оно того стоит!

Общие сведения об электроразведке

Прежде чем начать обсуждение технологических аспектов использования 3D-моделирования, кратко обсудим проблемы традиционных методик – 1D-инверсии. В данном разделе будет рассматриваться технология электроразведки, основанная на изучении нестационарных электромагнитных полей после выключения тока в незаземленном петлевом источнике.

Достаточно очевидны проблемы 1D-инверсий при поисках объектов, имеющих существенно трехмерную геометрию (например, это субвертикальные и вытянутые объекты), и совсем неочевидны проблемы 1D-инверсий в ситуациях, где в целом среда, казалось бы, горизонтально-слоистая с наличием некоторых изменений по латерали.

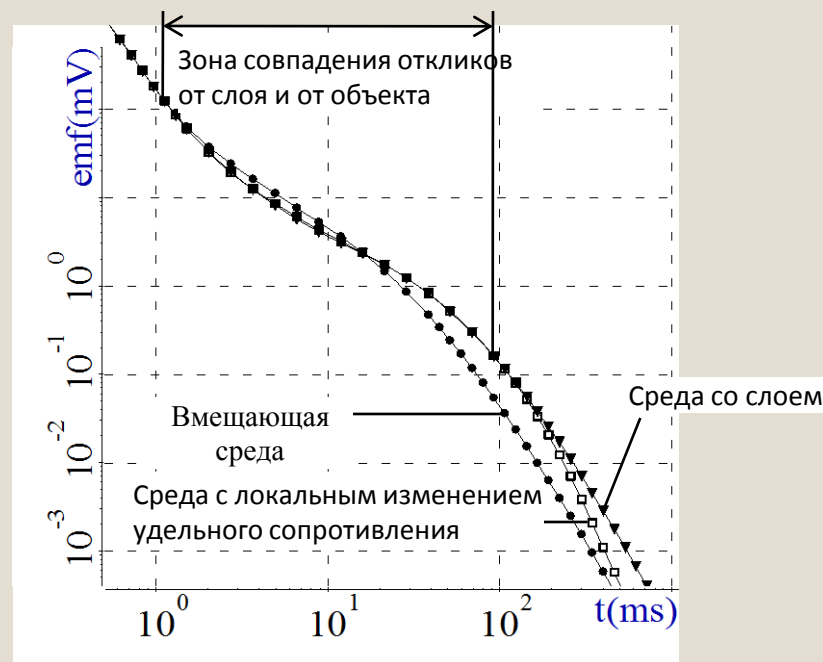
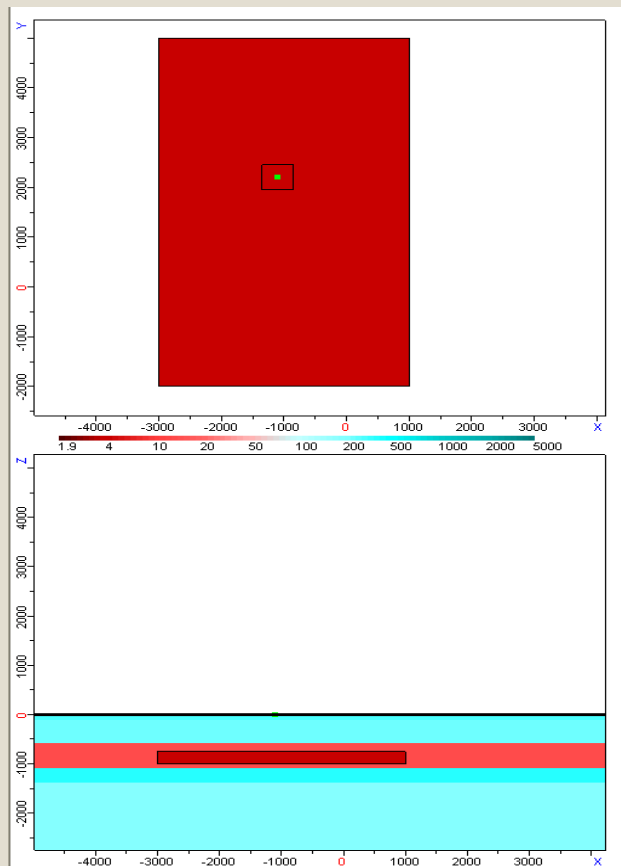
Можно выделить три основных причины возникновения ошибок при выполнении 1D-инверсии:

- 1) существенное отличие откликов от локального изменения удельного сопротивления верхней части разреза и от слоя с аналогичными характеристиками на поздних временах непосредственно под изучаемой точкой;
- 2) существенное отличие откликов от глубинных целевых объектов и от слоев с аналогичными характеристиками во всем временном диапазоне их проявления;
- 3) боковое влияние неоднородностей верхней части разреза.

Продemonстрируем каждую из ситуаций на достаточно простых теоретических примерах.

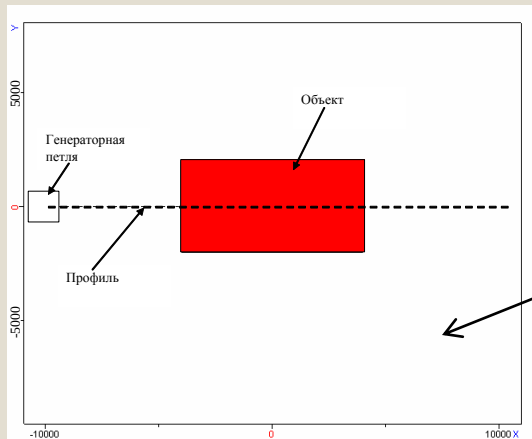
Проблемы 1D-инверсий

Модель объекта (4x7x0.35 км3), 4.5 Ом·м



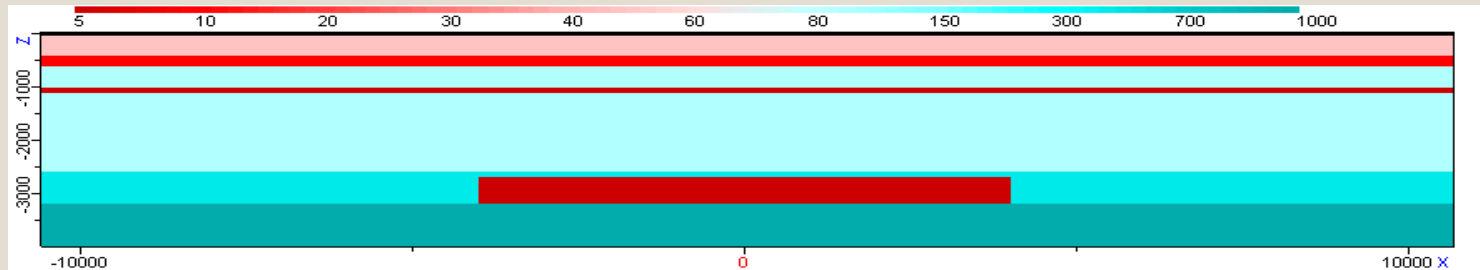
Существенное различие влияний слоя и локального изменения удельного сопротивления на поздних временах при дальнейшем подборе значений сопротивлений в более глубоких слоях приведет к существенному искажению при восстановлении глубинной структуры среды под данной точкой.

Ситуация 1.

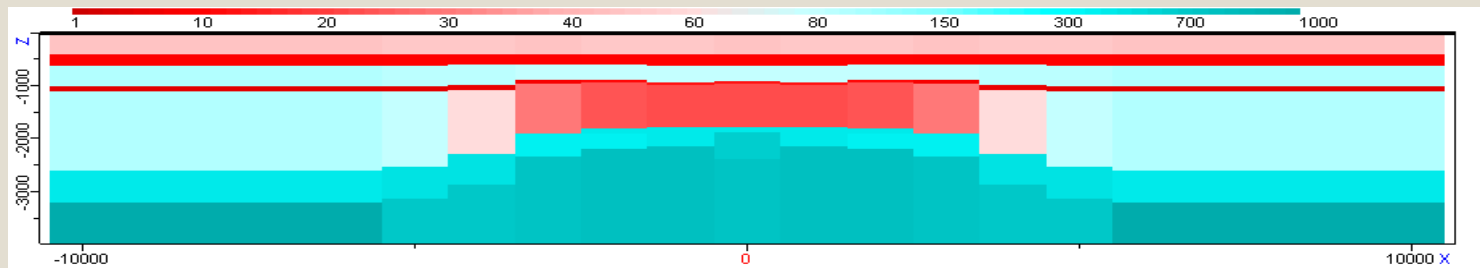


Расположение объекта
и профиля в плане

Разрез исходной модели

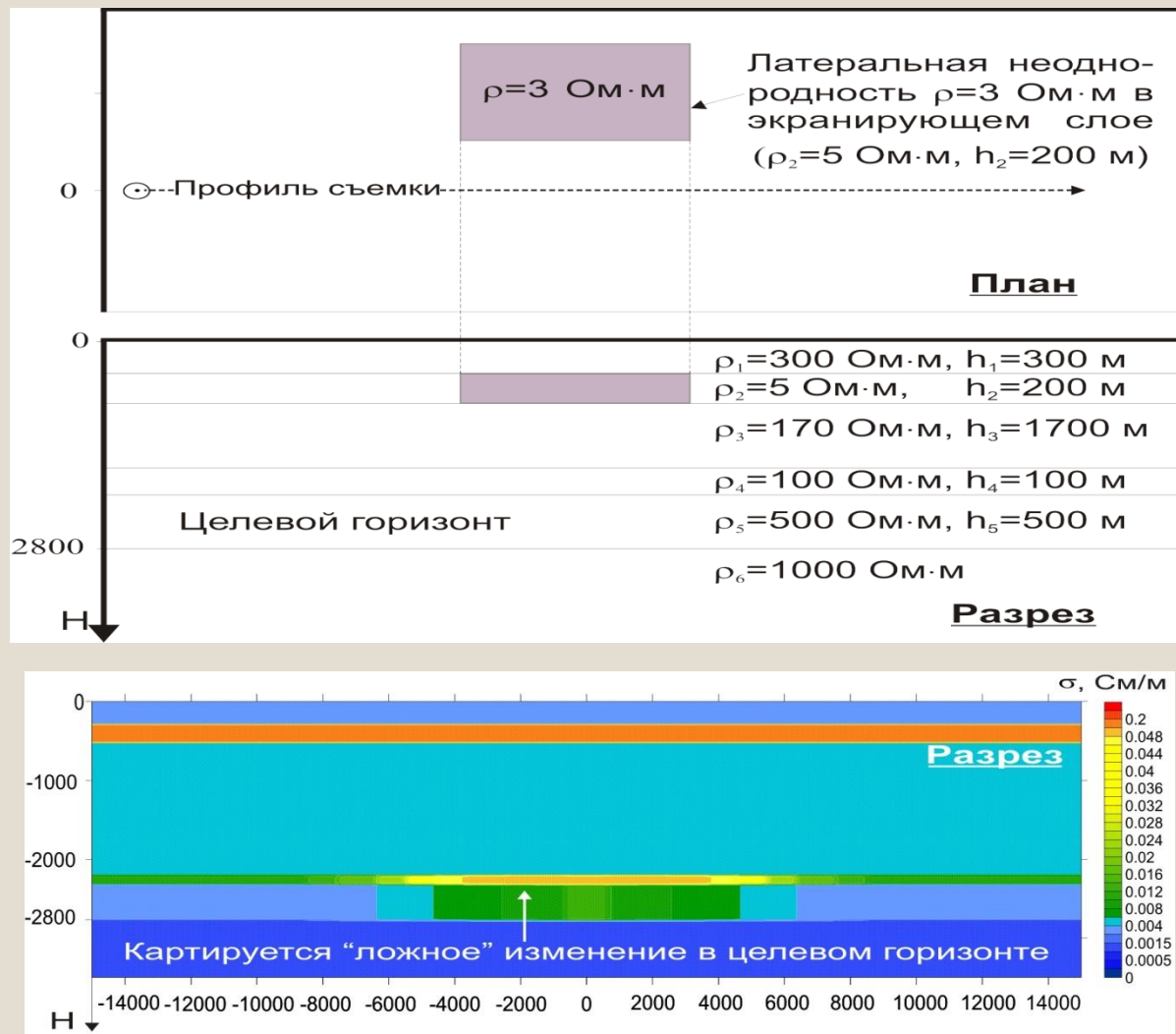


Результат 1D-подбора параметров горизонтально-слоистой среды
в каждой точке профиля, невязки подбора под каждой точкой порядка 2%



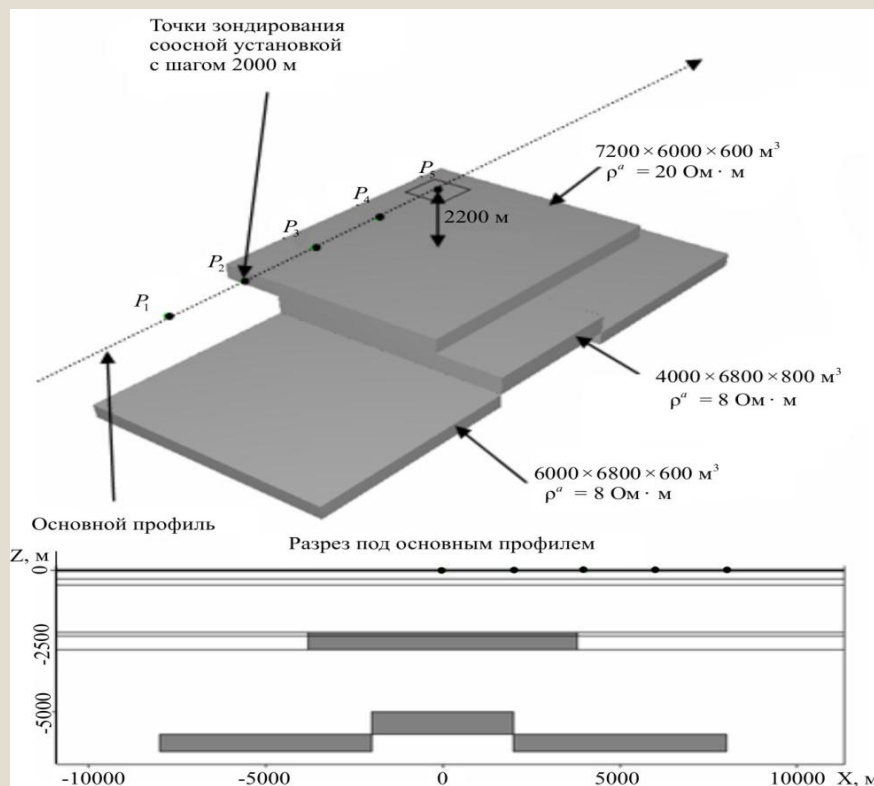
Объект подобран на другой (!) глубине

Ситуация 2.

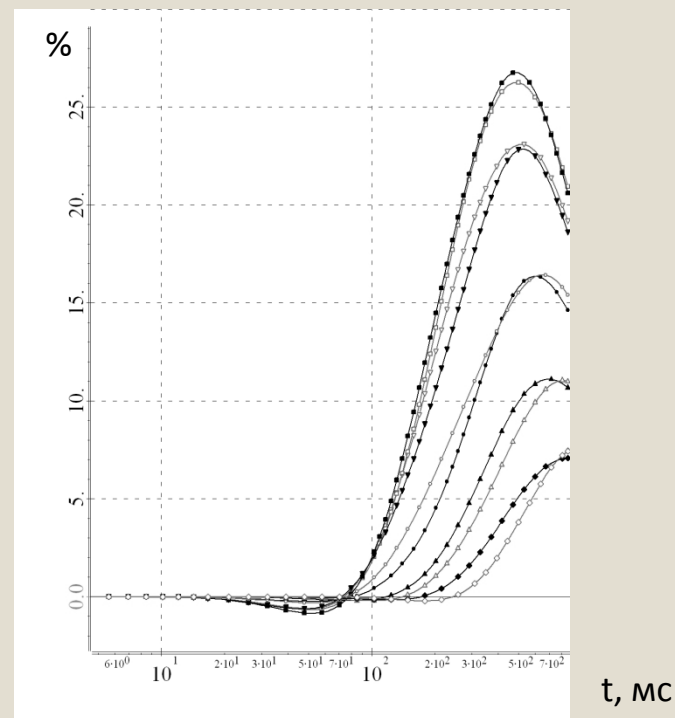


Ситуация 3.

Необходимо отметить, что в последней ситуации ложные аномалии будут возникать не только в случае использования 1D-инверсий, но и в случае 3D-подбора. Так, по профильным измерениям для ситуации, приведенной на предыдущем слайде, после выполнения 3D-подбора также с достаточно удовлетворительной невязкой может быть подобрана модель, приведенная на рисунке.



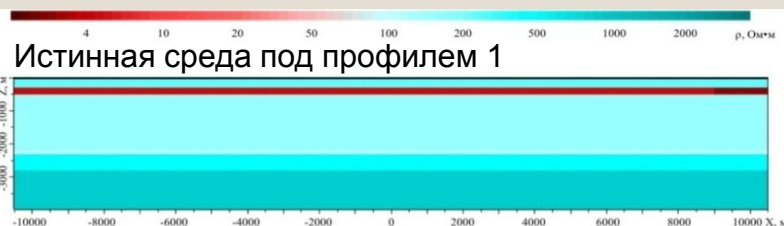
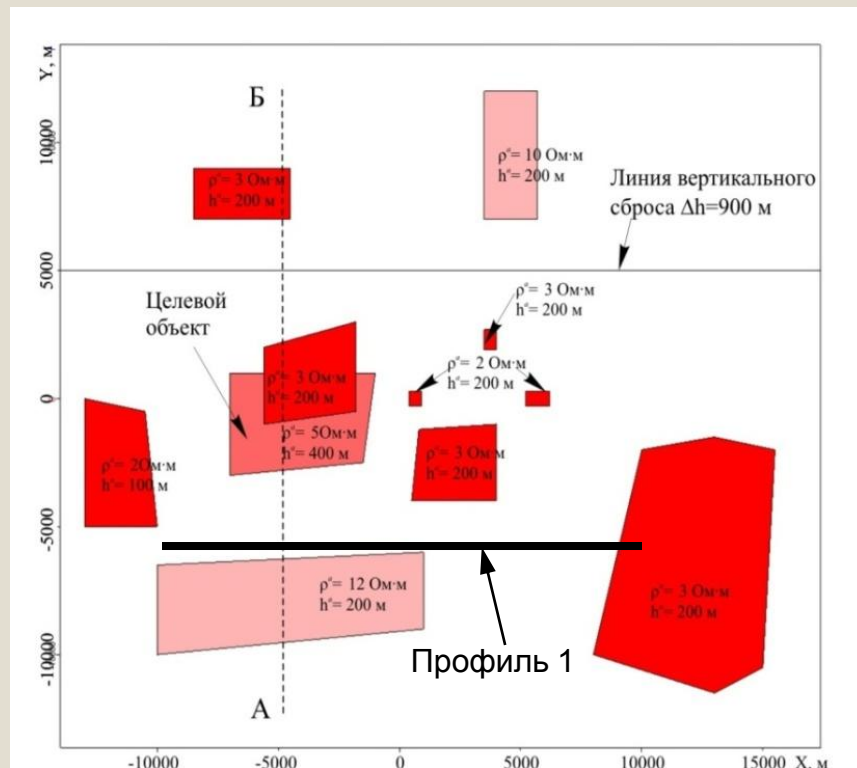
Подобранная геоэлектрическая модель с использованием 3D-моделирования



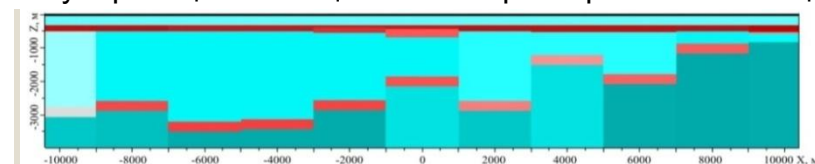
Графики относительных аномалий для истинной модели с боковой неоднородностью (незакрашенные значки) и для подобранной модели (закрашенные значки)

Ситуация 3. Проблемы профильной съемки

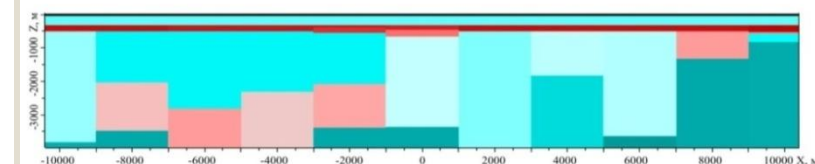
В качестве обобщения всего вышесказанного приведем результаты 1D-инверсии при использовании различных регуляризаций для более сложной трехмерной модели. Во всех случаях, независимо от регуляризации так или иначе картируется ложное изменение проводимости на глубине.



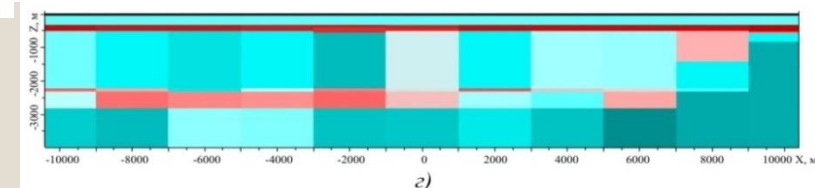
Регуляризация 1 – ищется слой фиксированной толщины



Регуляризация 2 – ищется слой максимальной толщины



Регуляризация 3 – глубина и толщина слоя фиксированы



Результаты 1D-инверсии для сложной трехмерной модели

Таким образом, приведенные выше примеры демонстрируют, что применение 1D-инверсий (для любых регуляризаций) не дает возможности восстановить глубинную структуру среды в случае наличия изменений в верхней части разреза (даже, на первый взгляд, незначительных), а также правильную глубину расположения локального объекта в горизонтально-слоистой среде (ошибка восстановления по глубине зависит от размеров объекта). Более того, при использовании одиночных профилей не поможет и 3D-моделирование. Поэтому единственной возможностью корректного восстановления проводимости на глубине является использование площадных зондирований и восстановление единой модели трехмерной среды, дающей совпадающие с практическими данными сигналы во всех точках съемки одновременно.

Заметим, что рассматриваемые ситуации не являются «надуманными», они повсеместно встречаются на практике. Это не позволяет решать геологические задачи совсем не потому, что электроразведка в принципе не может решать такие задачи, а потому, что используются совершенно некорректные методы обработки.

Далее мы продемонстрируем возможности трехмерных подходов при проектировании электроразведочных работ и при интерпретации получаемых данных.

В данном разделе мы рассмотрим, как с использованием 3D-моделирования могут быть спроектированы электроразведочные работы для различных геологических задач.

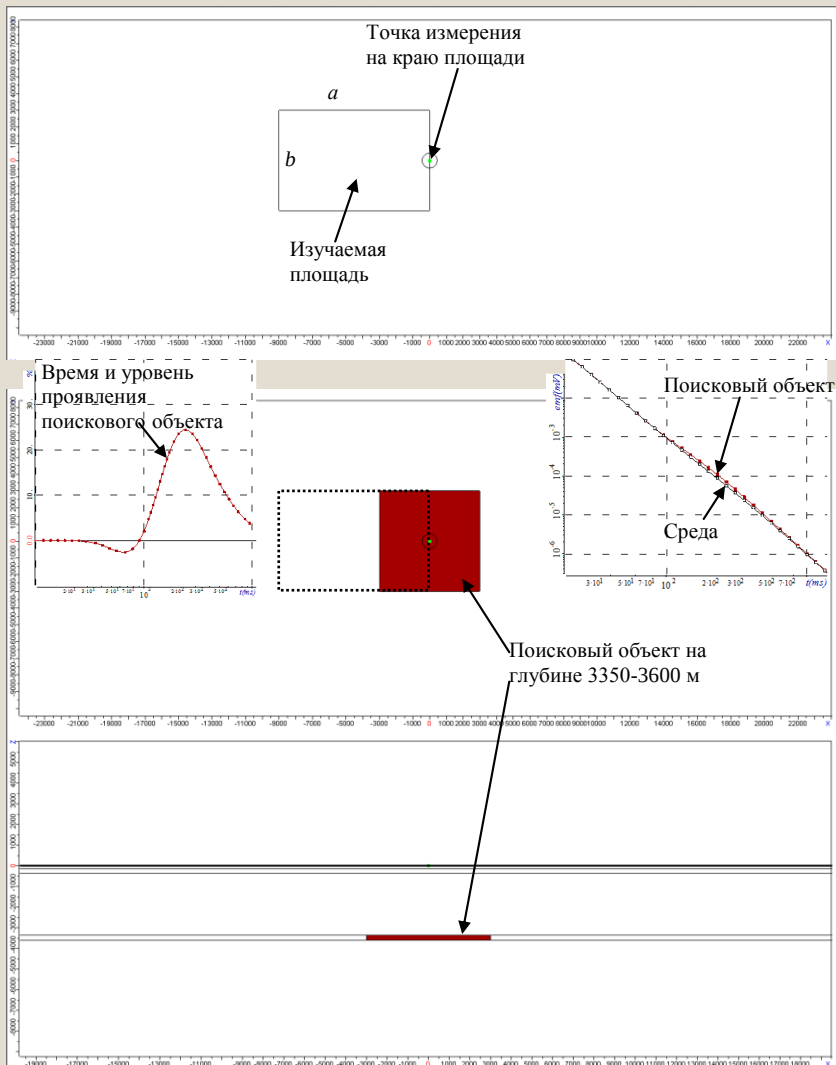
Опыт проведения 3D-интерпретации электроразведочных данных на различных площадях Восточной Сибири позволил установить тот факт, что при недостаточном учете влияния изменения проводимости верхней части разреза по площади структура проводимости на глубине может восстанавливаться ошибочно.

Поэтому при проектировании электроразведочных работ, нацеленных на изучение глубинных горизонтов, необходима съемка по определенной, достаточной для разделения влияний глубинных и "боковых" неоднородностей площади. Стратегия проектирования соответствующих работ может быть следующей.

Внутри площади измерений выделяются вложенные друг в друга участки, внутри которых можно гарантировать достоверность восстановления структуры среды до определенной глубины. В центральном участке эта глубина самая большая, и она уменьшается при движении к краям площади. При этом размеры участков и глубинность зависят от проводимости разреза и от характеристик поискового объекта.

Для определения размеров этих вложенных друг в друга участков сначала определяется временной диапазон (и, по возможности, уровень максимального проявления) поискового объекта в зависимости от его глубины (и, возможно, удельного сопротивления). Затем определяется размер площади такой, чтобы изменение проводимости в верхней части разреза за пределами площади не оказывало значимого влияния в выделенном диапазоне времен проявления поискового объекта.

Проектирование электроразведочных работ

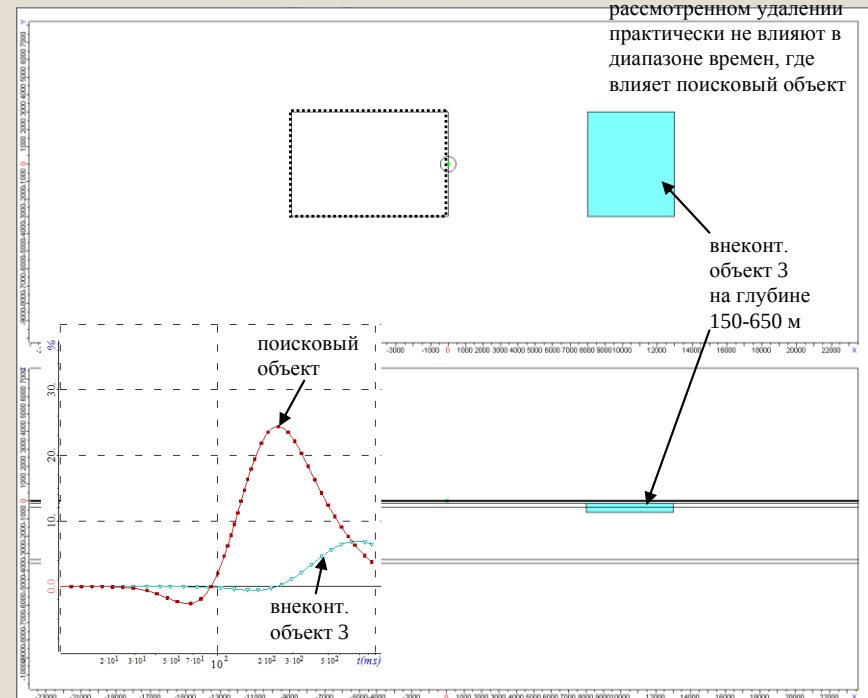
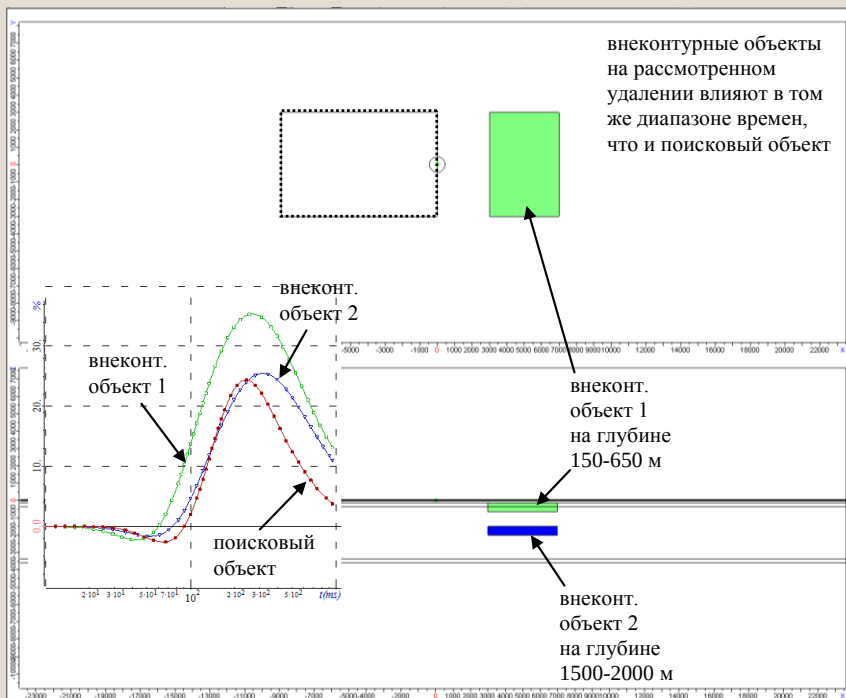
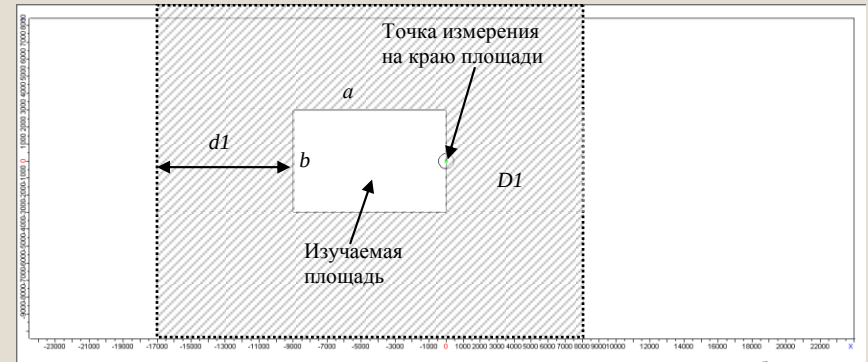
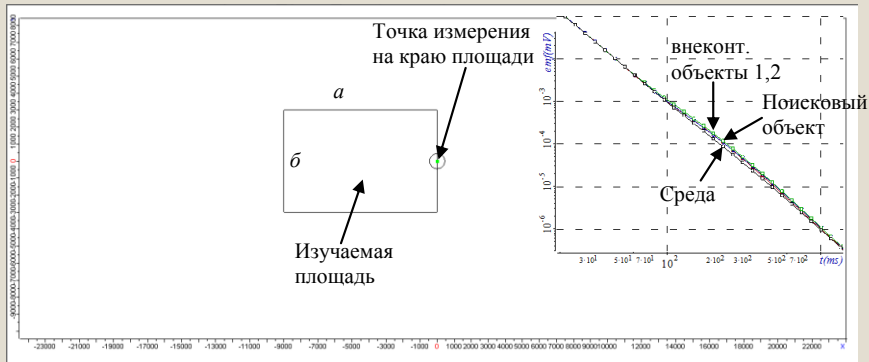


Рассмотрим пример, иллюстрирующий задачу проектирования работ при поиске целевого объекта в глубинном горизонте. Пусть площадь, в пределах которой необходимо восстановить геоэлектрический разрез, имеет размеры $a \times b$ (см. рисунок, там же показан поисковый объект и его влияние в кривой ЭДС).

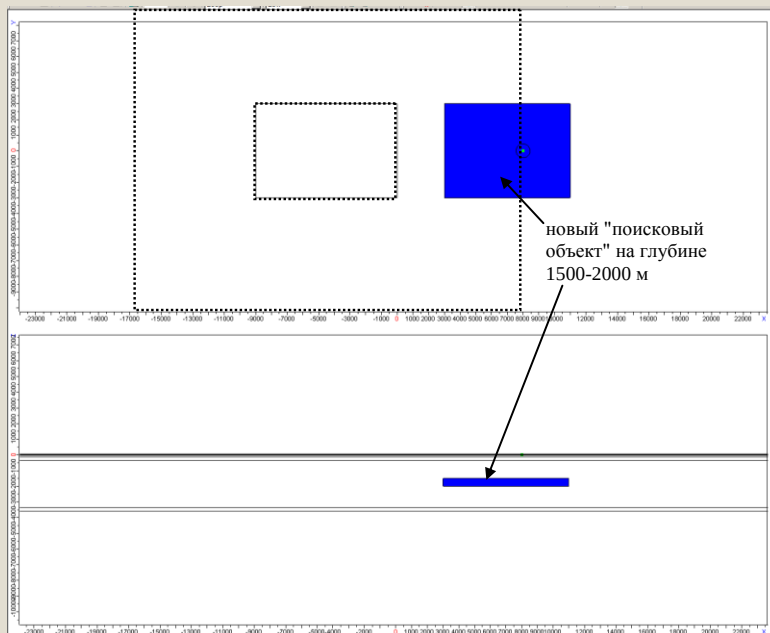
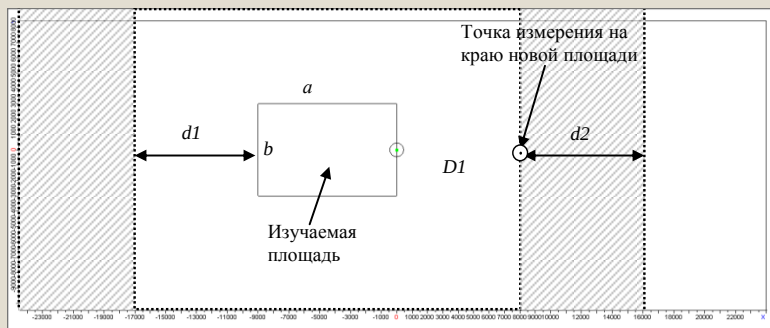
С помощью 3D-моделирования определяется расстояние от края заданной площади, на котором любой характерный для рассматриваемой геоэлектрической обстановки объект с измененной проводимостью, расположенный за пределами этой площади, перестает оказывать влияние в выделенном диапазоне времен проявления поискового объекта.

На следующем слайде приведен пример влияния таких неоднородностей проводимости на различном расстоянии.

Проектирование электроразведочных работ, нацеленных на изучение глубинных горизонтов



Проектирование электроразведочных работ, нацеленных на изучение глубинных горизонтов



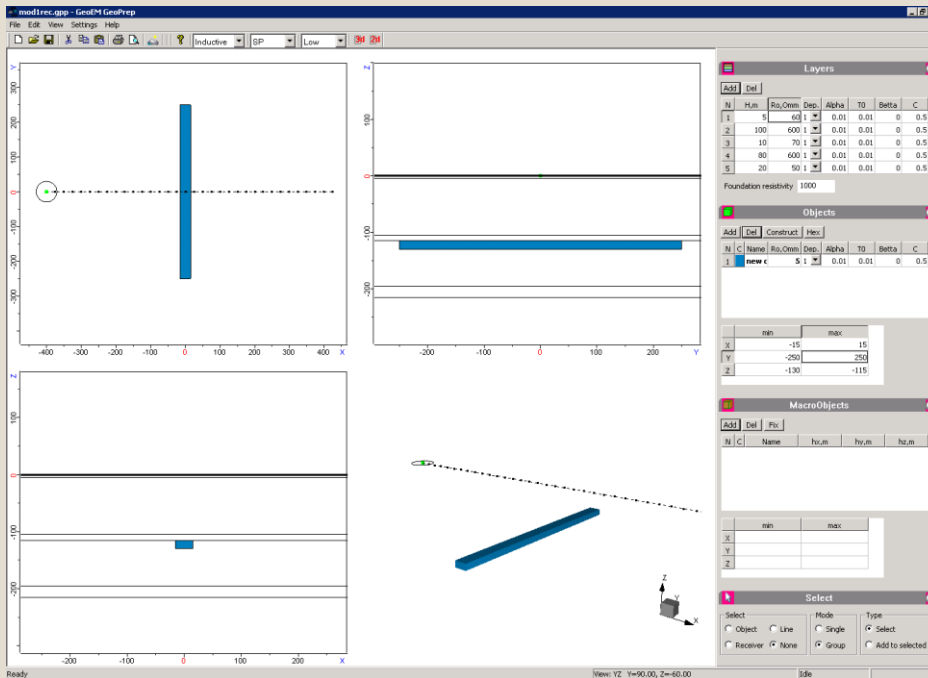
Итак, мы определили, что объекты, расположенные на расстоянии $d1$ от края площади axb , влияют уже гораздо позже, чем интересующий нас диапазон времен. Если неоднородности проводимости, расположенные в пределах выявленной дополнительной площади (обозначена штриховкой и будем обозначать ее $D2$), могут быть только в самой верхней части разреза, то площадь $(a+d1) \times (b+d1)$ (в дальнейшем эту площадь будем обозначать $D1$) является достаточной для восстановления параметров поискового объекта на заданной глубине внутри площади axb .

Если нет, то в этом случае даже дополнительная площадь является недостаточной. Поэтому на следующем этапе определяется максимальная глубина неоднородностей проводимости внутри площади $D1$, которые (достаточно значимо по сравнению с уровнем аномалии от поискового объекта) влияют в точках исходной площади axb в диапазоне времен проявления поискового объекта, и им присваивается статус "поискового объекта" для восстановления среды уже по площади $D1$, и для такого "поискового объекта" повторяются описанные выше действия.

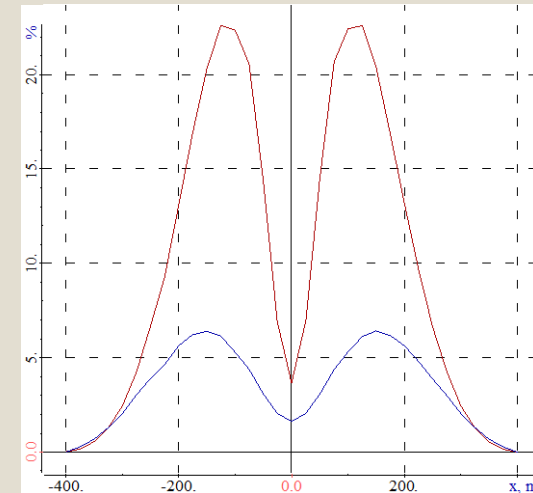
Таким образом, определяется необходимый размер площади $(a+d1+...+dn) \times (b+d1+...+dn)$, внутри которой требуется проводить измерения ЗСБ для гарантированного восстановления трехмерной проводимости среды до заданной глубины внутри площади axb .

Проектирование электроразведочных работ, нацеленных на изучение глубинных горизонтов

При поиске субвертикальных, а также вытянутых объектов гораздо более эффективной является площадная съемка. Продemonстрируем это на примере вытянутого проводящего объекта, расположенного на двух глубинах – первая глубина, как показано на рисунке (слева) – 120 м, вторая глубина была взята 220 м. На правом рисунке показаны результаты 3D-моделирования. Из приведенных результатов видно, что рассматриваемый объект при соосной съемке проявляется двумя положительными (не очень большими) максимумами аномалии, удаленными от проекции центра объекта на некоторое расстояние.

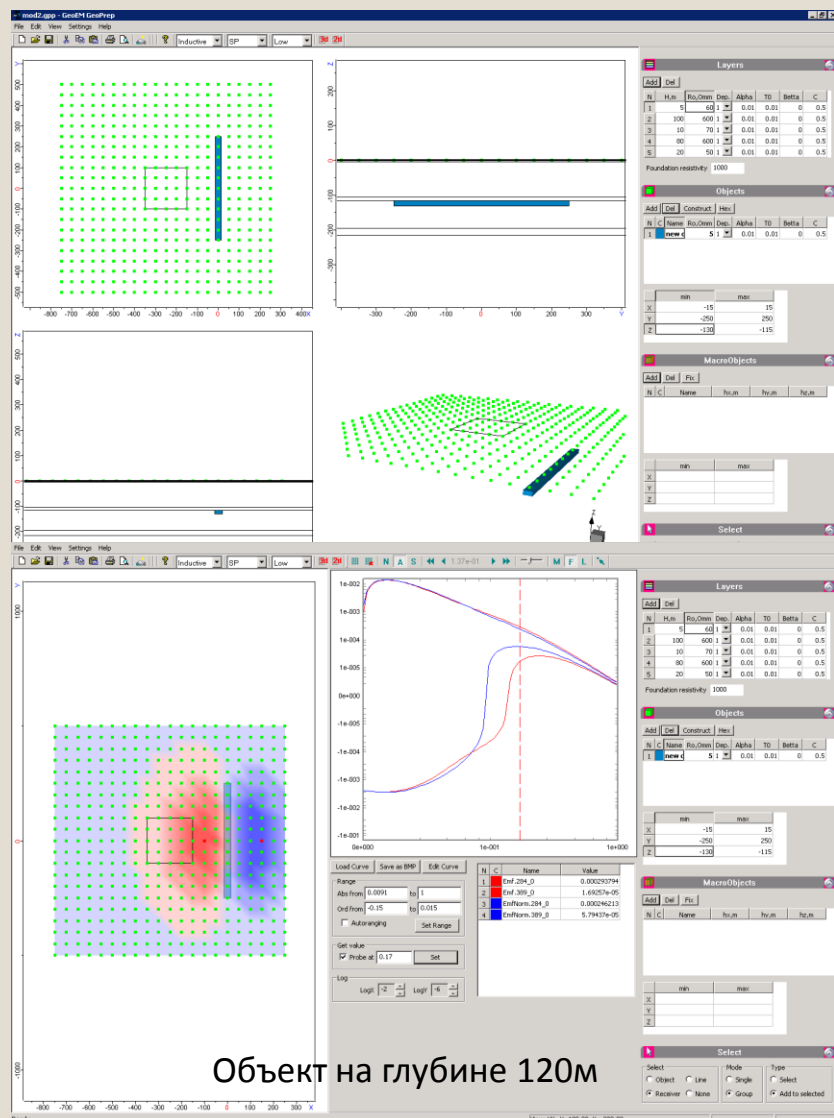


Геоэлектрическая модель



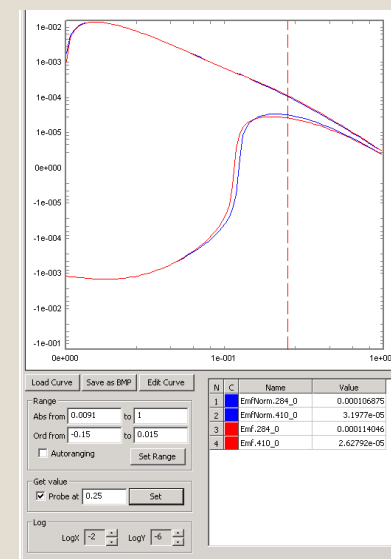
Результаты 3D-моделирования для модели с объектом на глубине 120 м (красная кривая) и с объектом на глубине 220 м (синяя кривая) в виде нормированных графиков вдоль профиля в момент времени 0.15 мс (красная кривая) и 0.22 мс (синяя кривая)

Проектирование электроразведочных работ, нацеленных на поиск вытянутых и субвертикальных проводящих объектов



На рисунках приведены результаты 3D-моделирования для площадной технологии измерений для модели с объектом на глубине 120 м (рисунки слева) в виде площадного распределения аномального поля в момент времени 0.14 мс и графиков ЭДС в точках (-100, 0) и (150, 0) для модели с объектом (графики обозначены красным цветом) в сравнении с нормальным полем (графики обозначены синим цветом).

Из приведенных результатов расчетов видно, что в ближней точке (в области положительной аномалии) относительная аномалия практически эквивалентна максимальной аномалии в соосной съемке, а в дальней точке – относительная аномалия практически в 3 раза выше, чем при использовании профильной технологии и соосных измерений.



Объект на глубине 220м

Проектирование электроразведочных работ, нацеленных на поиск вытянутых и субвертикальных проводящих объектов

Два шага процедуры выполнения 3D-инверсий данных МПП

- 1) Поиск стартовой модели в виде распределения проводимости в ячеистой структуре;
- 2) Уточнение параметров (размеров и проводимости) локальных неоднородностей, выделенных на первом шаге.

Общая схема интерпретации выглядит следующим образом:

Этап 1: подбор вмещающей среды по комплексу всех данных;

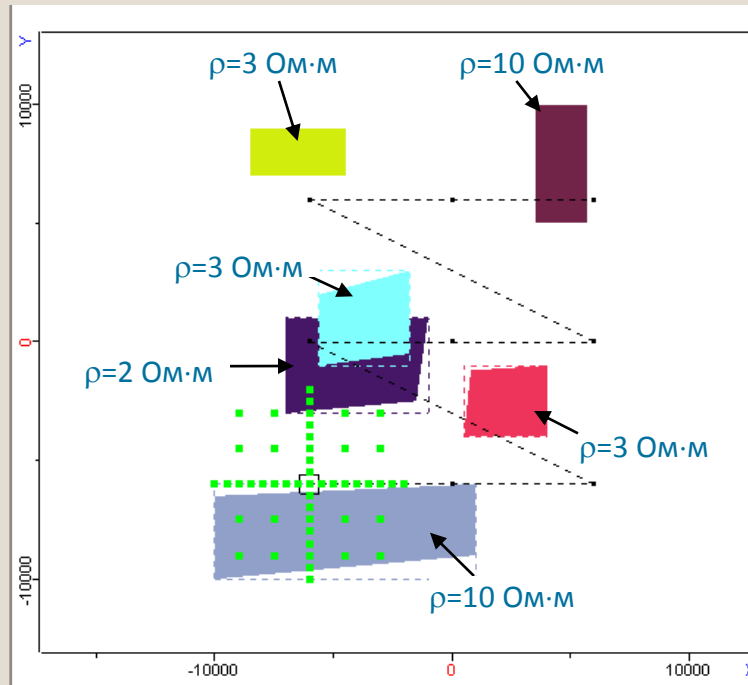
Этап 2: подбор неоднородностей верхней части разреза;

Этап 3: подбор неоднородностей глубинной части разреза при фиксированном трехмерном распределении проводимости в верхней части разреза, найденном на этапе 2.

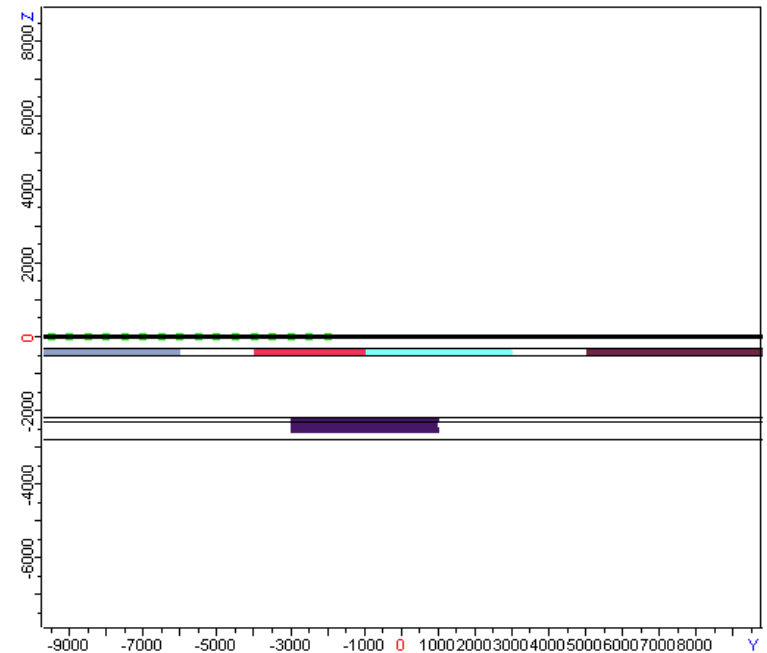
Этап 4: окончательная коррекция трехмерной модели с одновременным уточнением параметров локальных неоднородностей верхней и глубинной части разреза

**Использование 3D-инверсии при восстановлении
глубинной структуры среды в условиях неоднородной
верхней части разреза**

План



Разрез



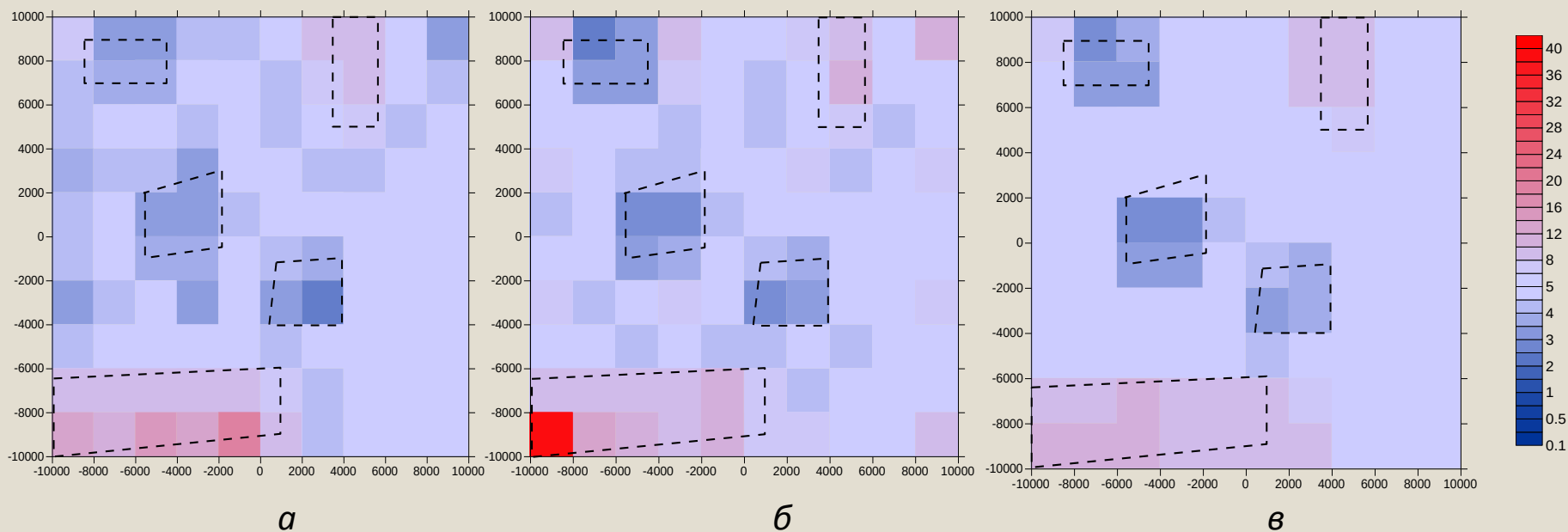
Истинная
модель
вмещающей
среды

№	h	ρ
1	300	300
2	200	5
3	1700	170
4	100	100
5	500	500
6	∞	5000

Этап. 1
Вмещающая
среда,
подобранная
по комплексу
всех данных

№	h	ρ
1	300	300
2	200	5.13
3	200	75
4	2850	200
5	∞	840

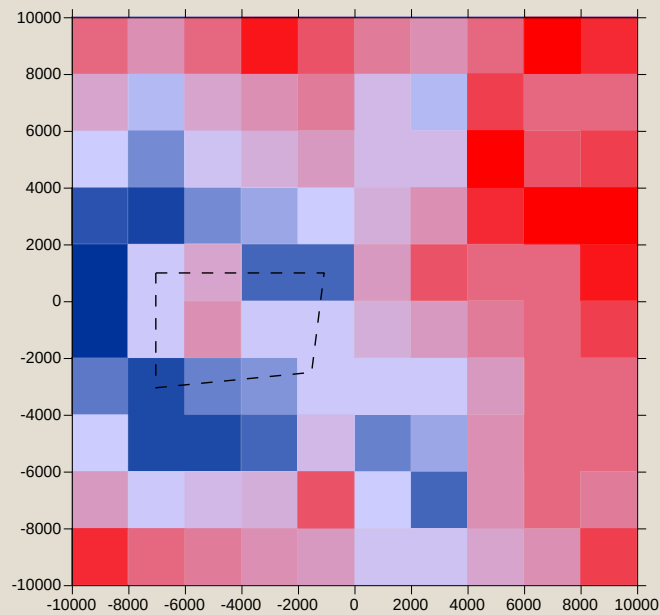
Геоэлектрическая модель 1 для демонстрации всех этапов процедуры 3D-инверсии (задача картирования коллекторов)



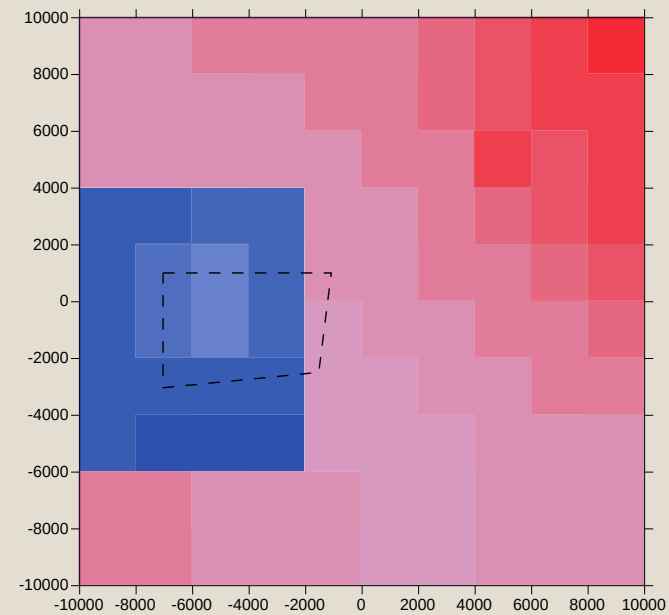
Распределение удельного электрического сопротивления в верхнем слое после первой (*а*) и третьей (*б*) итераций до использования процедуры сглаживания и после использования процедуры сглаживания (*в*)

Значение функционала для горизонтально слоистой среды 54.99,
 На первой итерации – 26.84; на третьей итерации – 22.7;
 после сглаживания – 24.79

Этап 2. Подбор в ячеистой структуре распределения проводимости в верхней части разреза



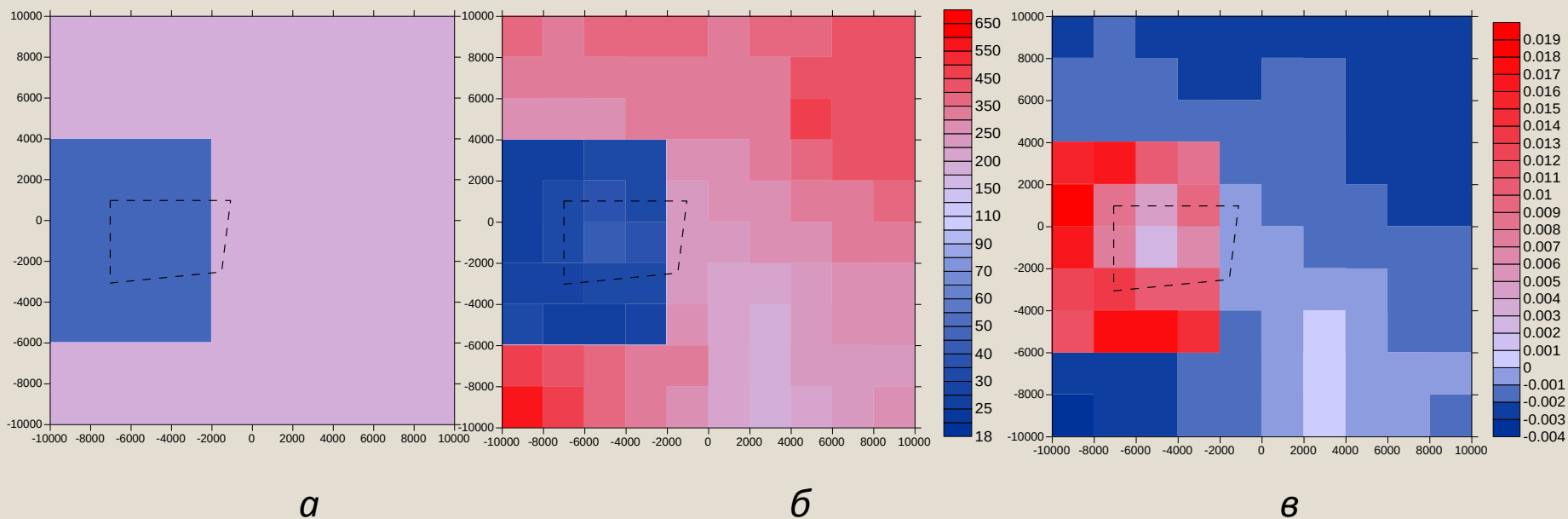
a



б

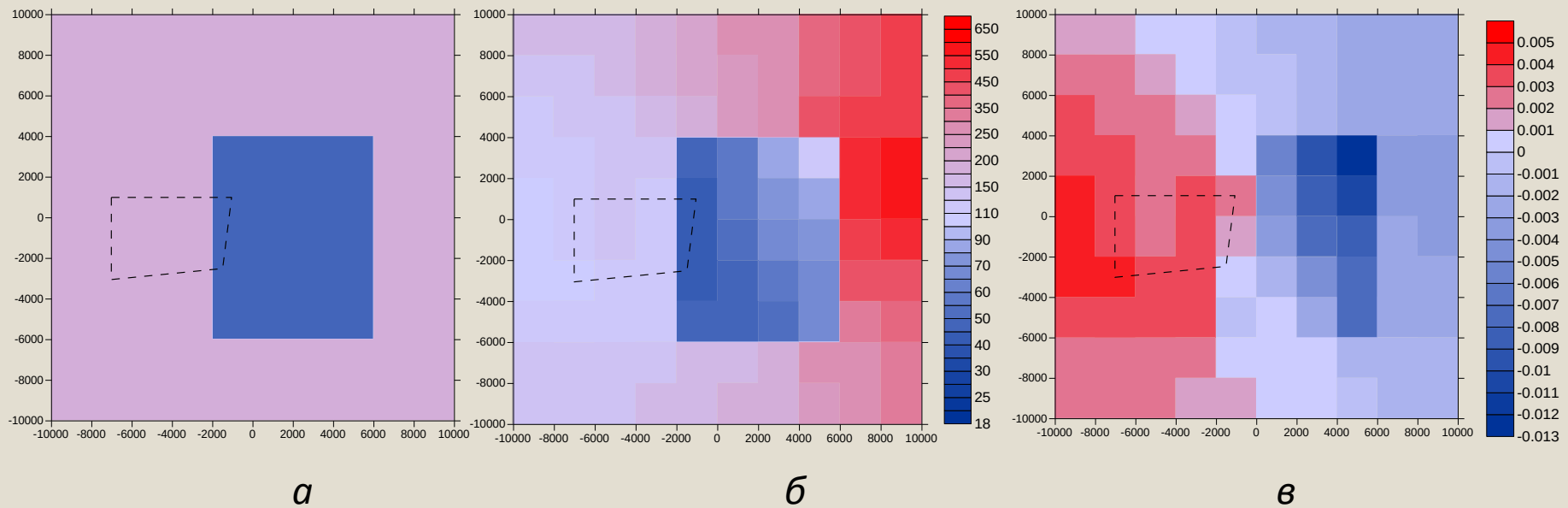
Распределение удельного электрического сопротивления в нижнем слое до использования процедуры сглаживания (*a*) и после (*б*)

Этап 3. Подбор в ячеистой структуре распределения проводимости в нижнем слое при фиксированном, подобранном в ячеистой структуре верхнем слое



Восстановление избыточной проводимости при примерном совпадении положений истинного и аппроксимирующего его объектов: *a* – предварительное распределение удельного сопротивления в слое; *б* – удельное сопротивление, полученное в результате одного шага борновской инверсии со сглаживанием; *в* – распределение аномальной проводимости

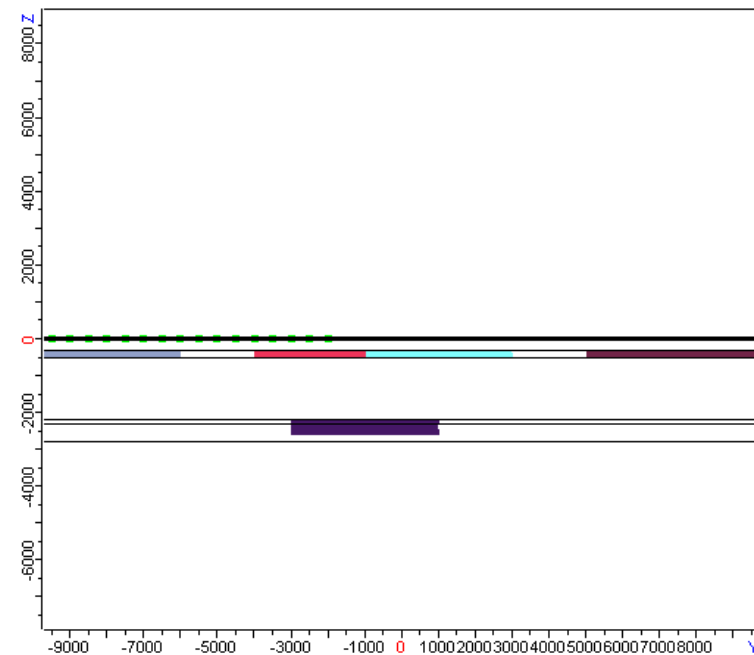
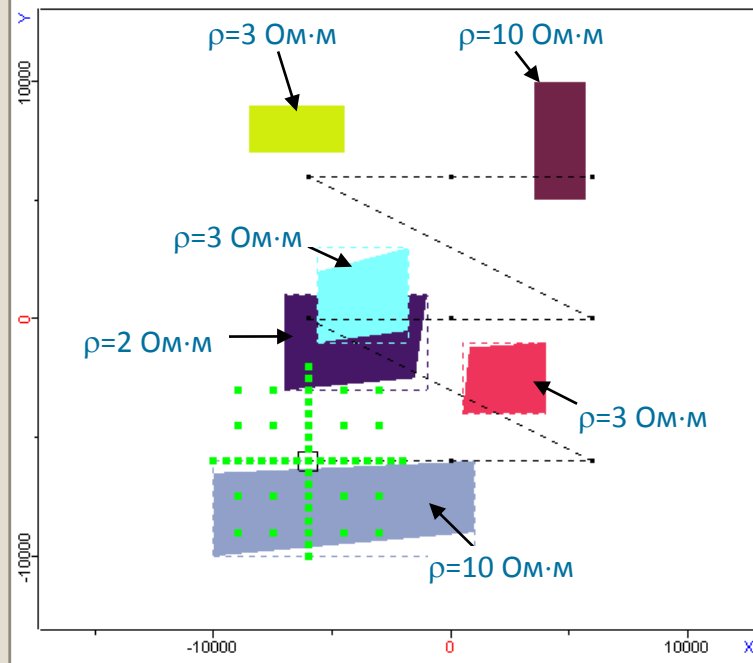
Этап 3а. Использование процедуры, основанной на борновской инверсии для "подсказок" пользователю при задании стартовой модели в полной нелинейной инверсии – определение мест "дефицита" и "избытка" проводимости



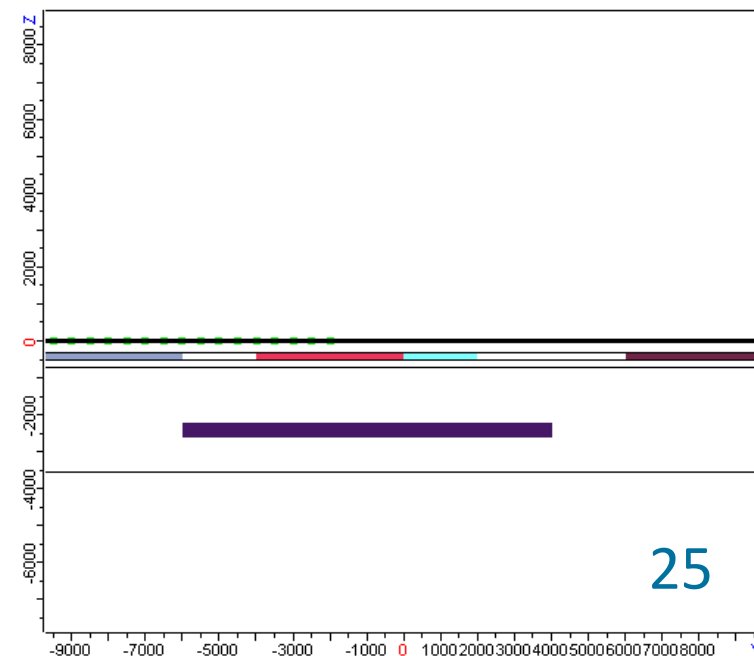
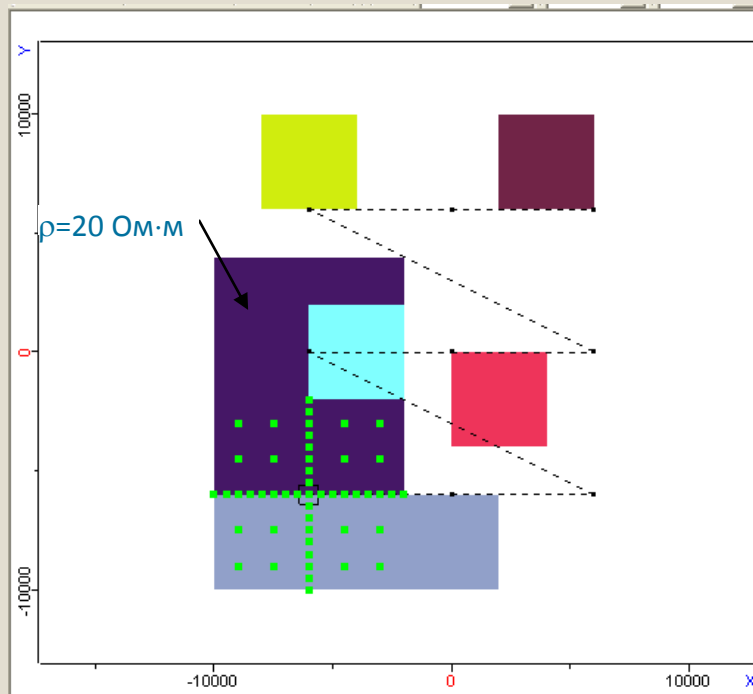
Восстановление избыточной проводимости при несовпадении положений истинного и аппроксимирующего его объектов: *a* – предварительное распределение удельного сопротивления в слое; *б* – удельное сопротивление, полученное в результате одного шага борновской инверсии со сглаживанием; *в* – распределение аномальной проводимости

Этап 3а. Использование процедуры, основанной на борновской инверсии для "подсказок" пользователю при задании стартовой модели в полной нелинейной инверсии – определение мест "дефицита" и "избытка" проводимости – ситуация, когда на предыдущем этапе место расположения неоднородности было определено неправильно.

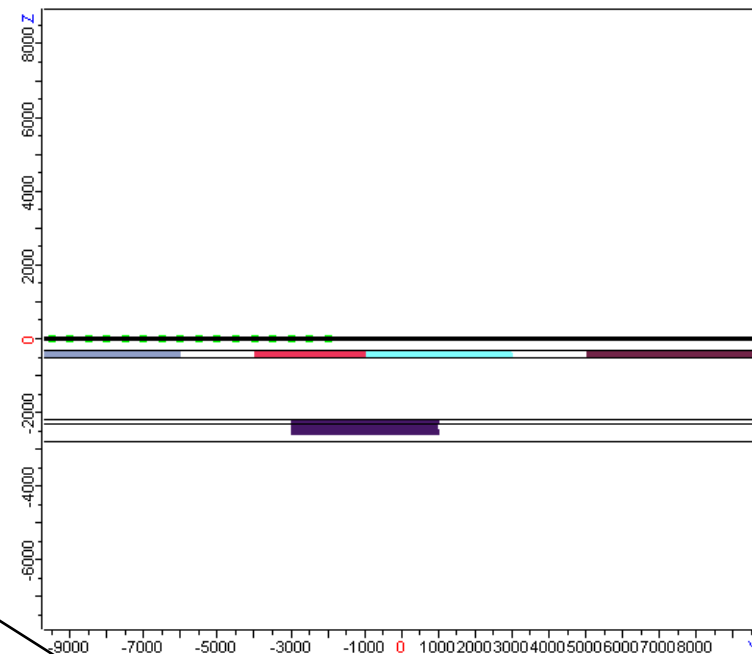
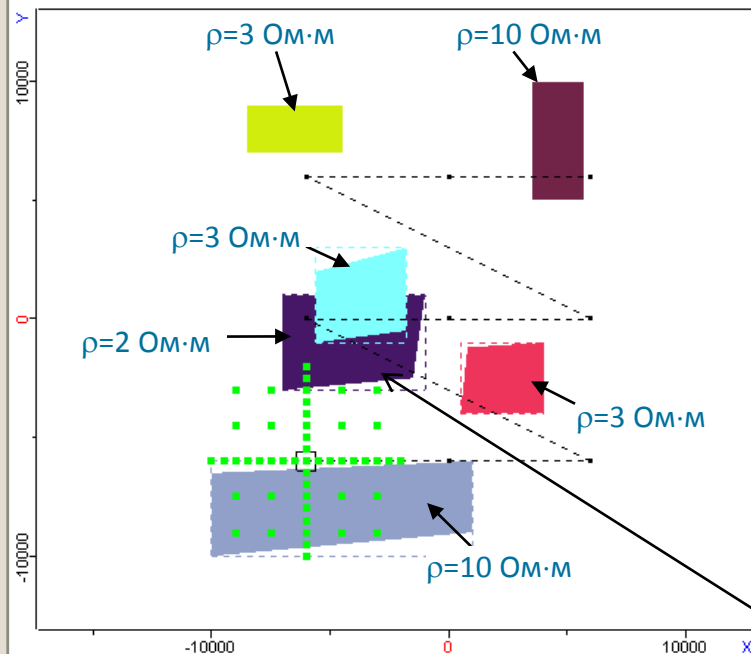
Истинная модель



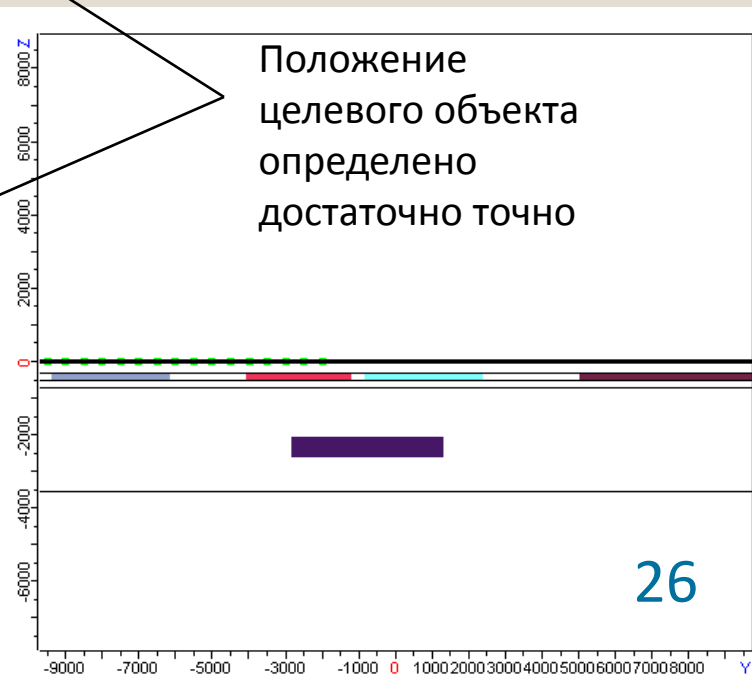
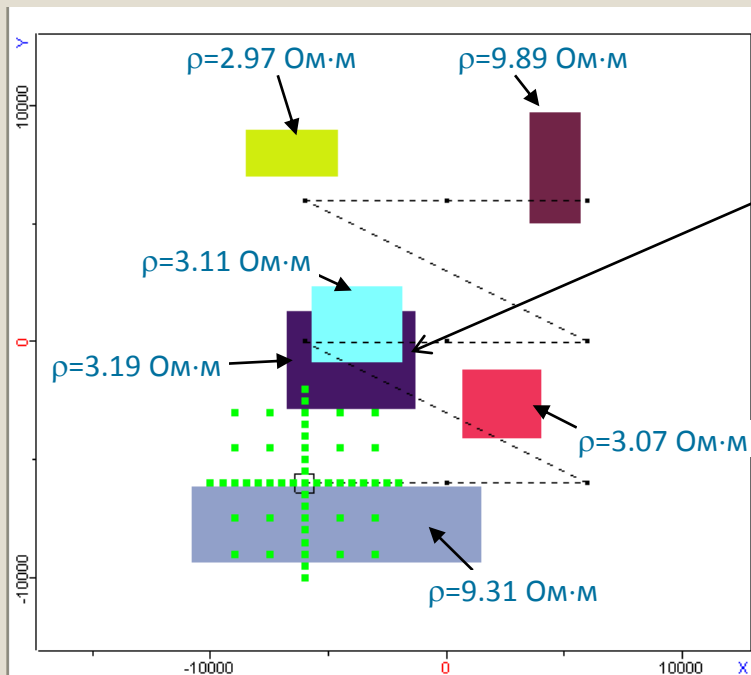
Этап. 4 Стартовая модель для нелинейной инверсии



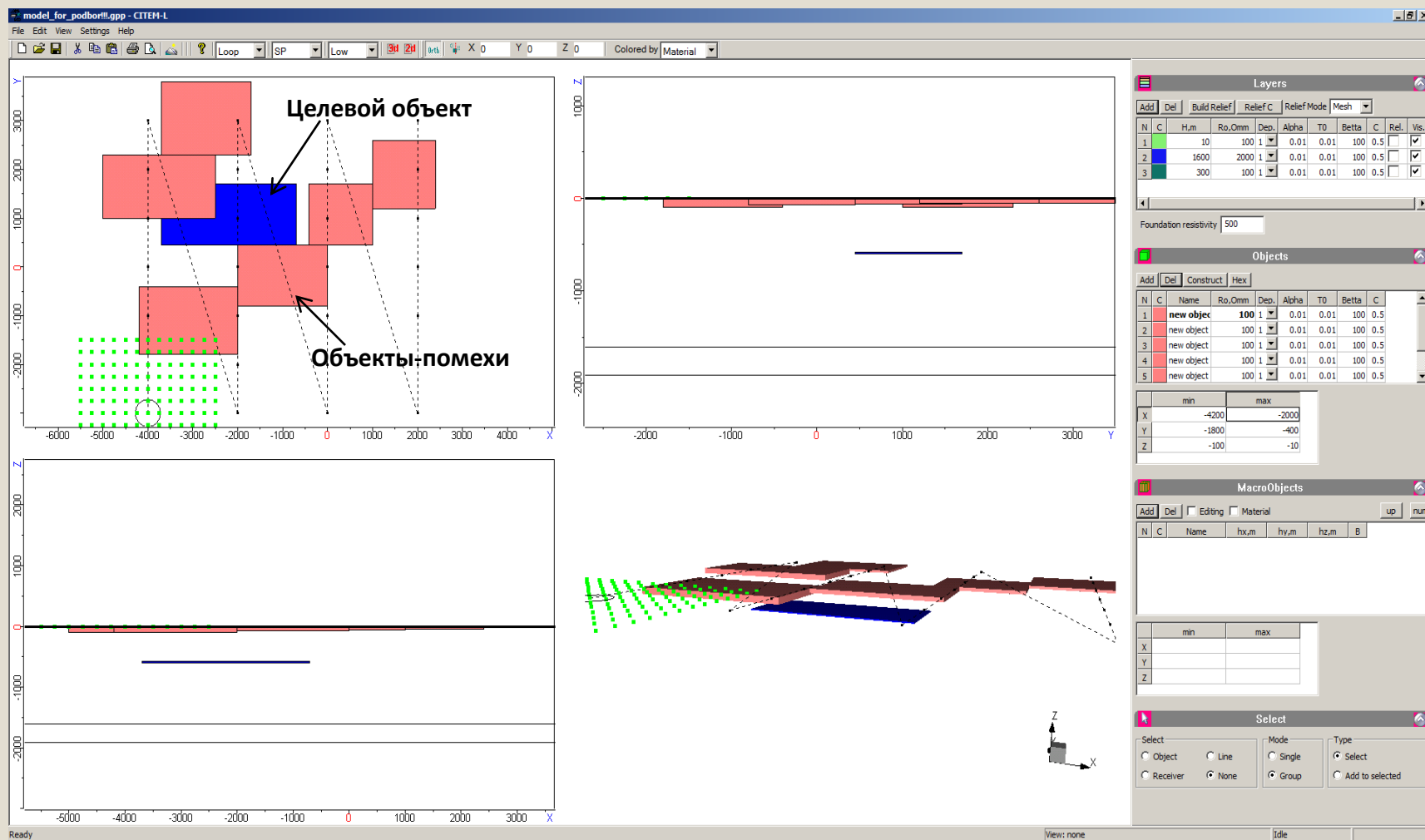
Истинная
модель



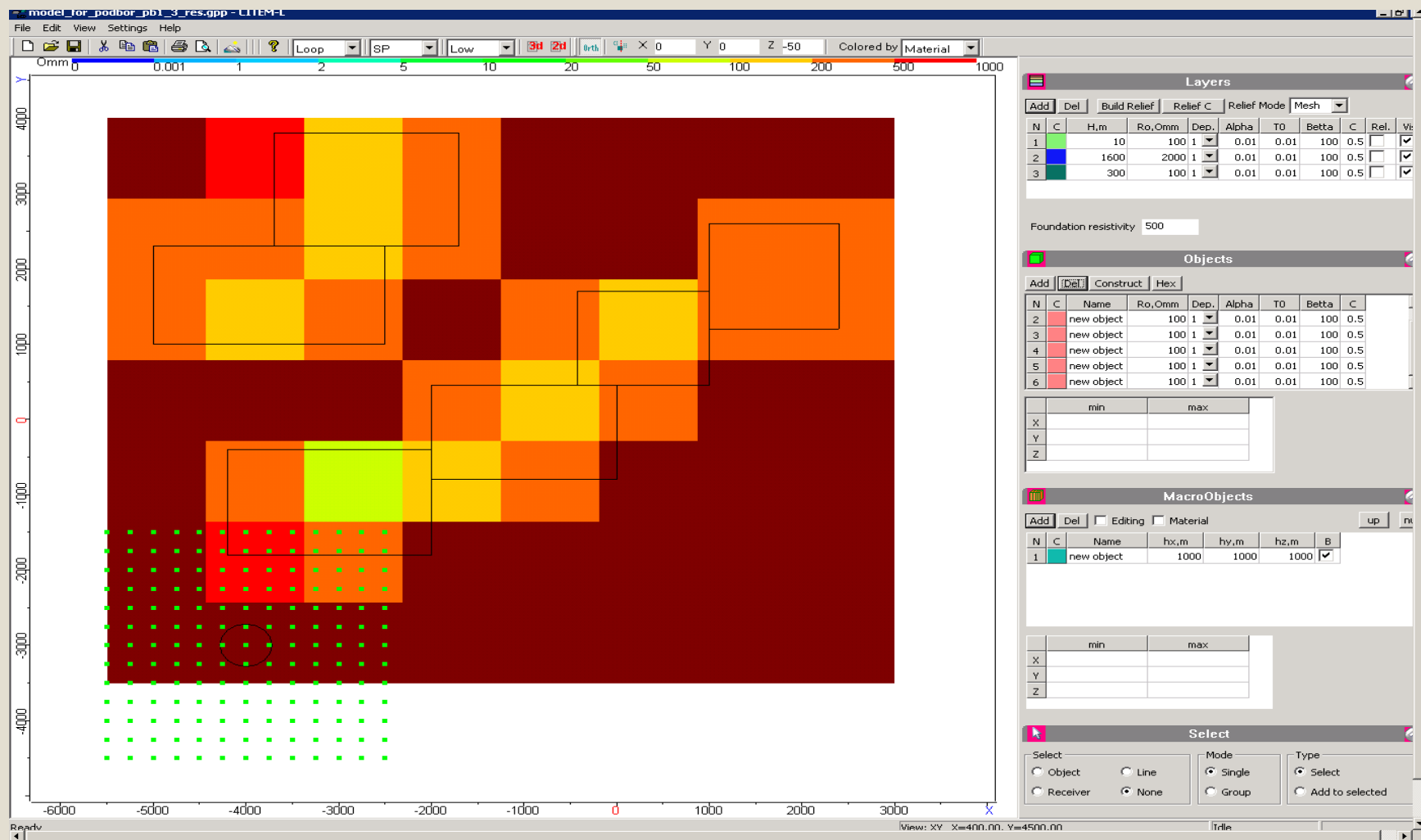
Этап. 4.
Итоговая
модель,
полученная в
результате 16
итераций
нелинейной
инверсии:
понижение
функционала
от
25.33 до 0.62



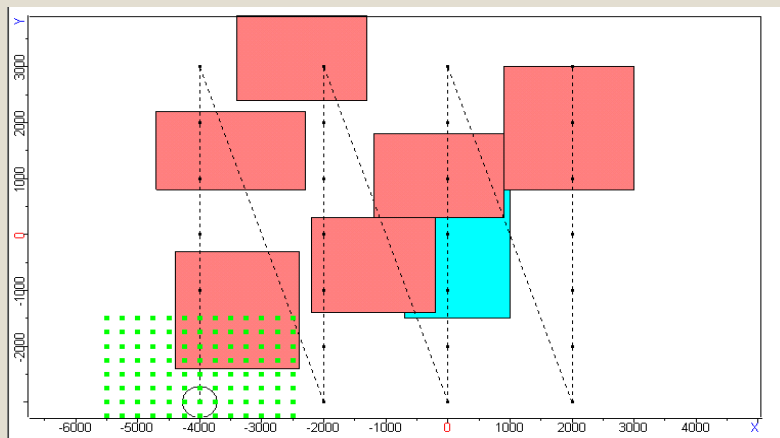
Положение
целевого объекта
определено
достаточно точно



Геоэлектрическая модель 2 для демонстрации этапов процедуры 3D-инверсии (задача поиска рудного объекта)



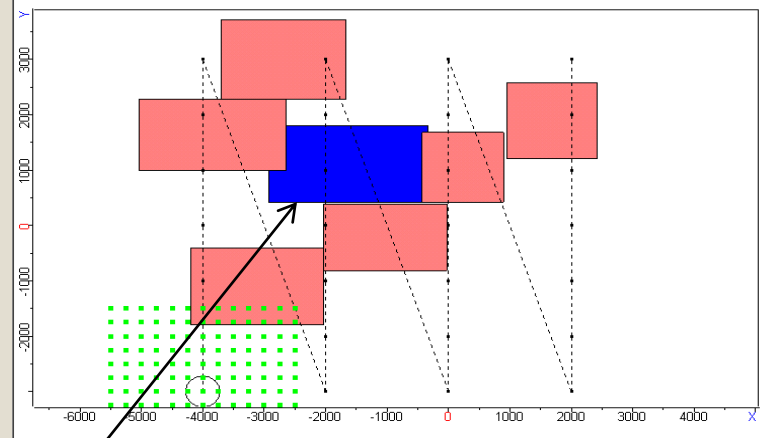
Результаты первого этапа 3D-инверсии в виде
распределения удельного электрического сопротивления в
верхней части разреза



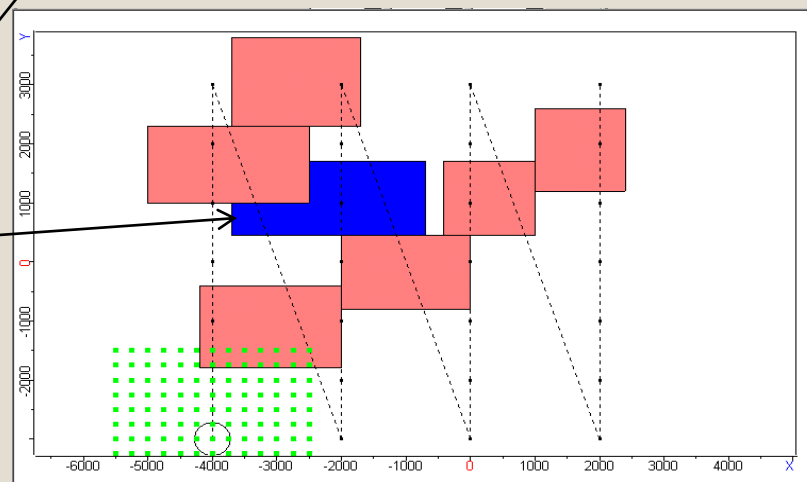
Стартовая модель

Пример, когда третий этап не выполнялся – положение глубинной аномалии в стартовой модели было задано произвольным.

Положение
целевого объекта
определено
достаточно точно



Модель, полученная в результате 3D-инверсии



Истинная модель

Результаты последнего этапа 3D-инверсии в виде
распределения удельного электрического сопротивления в
верхней части разреза.