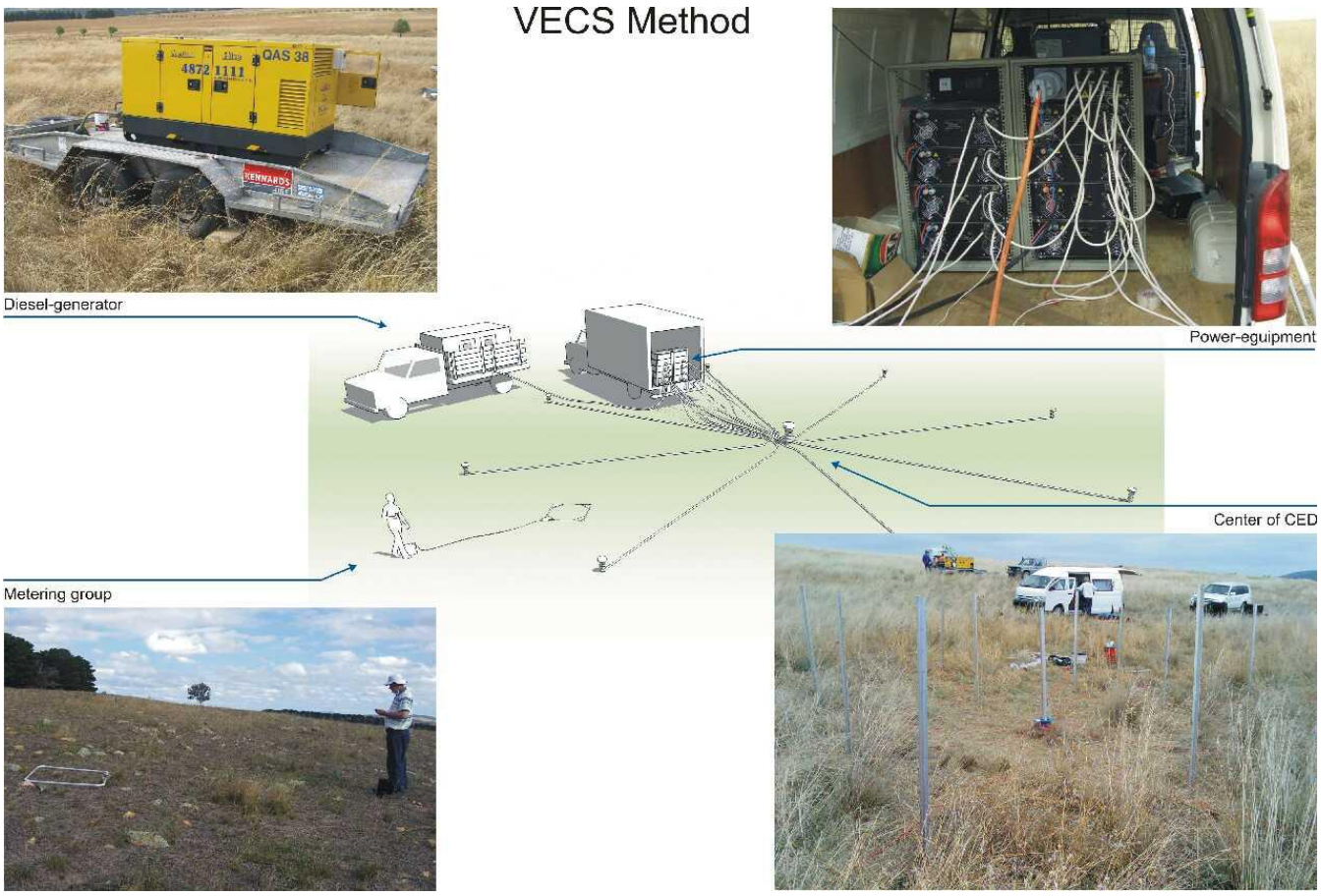
ZaVeT-GEO | ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТУРА
Научно - Техническая Компания

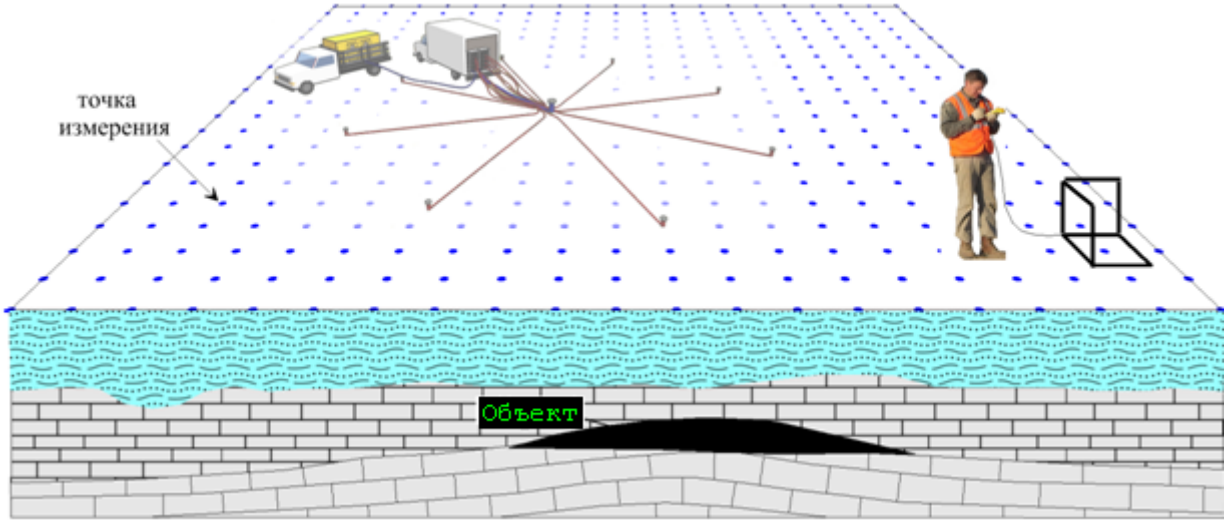
ТЕХНОЛОГИЯ ЗВТ СОЗДАНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЗЕМЛЕ И ИДЕАЛЬНО ПОДХОДИТ ДЛЯ ПОИСКА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.



Работа методом зондирования вертикальными токами (ЗВТ) в применении к рудным объектам имеет целый ряд особенностей и преимуществ :

- Принимаемые сигналы ($\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\varphi / \partial t$, $\partial B_r / \partial t$) определяются только трехмерными неоднородностями. На сигналы не оказывает никакого действия горизонтально-слоистая среда, являющаяся вмещающей для рудных месторождений.
- Неоднородности среды по сопротивлению проявляются в поле КЭД гораздо сильнее, чем при использовании горизонтальной линии или петли. Это позволяет выделять объекты и при слабой контрастности удельного сопротивления объекта по сравнению с вмещающей средой.

- Принимаемые сигналы ($\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\varphi / \partial t$, $\partial B_r / \partial t$) определяются неоднородностями, находящимися вблизи точки измерения, поскольку аномальное поле является и полным. В случае же применения горизонтальной линии или токовой петли сигналы определяются зачастую больше вмещающей средой и всеми 3D объектами, которые находятся между точкой измерения и источником поля. В этом суммарном сигнале локальную информацию трудно выделить. Нужны довольно-таки сложные процедуры обработки. А при обычном на первом этапе одномерном подходе к интерпретации, локальная информация будет и вовсе отфильтрована. В сигналах ЗВТ информация об 3D объектах хорошо разделяется не только во времени, но и в пространстве.
- Измеряемые сигналы от разных компонент электромагнитного поля хорошо дополняют друг друга и позволяют отбраковывать аномалии, выявленные в измерениях отдельных компонент а также существенно уменьшают область эквивалентных решений.
- ЗВТ осуществляет давнюю мечту электроразведчиков – разделить измеряемый сигнал на сигнал становления и сигнал поляризации. Разделение сигнала позволит нам изучать изменение удельного сопротивления среды и изменение поляризационных параметров среды. По измерениям магнитных компонент мы изучаем удельное сопротивления среды в том числе и локальные трехмерные включения. По измерениям электрических компонент мы изучаем поляризационные параметры среды, уже прекрасно представляя себе распределение удельного сопротивления среды.
- При работе методом ЗВТ имеет смысл сгущать сеть наблюдений до необходимой точности определения границ объекта. При работе с петлей или горизонтальной линией сгущение сети наблюдений безрезультатно, т.к. изменение сигнала связано в первую очередь с изменением отклика одномерной среды в зависимости от разноса. При проведении работ методом ЗВТ стандартной является методика со сгущением сети наблюдений в тех местах, где фиксируется сигнал от объектов. Таким образом, можно точнее определять границу объектов.
- Методика с КЭД позволяет оперативно реализовать плотную площадную систему наблюдений. Такие система наблюдений весьма устойчивы к искажениям сигнала на отдельных точках наблюдения. Соответственно, нет таких высоких требований, как в МПП, к точности фиксируемых сигналов ЗВТ и уровню помех. В сигналах ЗВТ от локальных объектов наблюдаются сильные изменения сигнала, вплоть до смены знака. В измерениях с помощью петли или горизонтальной линии геологические выводы часто делают в результате изменения сигнала на несколько %, что подразумевает гораздо более точные измерения переходного сигнала.
- Для метода ЗВТ проводящие экраны (водные пласты, глина, озера и т.д.) не являются осложняющими обстоятельствами.
- Имеет место и экономическая целесообразность. При работе с КЭД используется закрепленный источник, устанавливаемый единожды для покрытия всей изучаемой площади. Для создания плотной сети наблюдений в МПП требуется передвигать всю приемно-питающую установку.



Описание метода ЗВТ

Методом зондирования вертикальными токами (ЗВТ) называют такие геоэлектрические исследования, при проведении которых используется в качестве источника электромагнитного поля круговой электрический диполь. Конфигурация КЭД образуется несколькими радиально расположенными заземленными горизонтальными линиями (обычно 8), в которые одновременно подается импульсный ток одинаковой формы и амплитуды. Измерения проводятся по произвольной сети вокруг источника поля (при большом радиусе КЭД и внутри источника) с целью регистрации плотного площадного переходного сигнала (трехмерного куба данных).

Обычно с помощью компактного индуктивного датчика измеряется скорость магнитной индукции. В последнее время большой интерес вызывают также измерения электрического поля заземляемыми приемными линиями.

КЭД возбуждает в Земле переходной процесс поля ТМ-типа (в отличии от петли и горизонтальной линии, которые возбуждают либо чистый, либо преимущественно процесс ТЕ-типа). При возбуждении от КЭД на дневной поверхности горизонтально-слоистой среды отсутствует магнитное поле. Это свойство является наиболее важным для практического применения в электроразведке. Т.к. отклик от вмещающей среды отсутствует, то само наличие сигнала свидетельствует о наличии трехмерного нарушения вмещающей среды, а характеристики этого сигнала определяются свойствами объекта и вмещающей среды. Этот сигнал от рудного тела хорошо локализован, т.е. измеряемый сигнал в основном определяется объектами, находящимися под точкой измерения магнитного поля. Следствием этого является то, что в регистрируемом отклике значительно ослаблено влияние других неоднородностей находящихся между источником и приемником поля. Стоит заметить, что использование 1D подхода при интерпретации результатов измерения магнитных компонент поля бессмысленно, необходим только трехмерный подход. Впрочем, в силу характера отклика, связанного только с неоднородностью, площадные изображения сигналов ЗВТ обладают высокой визуализирующей способностью и имеют иногда очевидную ценность в глазах заказчика работ. Следующим интересным свойством поля КЭД является то, что локальные объекты-аномалии проводимости в сигнале от скорости вертикальной магнитной индукции (будем называть это компонентой $\partial B_z / \partial t$) и в компоненте $\partial B_\varphi / \partial t$ проявляются по-разному. В площадном представлении сигнала положение центра объекта совпадает с границей смены знака сигнала компоненты $\partial B_z / \partial t$. При этом, максимум сигнала компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ совпадает с центром трехмерного объекта. Т.е. центр локального объекта мы

хорошо определяем по сигналу $\partial B_z / \partial t$, а границы объекта хорошо определяются по сигналу $\partial B_\varphi / \partial t$. Большое подспорье состоит в измерении электрического градиента E_r. Компонента E_r является нормальной, т.е. является откликом одномерной вмещающей среды при работе с КЭД в качестве источника. Тем не менее, характер сигнала резко меняется при помещении в горизонтально-слоистую среду локального объекта. Обычно резкое изменение характера E_r совпадает с ближней к КЭД границей объекта.

Отметим еще одно важное свойство поля КЭД - в отличие от полей традиционных петли и горизонтальной линии – работа с КЭД предполагает плотную сеть наблюдений, она имеет смысл. При работе методом ЗВТ сигнал гораздо быстрее меняется при переходе от точки к точке, ведь сигнал характеризует в основном среду под точкой измерения, а не усредненную среду между источником поля и приемником.

Методика полевых работ

До начала измерений монтируется питающая установка – КЭД. Радиус источника соответствует глубине и площади исследований. При проведении большинства работ радиус определялся площадью изучаемого участка. Обычно качественные измерения проводятся на удалении до 5 радиусов КЭД, хотя в нашей практике встречались участки, на которых мы успешно проводили измерения и на удалении в 6-7 радиусов от центра КЭД. Подразумевается, что геометрия источника хорошо выдержана, а токи в лучах выровнены, причем, в импульсном режиме. Автоматическая система поддержания равных токов в линиях и есть специфическая аппаратура ЗВТ. В зависимости от поставленных задач каждая измерительная группа оснащается одним или несколькими измерительными компактными индукционными датчиками, одной или несколькими измерительными линиями и измерителями переходного сигнала. Все приемные элементы, как то датчики, измерительные линии, измерители переходного сигнала – это стандартные элементы, применяемые в методе переходных процессов (или в зондированиях становлением – ЗС). Каждая из групп со своим измерительным комплексом свободно перемещается по площади с использованием спутниковой пространственно-временной привязки к источнику поля. Таким образом, если принять за максимальное удаление стандартное удаление в 5 радиусов от центра источника КЭД, то при закрепленном источнике радиусом 0.5 км оперативно может быть исследована площадь в ~25 км^2.

В обрабатывающей программе измеренный сигнал компонент $\partial B_z / \partial t, \partial B_\varphi / \partial t$ нормируется на некоторую функцию расстояния от точки измерения до цента источника, а время трансформируется в глубину по формуле для скин-слоя. Такие построения позволяют прямо в полевом сигнале, практически без всякой обработки выявлять изучаемый 3D объект. Отображение объекта в площадном полевом сигнале компонент $\partial B_z / \partial t, \partial B_\varphi / \partial t$ несколько смещено в плане от реального объекта но, тем не менее, отлично визуализирует исследуемый объект.

Мы проводим и полноценную трехмерную интерпретацию сигналов используя прямые трехмерные задачи. Если объект сложный или слабоконтрастный, то, даже используя прямые задачи трехмерного моделирования, не всегда удается качественно подобрать локальное включение, имея только данные для одной компоненты. Поэтому для сложных объектов мы проводим измерения до 3-ех компонент электромагнитного поля - $\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\varphi / \partial t$, E_r. Такой набор данных при сопоставлении и по совокупности дает возможность точно выявлять и идентифицировать локальный объект проводимости по полевому материалу.

Численное трехмерное моделирование сигналов ЗВТ

Для иллюстрирования свойств сигналов ЗВТ приведем расчеты полей для модели среды, включающей проводящий объект в менее проводящем слоистом полупространстве. КЭД был задан с радиусом 500 метров и с суммарным током в 16 Ампер. Уровень сигналов, измеряемых в полевых условиях, превышает 1 мкВ, поэтому к рассмотрению принимались только сигналы свыше 1 мкВ. Расчеты проводились для 3-ех типов сигналов - $\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\varphi / \partial t$, E_r. В качестве поискового объекта был выбран параллелепипед с удельным сопротивлением 20 Ом*м, помещенный в полупространство с удельным сопротивлением 500 Ом*м. Размер объекта в плане 100 на 150 метров, глубина залегания кровли 100 м и мощность объекта 100 м. На рис.а приведено площадное распределение сигнала $\partial B_z / \partial t$ на времени 0.120 мс, нормированного на некоторую функцию расстояния до центра КЭД. Такое нормирование призвано компенсировать ослабление сигнала с расстоянием. Имеет место типичное разделение сигнала компоненты $\partial B_z / \partial t$ на 2-е симметричные части - положительную и отрицательную. Линия симметрии поля проходит через центр аномалии и центр КЭД.

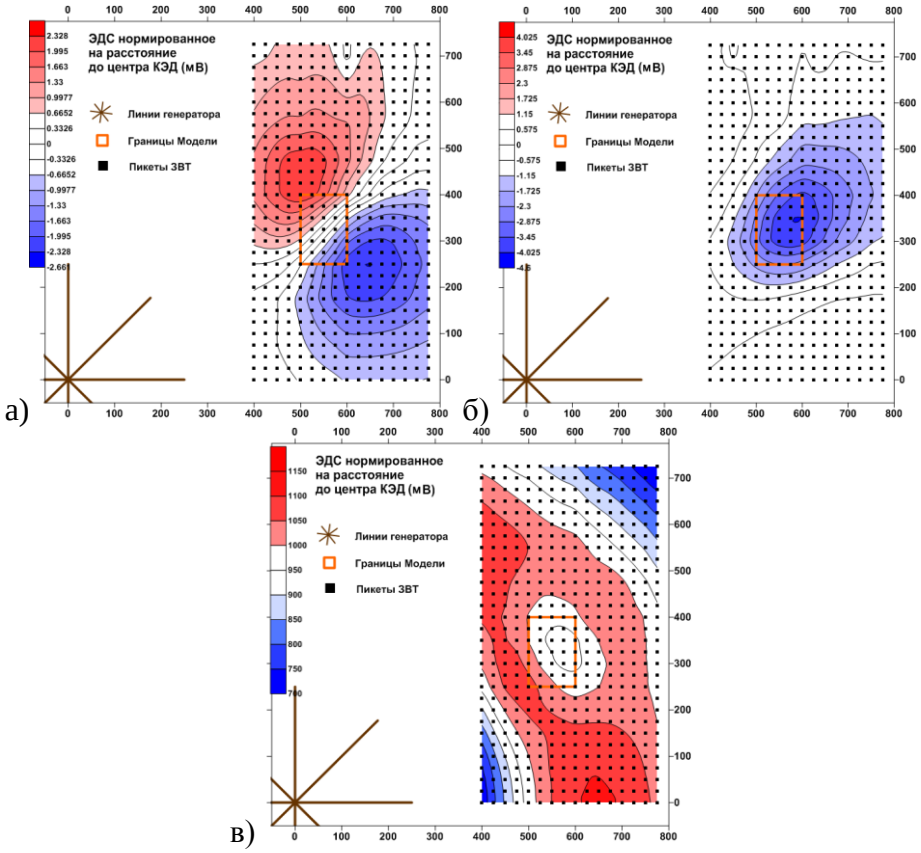


Рис. Площадное распределение сигналов ЗВТ время 0.12 мс. а - $\partial B_z / \partial t$,б - $\partial B_\varphi / \partial t$,в - E_r

На рис.б приведено площадное распределение (в изолиниях) сигнала $\partial B_\varphi / \partial t$ на времени 0.120 мс. В этом случае максимальное по амплитуде значение сигнала находится над аномалией. На разных временах максимумы сигналов смещаются, площадь сигналов превышающих минимальный уровень измерений, меняется, но на всех временах максимальное по амплитуде значение сигнала находится над аномалией.

Наконец, на рис.в приведено площадное распределение сигнала E_r, нормированное с учетом расстояния до центра КЭД. Одномерный подход при интерпретации данных E_r возможен и имеет смысл, но только в том случае, если у нас нет существенных аномалий проводимости. Рис.в иллюстрирует, что характер поля E_r над локальной неоднородностью меняется, изменение сигнала достигает 10 %. Таким образом, измерения электрической компоненты E_r можно использовать не только для 1D интерпретации, но и для дополнительной визуализации границ трехмерного объекта.

Аппаратура.

В настоящее время используется третье поколение аппаратуры для ЗВТ, которая состоит из зондирующей установки и набора измерителей.

Зондирующая установка «GTE-10S» формирует в круговом электрическом диполе стабилизированные импульсы тока заданной амплитуды и длительности с чередующейся полярностью. Имеет следующие характеристики:

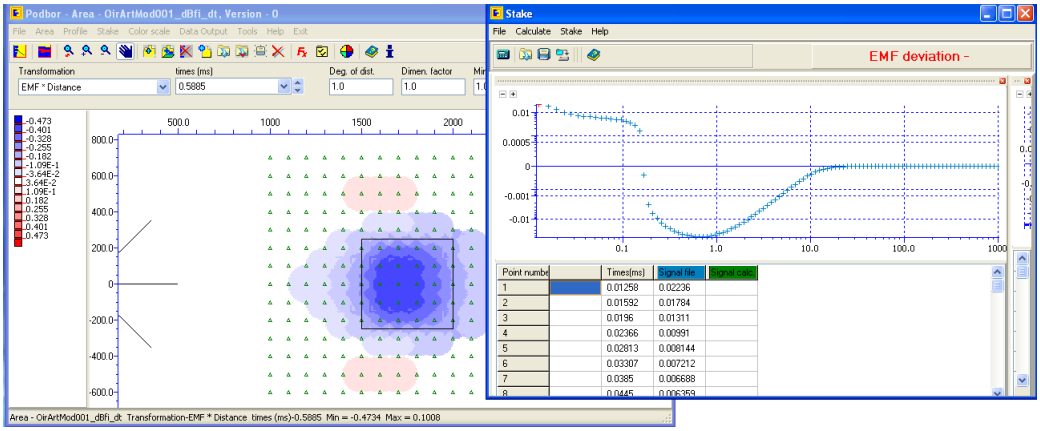
восемь каналов;

- выходное напряжение от 50 до 750 В (три диапазона 50-250В, 150-500В, 300-750В);
- диапазон выходного тока от 8 до 160 А;
- стабильность тока ±1%;
- максимальная входная мощность 80 кВт;
- питание от электрогенератора трехфазного переменного напряжения 380/220 В с изолированной нейтралью мощностью не менее 100 кВт;
- синхронизация от GPS;
- масса 300 кг, габаритные размеры – две стойки 550 × 500 × 940 мм;
- защита от перегрузки и перегрева;
- индикация и запись в файл напряжения питания, потребляемого тока и мощности по каждой фазе и суммарной мощности, выхода из режима стабилизации;
- непрерывный контроль сопротивления изоляции цепей питания.

Измеритель «CEI-7» отличается компактностью и высокой точностью измерений. Перед каждым циклом измерений выполняет тестовые калибровочные измерения позволяющие во первых определить работоспособность измерителя, во вторых компенсировать температурные и временные изменения переходной характеристики измерительного тракта. Каждый цикл измерений начинается с предварительного измерения, в котором определяются параметры входного сигнала. По предварительно измеренному входному сигналу управляющая программа выбирает оптимальные параметры измерения:

- коэффициент усиления буферного усилителя;
- выходной сигнал ЦАП для компенсации входного смещения;
- оптимальные коэффициенты передачи интегратора для всех интервалов интегрирования.

Программное обеспечение «Zavet 5.1» позволяет выполнять:
- обработку площадных материалов на всех временах измерения с учетом расстояния от точки измерения до центра источника;
- учет и обработку пикетов с измерениями выполненными от нескольких источников тока;
- фильтрацию и отбраковку сигналов искаженных электромагнитными помехами;
- процедуру 3-х мерного приближенного расчета и точный расчет неустановившегося электромагнитного поля для 3-х мерных объектов;
- возможность учета разности сигнала от идеального КЭД и сигнала от реального КЭД состоящего из конечного количества горизонтальных линий;
- вывод, сравнение, построение и визуализацию сигналов полученных на разных пикетах и при измерении различных компонент электромагнитного поля;
- возможность построить рассекающие профили по любым направлениям, что актуально для площадных работ с плотной сетью наблюдений;

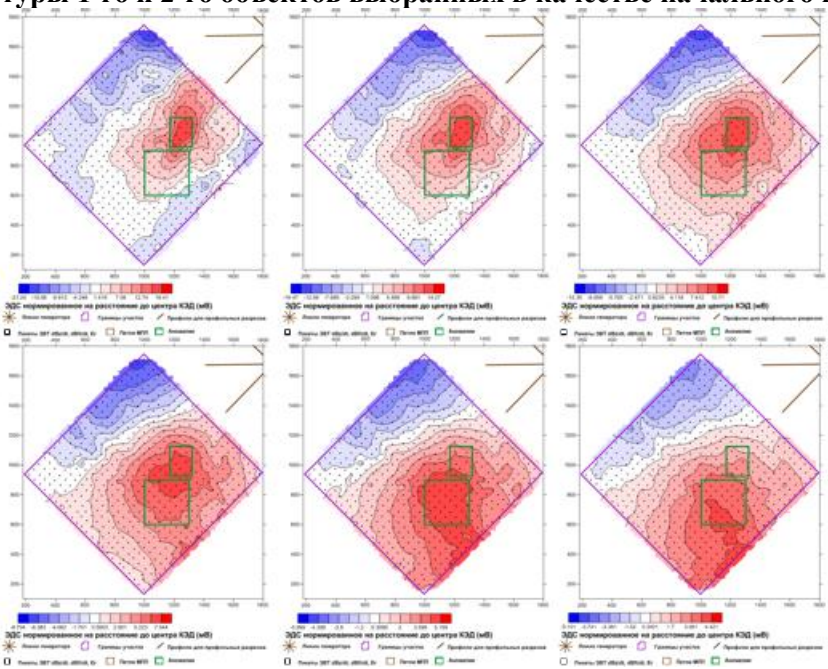


- расчет и подготовку куба данных, который в дальнейшем позволяет отображать информацию с помощью различных пакетов визуализации информации (Oasis montaj, Surfer);
- расчет сигнала в рамках горизонтально-слоистой среды для электрической компоненты поля.

Изучение объектов типа трубка методом ЗВТ около города Мирный (республика Саха-Якутия, Россия).

Работы проводились в рамах договора с НИГП АК «АЛРОСА» (ОАО). В рамках этих работ по плотной сети 50*50 м измерялись компоненты $\partial B_z / \partial t$, горизонтальная компонента $\partial B_\varphi / \partial t$, электрическая компонента E_r. В результате этих работ мы смогли локализовать трубку, которые являются слабоконтрастными объектами и практически не выделяются другими методами электроразведки.

Рис 1. Площадные (нормированные) измерения компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ с учетом поправки за рельеф местности. Времена 0.545 мс, 0.780 мс, 1.058 мс, 1.431 мс, 1.965 мс, 2.429 мс. Зеленым цветом на план нанесены контуры 1-го и 2-го объектов выбранных в качестве начального приближения.



Перед началом подбора формы геологической неоднородности мы выделили две зоны, где сигналы наибольшие. 1-ая зона максимальных сигналов выявляется на временах 0.545 мс, 0.780 мс, 1.058 мс и соответствует объекту находящемуся ближе к поверхности земли. 2-ая зона максимальных сигналов выявляется на временах 1.965 мс, 2.429 мс и соответствует объекту находящемуся глубже. Мы также учли, что при увеличении времени максимум сигнала будет не над центром объекта а несколько дальше от центра КЭД. Мы предположили, что сигнал на времени

1.431 мс соответствует промежуточному положению между зонами 1 и 2. В соответствии с этими зонами мы задали два объекта соответствующие 1-ой и 2-ой зонам. После проведения предварительных расчетов мы расположили 1–ый объект на глубинах от 10 до 60 метров, 2-ой объект расположили на глубине с 60 до 500 м. Объекты которые мы выделили вынесены на рис. 1.

На рис. 2 приведено распределение рассчитанного сигнала для подобранной модели объекта, компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ на различных временах. На рис. 2 выведены также планы объектов из которых состоит модель объекта. Голубой объект с глубины 10 м до 30 м, желтый с глубины 30 м до 60 м, красный с глубины 60 м до 140 м, синий с глубины 140 м до 500 м. Расчеты показали что мы имеем информацию о среде до глубины примерно в 300 м. Как мы видим в подобранной модели немного изменились глубины объектов, и изменилось расположение объекта. Тем не менее, начальное расположение объектов заданное по полевому материалу до подбора моделей, оказалось хорошим в качестве первоначального приближения.

Рис 2. Площадные (нормированные) результаты расчетов для подобранной модели компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ на временах 0.531 мс, 0.795 мс, 1.073 мс, 1.444 мс, 1.943 мс, 2.365 мс. Голубым цветом объект с глубины 10 м до 30 м, желтым цветом с глубины 30 м до 60 м, красным цветом с глубины 60 м до 140 м, синим цветом с глубины 140 м до 500 м.

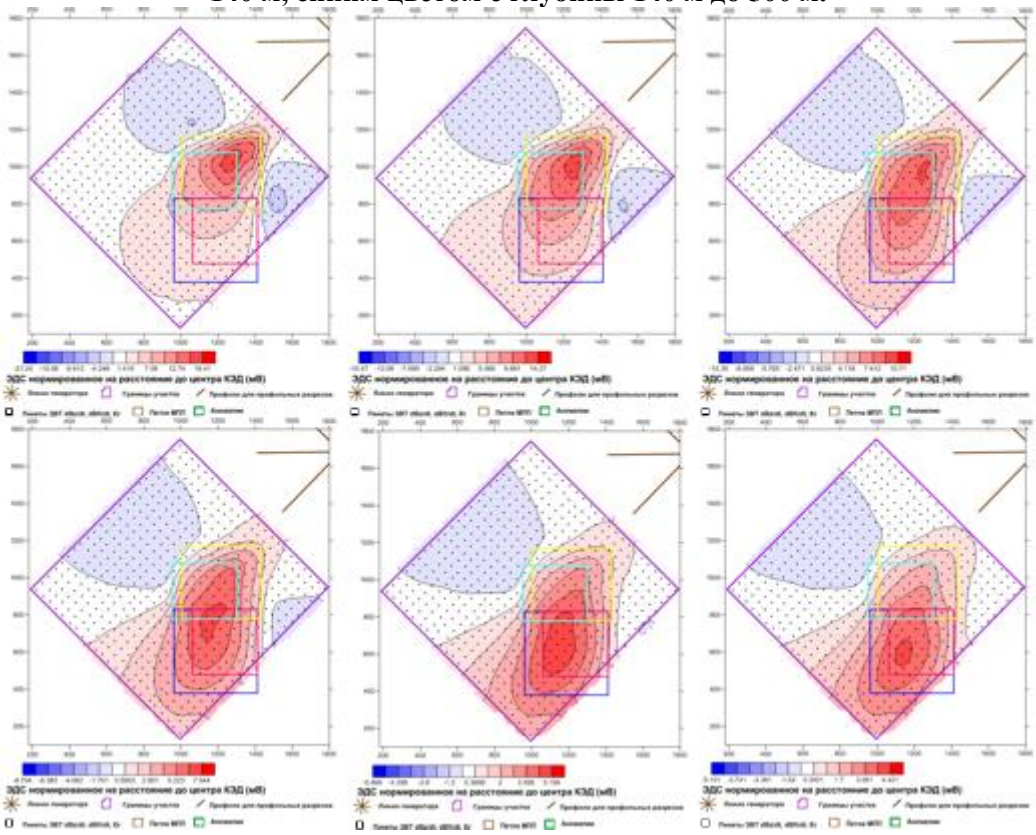


Рис 3. площадные (нормированные) измерения компоненты $\partial B_z / \partial t$ с учетом поправки за рельеф местности. Времена 0.545 мс, 0.780 мс, 1.058 мс, 1.431 мс, 1.965 мс, 2.429 мс.

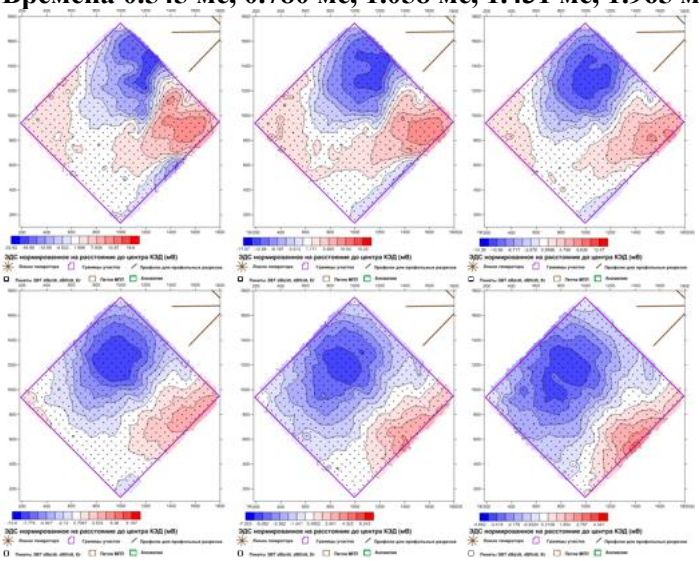
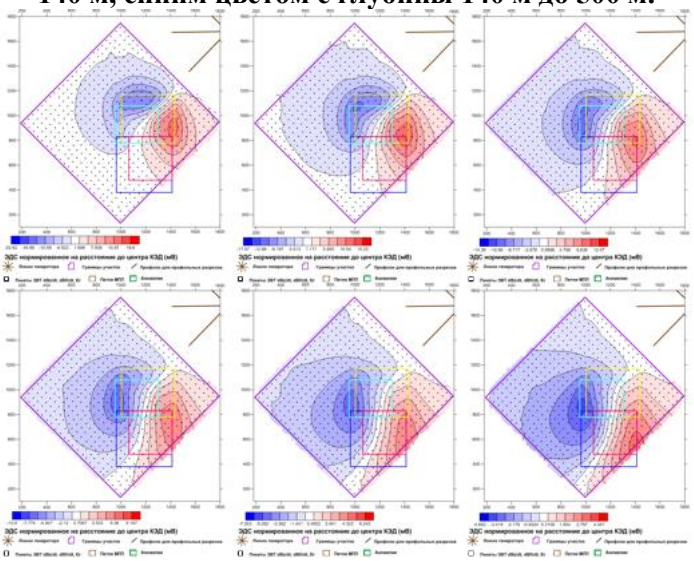


Рис 4. Площадные (нормированные) результаты расчетов для подобранной модели компоненты $\partial B_z / \partial t$ на временах 0.531 мс, 0.795 мс, 1.073 мс, 1.444 мс, 1.943 мс, 2.365 мс. Голубым цветом объект с глубины 10 м до 30 м, желтым цветом с глубины 30 м до 60 м, красным цветом с глубины 60 м до 140 м, синим цветом с глубины 140 м до 500 м.



Подобрав модель по компоненте $\partial B_\varphi / \partial t$ мы проверили результаты по компоненте $\partial B_z / \partial t$. На рис. 3 выведены площадные (нормированные) измерения компоненты $\partial B_z / \partial t$ с учетом поправки за рельеф местности. На рис. 4 выведены площадные (нормированные) результаты расчетов для подобранной модели компоненты $\partial B_z / \partial t$ на различных временах. Голубой объект с глубины 10 м до 30 м, желтый с глубины 30 м до 60 м, красный с глубины 60 м до 140 м, синий с глубины 140 м до 500 м. Никаких противоречий в наблюдаемых сигналах и результатах моделирования не обнаружилось. Сигналы компоненты $\partial B_z / \partial t$ полностью подтвердили наши выводы о соответствии подобранной модели полевым сигналам.

Условиями осложняющими данную работы были следующие :

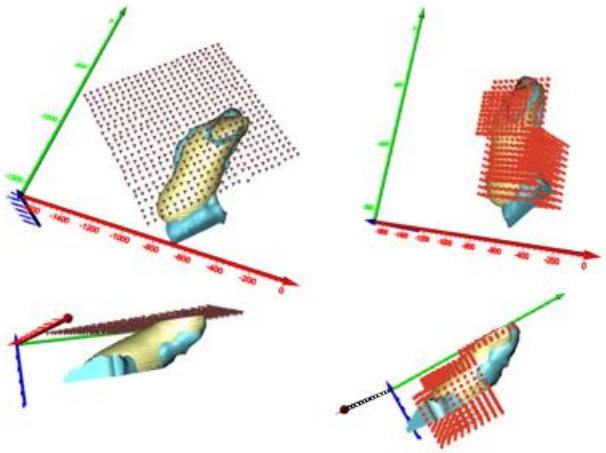
1) Слабая контрастность между удельным сопротивлением вмещающей среды и изучаемой трубки. По данным МПП удельное сопротивление вмещающей среды около 70 Ом*м, сопро-

тивление трубки около 40 Ом*м. В нашем сигнале трубка хорошо проявлялась. По результатам одномерной инверсии сигналов E_r мы определили удельное сопротивление вмещающей среды в 150 Ом*м, что более чем в 2 раза больше чем удельное сопротивление вмещающей среды по результатам МПП. Увеличение удельного сопротивления вмещающей среды в методе ЗВТ объясняется тем, что при работе с вертикальными токами существенную роль играет вертикальное удельное сопротивление, в то время как при работе с источником типа петля играет роль только горизонтальное сопротивление.

2) Наличие рельефа. На участке была возвышенность с поднятием в 40 м. Если учесть, что объект начинается с глубин в 10 м, то это обстоятельство существенно могло осложнить картину. Нам удалось учесть влияние рельефа. На рис 1. приведены полевые сигналы с учетом влияния рельефа.

На рис 5. Приведена трехмерная визуализация сигнала $\partial B_\varphi / \partial t$ полевого и полученного в результате расчетов для подобранной модели. Полевой сигнал $\partial B_\varphi / \partial t$ с учетом поправки за рельеф местности представлен голубым цветом, сигнал $\partial B_\varphi / \partial t$ рассчитанный для подобранной модели отрисован желтым цветом, подобранная модель набрана из оранжевых точек.

Рис 5. Трехмерная визуализация сигнала $\partial B_\varphi / \partial t$ полевого и полученного в результате расчетов для подобранной модели. Полевой сигнал $\partial B_\varphi / \partial t$ с учетом поправки за рельеф местности представлен голубым цветом, сигнал $\partial B_\varphi / \partial t$ рассчитанный для подобранной модели отрисован желтым цветом, подобранная модель набрана из оранжевых точек.



Выводы.

1) По компонентам $\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\varphi / \partial t$ нам удалось выделить два объекта, которые находятся в непосредственной близости друг от друга (расстояние между центрами около 300 м) и даже частично перекрывают друг друга.

2) Мы провели полноценную трехмерную инверсию с использованием прямых задач трехмерного моделирования.

3) Несмотря на слабый контраст в удельном сопротивлении вмещающей среды и исследуемого объекта, что не позволяет качественно выделять объект при проведении работ с классическими источниками. При работе методом ЗВТ объект хорошо проявился, в том числе и благодаря большей контрастности вертикального удельного сопротивления между объектом и вмещающей средой.

Изучение литиевых пегматитов методом ЗВТ в Западной Финляндии.

Перед геофизическими методами была поставлена задача изучения морфологии пегматитовой жилы, в которой находится литиевая руда со средним содержанием LiO2 около 1%. Объект исследования имеет субвертикальное падение, длину несколько сотен метров и ширину от 20 до 70 метров. Мощность перекрывающих пород не превышает 10 м. Для проведения работ фирмой "ЗаВеТ-ГЕО" был выбран относительно новый метод электроразведки – зондирования вертикальными токами (ЗВТ).

Основными преимуществами ЗВТ в применении к данным работам являются:

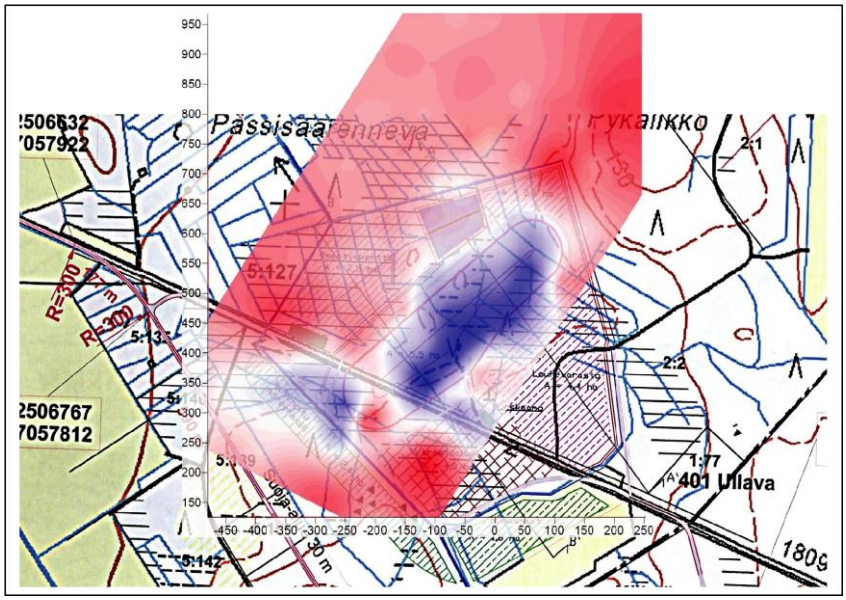
- возможность быстро выявить все локальные неоднородности удельного сопротивления среды. Положение искомого объекта проявляется уже при просмотре полевых данных, до подробного анализа и длительной интерпретации в офисе;
- экономическая целесообразность. Для проведения работ потребовалось установить только один источник электромагнитного поля;
- устойчивость к электромагнитным помехам на отдельных точках наблюдения;
- относительная неприхотливость метода ЗВТ к точности измеряемых сигналов. Это обстоятельство оказалось полезным, так как по центру площади работ проходила дорога, а вдоль нее линия электропередач. Уровень электромагнитных помех от линии электропередачи на профилях, которые были расположены около дороги, достигал 200 мкВ.

В качестве источника электромагнитного тока был использован круговой электрический диполь (КЭД) состоящий из 8 заземленных горизонтальных линий. Радиус КЭД составил 200 м, ток во всех 8-ми линиях был одинаков, за этим в автоматическом режиме следил генератор «GTE-10S». Суммарный ток в КЭД был равен 4,48 А. Измерения проводились «CEI-7» с использованием датчика ПДИ-100 (эквивалент измерительной петли 100х100 м). Электроразведочные работы были выполнены на участке размерами 0,5х1 км, в пределах которого проведено 81 измерение $\partial B_z / \partial t$ компоненты электромагнитного поля.

На рисунке показано площадное распределение ЭДС в месте проведения работ. Красным цветом отображен положительный сигнал, синим цветом отрицательный сигнал. В том месте, где сигнал нулевой (в этом месте при движении по профилю происходит смена знака измеряемого сигнала) расположен центр изучаемого объекта.

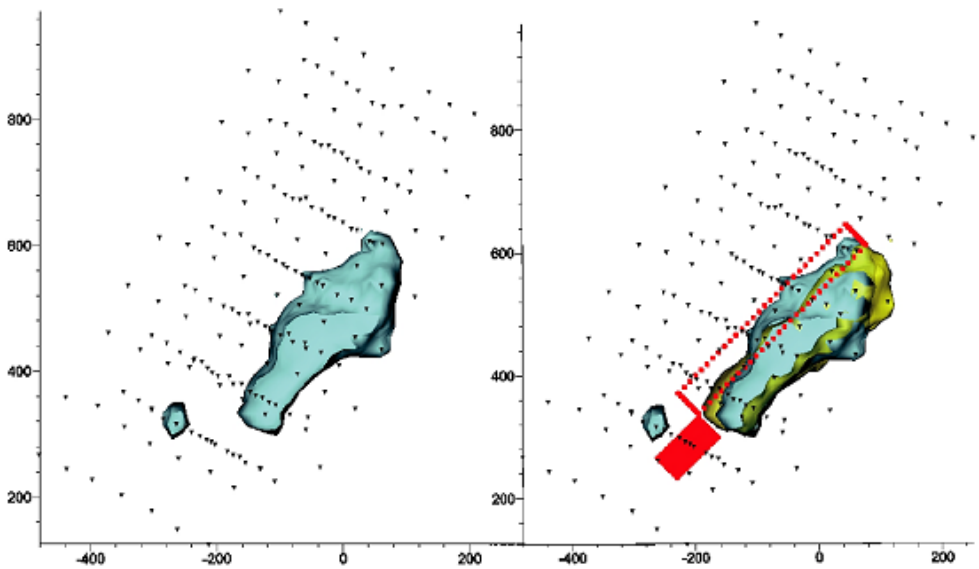
Для определения морфологии границ пегматитовой жилы было выполненное 3D моделирование, которое позволило уточнить границы, объем и местоположение изучаемого объекта (рисунок). Согласно полученным данным, удельное сопротивление изучаемого объекта около 15 Ом·м. Вмещающая среда характеризуется высоким сопротивлением (>1000 Ом·м).

Площадное распределение $\partial B_z / \partial t$ компоненты на времени 21 мкс



Объемное изображение изоповерхности величины сигнала $\partial B_z / \partial t$

измеренное поле $\partial B_z / \partial t$ подобранное поле $\partial B_z / \partial t$



На левом рисунке изображен сигнал полученный в поле. На правом рисунке совмещены полевой сигнал, сигнал полученный при 3D моделировании и контур модели. Голубая изоповерхность – полевой сигнал. Желтая изоповерхность – сигнал от модели по результатам расчета. Красным пунктиром обозначены контуры модели. Центр КЭД находится в точке с координатами 0, 0

Работы в Австралии.

Весной 2008 года были проведены работы в Австралии. По заказу фирмы Tri Origin Minerals Ltd мы исследовали распространение медно-цинковой залежи в районе старого рудника Woodlawn. Нам была указана желаемая область около 6 км^2 (прямоугольник со сторонами 2 и 3 км), и не представлены какие-либо геологические данные, кроме некоторых неутешительных сведений (плохие условия для заземлений токовых линий, выходы базальта на поверхность).

Радиус КЭД составлял 450 м. Суммарный ток составил 19.2 А. Использовались приемные датчики с эффективной площадью 800 м^2. Были проведены измерения переходного процесса компоненты $\partial B_z / \partial t$ на 223 точках. Эти переходные процессы отражают влияние неоднородности электрической проводимости среды.

На рис. а представлен нормированный площадной сигнал ЗВТ на времени 0.34 мс. Как его трактовать? Это электромагнитный образ среды, отражающий реальное распределение проводимости и значит, реальную структуру геологической среды. В данном случае мы отчетливо видим неоднородность среды и геолог, имея также другие данные, получит весьма существенную помощь в построении уже геологической модели.

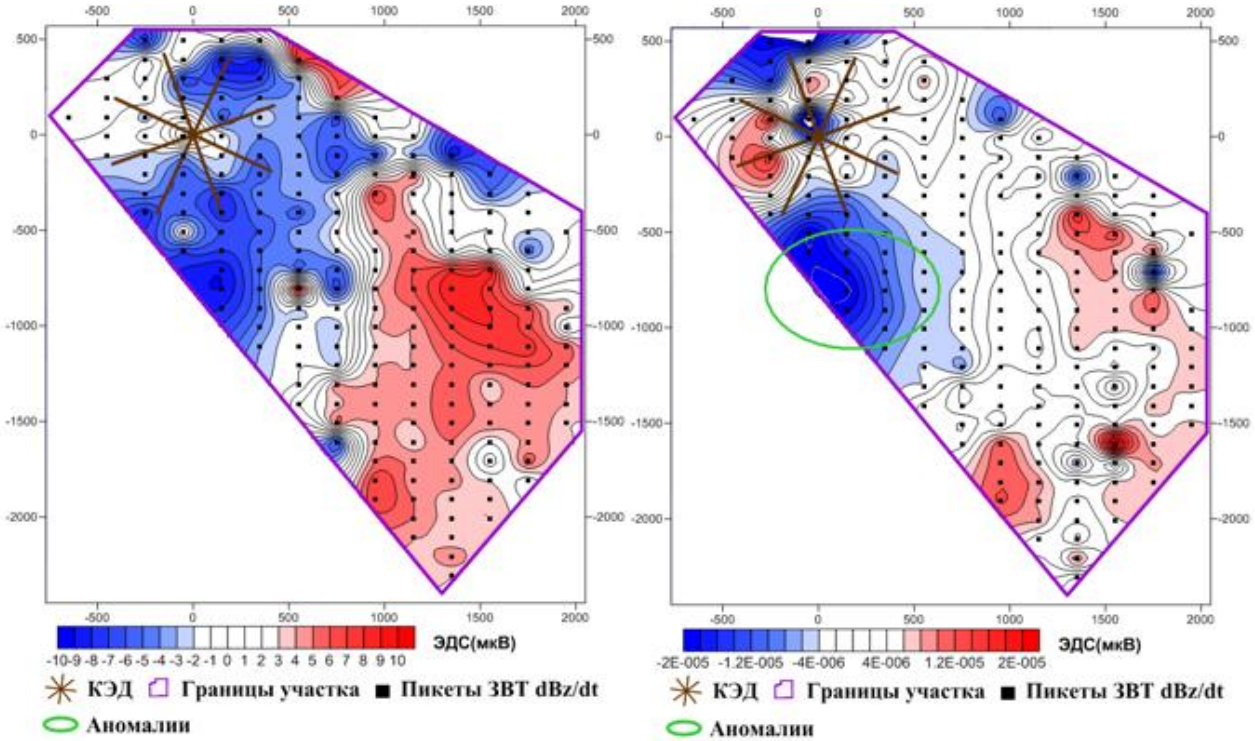
На каждом времени мы можем построить такую «картинку» и она будет соотноситься с определенной глубиной. На рис.б представлен площадной сигнал на времени 1 мс. Площадное представление интересно также тем, что видна кольцевая структура в западной части участка в области отрицательных сигналов.

Ниже представлена трехмерная визуализация наших данных. Для ее построения мы создали

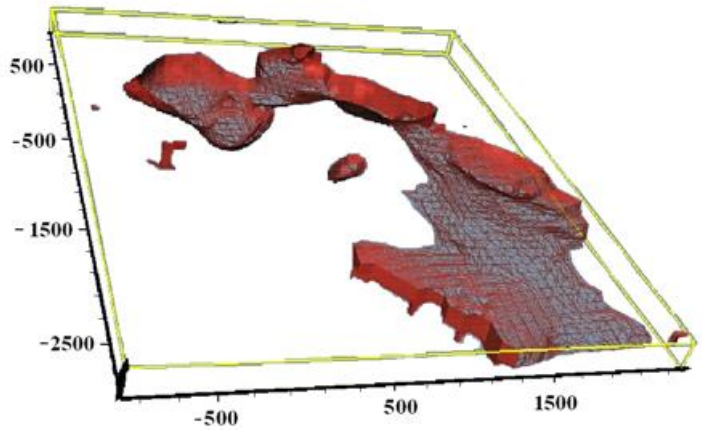
на основе измерений компоненты $\partial B_z / \partial t$ трехмерный куб данных. В глубины трансформиро-

валось время с использованием известной формулы для скин-слоя. Это представление данных обладает хорошей визуализирующей способностью. Фактически прямо в поле мы выявляем трехмерную структуру, характеризующую изучаемый нами участок. Мы понимаем, что на рисунках представлен кажущийся трехмерный объект, а реальный рудный объект несколько смещен и отличается от этого электромагнитного образа, поэтому в более поздних работах мы стали изучать дополнительные компоненты электромагнитного поля и применять 3D интерпретацию.

Площадной (нормированный) сигнал ЗВТ $\partial B_z / \partial t$ компоненты а) -на времени 0.34 мс б) - на времени 1.0 мс



Объемное изображение изоповерхности величины сигнала $\partial B_z / \partial t$



Работы на Камчатке.

В ноябре 2008 года были проведены работы на Камчатке. Изучаемым объектом являлось рудное тело (никель), залегающее на небольшой глубине (первые десятки метров) и обладающее повышенной проводимостью (первые десятки Ом*м). Вмещающая среда – повышенного сопротивления (от 100 Ом*м). Радиус КЭД был 500 м (длина каждой линии). Общий ток в КЭД составил 1,6 А. Мы использовали индукционные датчики ПДИ-100 (эффективная площадь 10000 м^2). Площадь работ составила около 0,5 км^2 (прямоугольник со сторонами 600 и 900 м). Было проведено 207 измерений компоненты $\partial B_z / \partial t$. Можно заметить, что измерения были проведены на площади, меньшей площади самого КЭД, что нельзя считать рациональным. Можно было бы использовать КЭД значительно меньших размеров. Та трудность, что ток по условиям заземления составлял только 0.2 А в луч, могла быть компенсирована (при меньшем КЭД) более близким, вследствие меньшего радиуса, расположением источника.

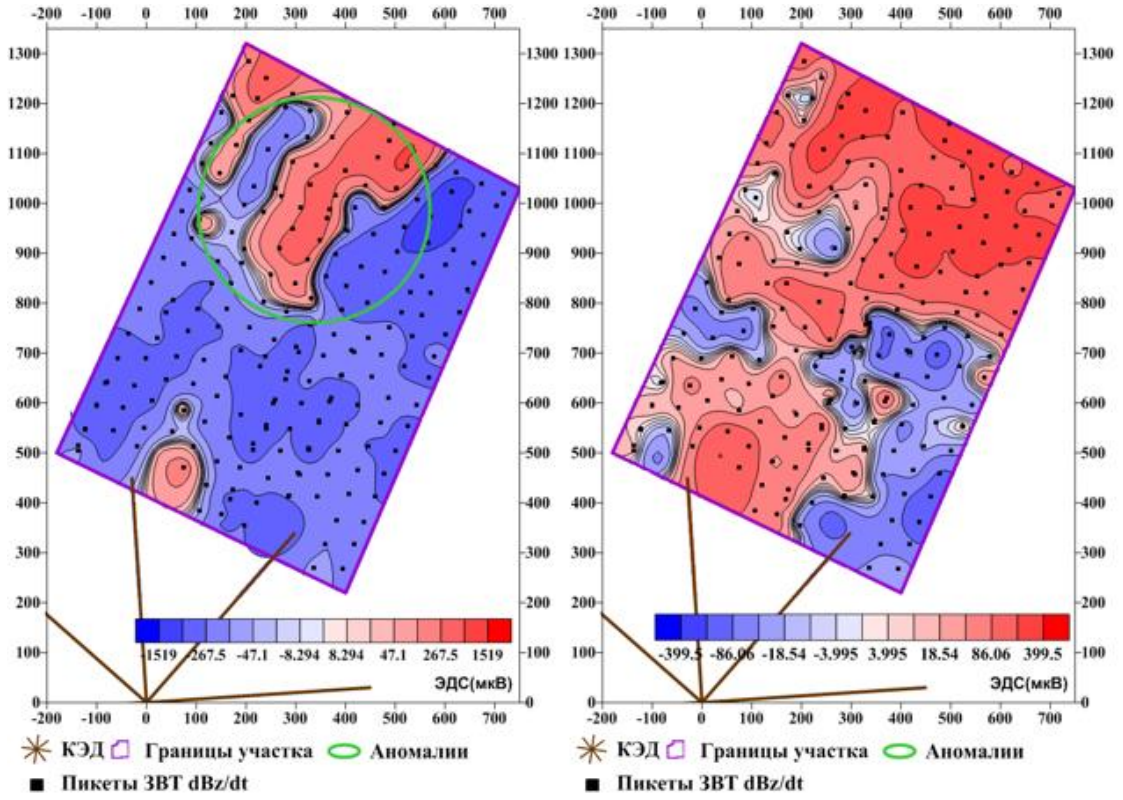
Интересующий нас сигнал от объекта начинает себя проявлять с 50 мкс. Информативный диапазон времен можно определить от 50 мкс до 500 мкс. На рис. отображены площадные нормированные сигналы ЗВТ на времени 65 и 145 мкс. В северной части участка отмечена аномальная зона. Столь ранние (по меркам МПП) времена действительны из-за значительного сопротивления вмещающих пород и по причине малой глубины залегания объекта.

На приведенных временных срезах хорошо видно, что площадной сигнал ЗВТ, свободный от фона вмещающей среды, обладает высокой визуализирующей способностью. Обработка данных заключается в просмотре материала, отбраковке пикетов и дублей, сглаживании, определении информативного диапазона времен, площадного выравнивания (компенсация дистанционного затухания), формирования площадных данных для отдельных времен (временных срезов) и формирование трехмерного куба данных.

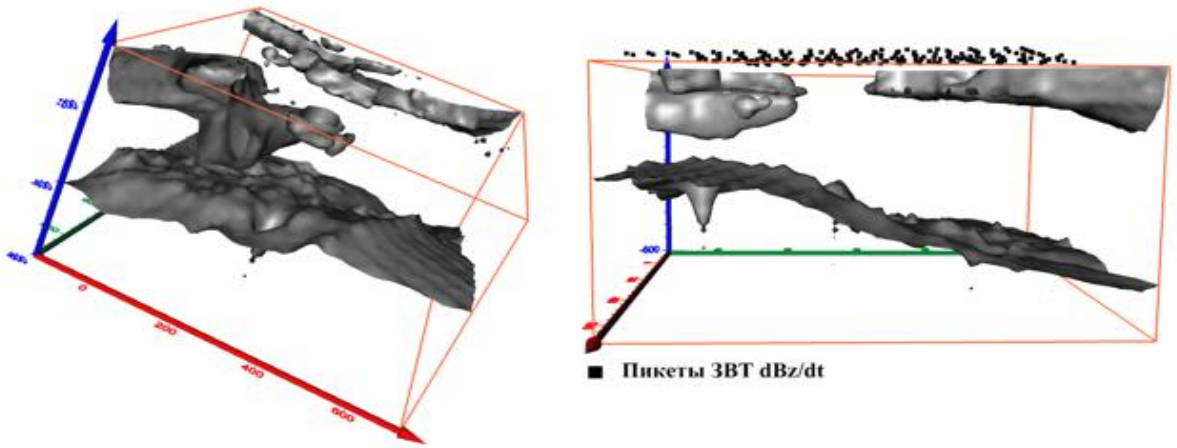
Мы отмечаем объект повышенной проводимости, расположенный на небольшой глубине (почти от поверхности). Что касается контура объекта, то вопрос этот чуть сложнее. Математическое моделирования для тел простых форм и отличающихся от вмещающих пород только по сопротивлению, показывает, что локальный объект создает двуполярный сигнал компоненты $\partial B_z / \partial t$, и линия смены знака привязана к середине локального объекта. Такая ситуация возникает в рудных работах. Так что, согласно рисунку, объект может быть распространен в область сигналов другого знака.

На рис. представлена также трехмерная визуализация, основанная на трехмерном кубе данных компоненты $\partial B_z / \partial t$. Видно, что помимо нашего целевого объекта наблюдается, еще наклонный более глубокий проводящий горизонт.

Площадное распределение нормированной ЭДС (компонента $\partial B_z / \partial t$ а) на времени 65 мкс. б)- время 145 мкс



Объемное изображение изоповерхности величины сигнала $\partial B_z / \partial t$



Работы по изучению кимберлитовых трубок вблизи поселка Айхал (республика Саха-Якутия, Россия).

Работы проводились в рамах договора с НИГП АК «АЛРОСА» (ОАО) в Якутии на кимберлитовые трубки. Эти работы включали измерения по плотной сети наблюдений компонент $\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\varphi / \partial t$. Кроме того, мы дополнили работу двумя профилями измерений компоненты E_r. В результате этих работ мы смогли локализовать трубки, которые являются слабоконтрастными объектами и практически не выделяются другими методами электроразведки. По результатам измерений компонент $\partial B_z / \partial t$, и $\partial B_\varphi / \partial t$ было выявлено по 3 аномалии, но только 2 из 4-ех аномалий были выявлены по обеим компонентам, остальные две выявлялись только по измерениям одной компоненты и были отбракованы. Эти две аномалии были подтверждены и измерениями сигналов E_r. Таким образом, информация по измерениям каждой новой компоненты отбраковывала некоторые аномалии и дополняла исследования важной информацией.

Радиус КЭД был 350 м. Общий ток в КЭД составил 8 А. Мы использовали индукционные датчики ПДИ-175 (эф. площадь 30000 м^2). Площадь работ составила около 1,3 км^2 (прямо-

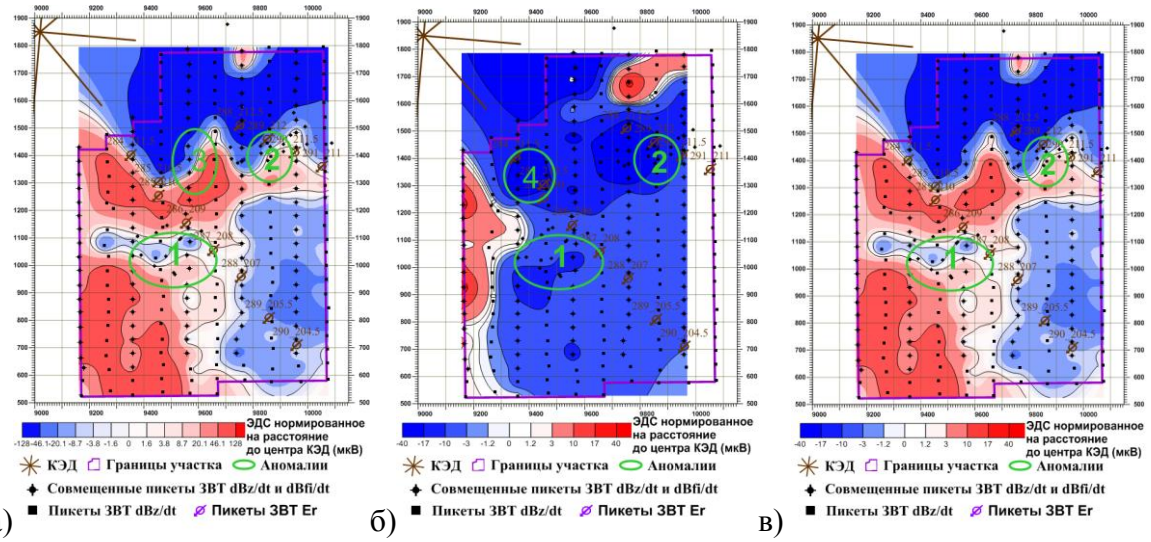


Рис.1 а - измерения $\partial B_z / \partial t$ на времени 93 мкс, и три выделенные аномалии. б - измерения сигнала $\partial B_\varphi / \partial t$ на времени 75 мкс и три выделенные аномалии. в- площадной сигнал ЗВТ ($\partial B_z / \partial t$) на времени 93 мкс, и две аномалии, подтвержденные по всем 3-ем компонентам

угольник со сторонами 1300 и 1000 м). Было проведено 238 измерений компоненты $\partial B_z / \partial t$, 105 измерений компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$, 12 измерений компоненты E_r а также 4 пикета МПП с использованием генераторной петли 100х100м.

При обработке данных материалов мы сначала выделили аномалии по компонентам $\partial B_z / \partial t$ (сеть наблюдений 100х50м) и $\partial B_\varphi / \partial t$ (сеть 200х50м). Далее мы сопоставили аномалии, полученные по разным компонентам, и оставили только аномалии проявляемые в обоих компонентах. И наконец, мы проверили границы аномалий по точкам измерения E_r.

Т.к. линия перехода из положительной области сигнала $\partial B_z / \partial t$ в отрицательную проходит через центр 3D объекта, то мы выделили области смены знака, за исключением перехода через ноль по линии северо-запад – юго-восток (эта смена знака сигнала связана с поднятием рельефа). На рис.а отражены результаты измерений сигнала ($\partial B_z / \partial t$) на времени 93 мкс. Отчетливо выделяются 3 аномалии, центры которых совпадают с локальными переходами сигнала через 0. Для компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ характерно совпадение минимума сигнала с положением центра 3D объекта. Т.е. локальные аномалии совпадают в полевом сигнале компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ с максимальными абсолютными значениями сигнала. На рис.б приведены результаты измерений компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ на времени 75 мкс. На рисунке выделены 3 аномалии по результатам измерений компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$. Нужно отметить, что измерения компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ проводилось с шагом между профилями 200 метров. Если предположить, что линейный размер 3D объектов 150 метров, то придется констатировать, что шаг между профилями слишком велик. Поэтому наши аномалии, выявленные по сигналу $\partial B_\varphi / \partial t$, будут заведомо смещены от расположения реальных аномалий. Выявленная нами аномалия 2 легко выделяется. Переход через 0 в сигнале компоненты $\partial B_z / \partial t$ совпадает со следующим профилем находящимся восточнее профиля на котором выделяется 2-ая аномалия, но измерения компоненты $\partial B_\varphi / \partial t$ по следующему профилю не проводились. Поэтому мы сместили аномалию 2 восточнее.

Перейдем к рассмотрению результатов измерений E_r компоненты. Интерпретация этих результатов в методе ЗВТ возможна в одномерном, привычном для электроразведчиков варианте. Мы используем закрепленный источник – КЭД, а точки измерений находятся на разном расстоянии и в разном направлении от центра КЭД, в этих условиях 1D инверсию можно с успехом применять в случае, если нет 3D объектов между центром КЭД и точкой измерения сигнала. Поляризацию мы учитывали по модели Cole-Cole. 1-ый профиль состоит из 8 пикетов. На профиле мы наблюдаем резкое изменение характера среды, начиная с пикета 288-207. Параметр поляризации изменяется в 3 раза, а суммарная проводимость среды в 2 раза. При работе с КЭД это происходит в случае, когда существует нарушение горизонтальной слоистости среды. Этим мы подтверждаем восточную границу 1-ой аномалии. 2-ой профиль состоит из 4 пикетов. Сигналы имеют переходы через 0, что сразу предполагает невозможность использования 1D модели. Из характера изменения кривых на 2-ом профиле, нехарактерного для изменения между кривыми над горизонтально-слоистым разрезом, мы делаем вывод о пересечении ближней к КЭД границы 3D объекта.

Итак, аномалии 1 и 2 подтверждены по измерениям 3-ех компонент электромагнитного поля. Эти аномалии показаны на рис 1.в.