

УДК 550.37

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ ЗВТ В РУДНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Злобинский А.В., Могилатов В.С.

Аннотация. На полевом и теоретическом материале показано, что принцип зондирования вертикальными токами, заключающийся в компенсации на физическом уровне отклика от вмещающей толщи, успешно реализуется на рудных объектах. Обсуждается опыт применения ЗВТ при обследовании рудных месторождений.

Ключевые слова. Зондирование вертикальными токами, ЗВТ рудных месторождений.

Abstract. This is shown in the field and on the theoretical material that the principle of vertical electric current sounding is to compensate the response from the host rocks on physical level, has been successfully implemented on the ore objects. We discuss the experience of the VECS during the examination of ore deposits.

Key words. Vertical electric current sounding, VECS ore deposits.

За последние годы произошли существенные изменения в технологиях электроразведочных работ. Это касается также метода переходных процессов (МПП). Во-первых, благодаря компьютеризации и появлению современных программ обработки, все чаще вместо связанной приемно-питающей установки на исследуемой площади размещают один или несколько закрепленных источников и перемещают только приемники. Во-вторых, все активнее измеряют сигналы разных компонент электромагнитного поля на пикетах, находящихся на различном удалении от источника электромагнитного поля. В-третьих, осваиваются трехмерные подходы к интерпретации. Наконец, усложняются способы представления (визуализации) полевого материала и результатов интерпретации. Однако редко рассматривается вопрос об оптимизации источника электромагнитного поля – традиционно используются петля или (реже) горизонтальная линия. Все упомянутые тенденции имеют большое значение для повышения полезности электроразведки при изучении рудных месторождений, но, тем не менее, мы полагаем, что есть большие резервы в повышении эффективности исследований при применении новых, оптимизированных источников электромагнитного поля таких, как круговой электрический диполь (КЭД).

КЭД и зондирования вертикальными токами

Методом зондирования вертикальными токами (ЗВТ) называют такие геоэлектрические исследования, при проведении которых используется в качестве источника электромагнитного поля круговой электрический диполь [Могилатов, Балашов, 2005]. 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. Схема проведения работ представлена на рис. 1.

До начала измерений монтируется питающая установка – КЭД. Радиус источника соответствует глубине и площади исследований. При проведении большинства работ радиус определяется площадью изучаемого участка. Обычно качественные измерения проводятся на удалении до 5 радиусов КЭД, хотя в

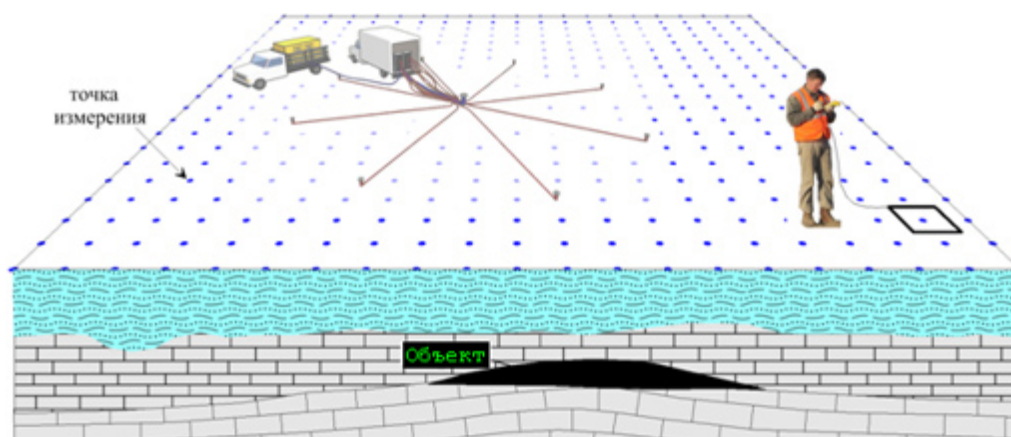


Рис. 1.
Общая схема работ
методом ЗВТ

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 $\sim 25 \text{ км}^2$.

Если исходить из представления о поле произвольного источника как суперпозиции полей с ТМ- и ТЕ-поляризацией, то КЭД возбуждает в Земле переходное ТМ-поле (в отличие от петли и горизонтальной линии, которые возбуждают либо чистое, либо преимущественно ТЕ-поле). 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. Исключением могут быть сильные неоднородности, располагающиеся непосредственно вблизи источника и его электродов. Эта ситуация приводит к появлению фона на всей площади регистрации. Такие случаи на практике имели место. Однако этот фон, обычно, не мешал выделять другие локальные объекты в удалении от источника именно потому, что сигнал от них пространственно локализован.

Стоит заметить, что использование 1D подхода при интерпретации результатов измерения магнитных компонент поля бессмысленно, необходим только трехмерный подход. Впрочем, в силу характера отклика, привязанного к неоднородности, площадные изображения сигналов ЗВТ обладают высокой визуализирующей способностью и имеют 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 $\partial B_\phi/\partial t$ проявляются по-разному. В площадном представлении сигнала положение центра объекта совпадает с границей смены знака сигнала от компоненты $\partial B_z/\partial t$. При этом, максимум сигнала компоненты $\partial B_\phi/\partial t$ 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 $\partial B_\phi/\partial t$. 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 характеризуется в основном средой под точкой измерения, а не усредненную среду между источником поля и приемником.

Поскольку до последнего времени самым распространенным способом измерения электромагнитного поля являлось измерение горизонтальной петли или датчиком сигнала от скорости вертикальной магнитной индукции (т.е. $\partial B_z/\partial t$), то и мы начинали применение ЗВТ, измеряя именно эту компоненту поля. В первых наших работах измеренный сигнал нормировался на некоторую функцию расстояния от точки измерения до центра источника, а время трансформировалось в глубину по формуле для скин-слоя. Такие построения позволяли прямо в полевом сигнале, практически без всякой обработки выявлять изучаемый 3D объект. Отображение объекта в площадном полевом сигнале компоненты $\partial B_z/\partial t$ несколько смещено в плане от реального объекта но, тем не менее, отлично визуализирует исследуемый объект.

В дальнейшем, с появлением программ для трехмерных прямых задач, в частности, для источника поля типа КЭД, мы начали проводить полноценную трехмерную интерпретацию сигналов от компоненты $\partial B_z/\partial t$. Если объект сложный или слабоконтрастный, то, даже используя прямые задачи трехмерного моделирования, не всегда удается качественно подобрать локальное включение, имея только данные для $\partial B_z/\partial t$. Поэтому для сложных объектов мы теперь пытаемся проводить измерения до 3-х компонент электромагнитного поля – $\partial B_z/\partial t$, $\partial B_\phi/\partial t$, E_r . Такой набор данных при сопоставлении и по совокупности дает возможность точно выявлять и идентифицировать локальный объект проводимости по полевому материалу.

В нижеприведенных примерах полевых работ упоминается рельеф местности. Это серьезное обстоятельство, поскольку в нашем сигнале присутствует, естественно, информация о рельефе. Оппоненты

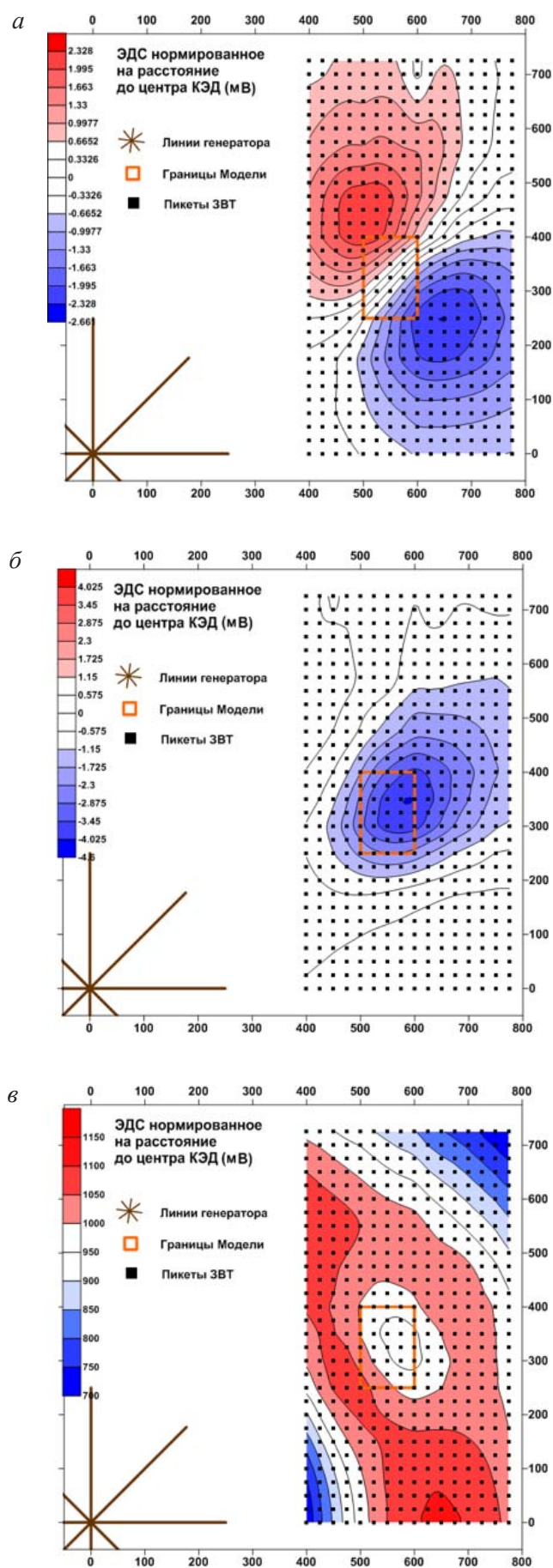


Рис. 2.
Площадное распределение сигналов ЗВТ время 0.12 мс.
а – $\partial B_z / \partial t$, б – $\partial B_\phi / \partial t$, в – E_r

частенько указывают на то, что чувствительность к рельефу является большим недостатком метода ЗВТ. Мы со своей стороны можем заметить, что если метод не реагирует на наличие возмущений на границе среда – воздух, то такой метод является вообще мало-чувствительным. Другое дело, необходимо, конечно, иметь методику учета влияния рельефа.

Итак, резюмируем вопрос об интерпретации в методе ЗВТ. Он в значительной мере стоит по-другому, нежели в «классических» методах, где основную часть сигнала составляет вклад вмещающего разреза. Для этих методов хорошо развиты различные процедуры, иногда довольно сложные, для удаления из сигнала ненужный (но подавляющий) вклад вмещающей толщи. Нам этого делать не требуется. Мы за все «заплатили» на этапе устройства сложного источника, который оптимизирует отклик на физическом уровне. А в обработке оптимизировать иногда уже поздно. На первом этапе основной интерпретационный прием у нас – это построение карт распределения сигнала. Но этот сигнал отражает непосредственно неоднородности и дает контур. Это соответствует картам аномального сигнала, которые появляются в результате сложной обработки суммарных сигналов в традиционной электроразведке, и часто являются там (переведенные в некие кажущиеся сопротивления) конечным результатом. В дополнение к этому мы предлагаем трехмерные визуализации выделенного объекта прямо по полевым данным и подобранные по трехмерному прямому моделированию объекты.

Численное трехмерное моделирование сигналов ЗВТ

Для иллюстрирования свойств сигналов ЗВТ, описанных выше, мы провели расчеты полей для моделей сред, включающих проводящий объект в менее проводящем слоистом полупространстве. Для расчетов мы использовали программу «GeoPrep». В программе используется метод конечных элементов [Соловейчик, Персова и др., 2004]. КЭД был задан с радиусом 500 метров и с суммарным током в 16 Ампер. Уровень сигналов, которые можно измерять в полевых условиях, превышает 1 мкВ, поэтому к рассмотрению принимались только сигналы свыше 1 мкВ. Расчеты проводились для трех типов сигналов – $\partial B_z / \partial t$, $\partial B_\phi / \partial t$, E_r . Пример работ, в которых измерялись эти компоненты, будет приведен далее. 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. За начало координат был выбран центр КЭД, соответственно углы объекта имеют координаты $X_1 = 500$, $Y_1 = 250$; $X_2 = 500$, $Y_2 = 400$; $X_3 = 600$, $Y_3 = 400$; $X_4 = 600$, $Y_4 = 250$.

На рис. 2, а приведено площадное распределение сигнала $\partial B_z / \partial t$ на время 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.

На рис. 2, б также приведено площадное распределение (в изолиниях) сигнала $\partial B_z / \partial t$ 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.2в приведено площадное распределение сигнала E_z , нормированное с учетом расстояния до центра КЭД. Как мы уже говорили, одномерный подход при интерпретации данных E_z возможен и имеет смысл, но только в том случае, если у нас нет существенных аномалий проводимости. Рис. 2, в иллюстрирует, что характер поля E_z над локальной неоднородностью меняется, изменение сигнала достигает 10 %. Таким образом, измерения электрической компоненты E_z можно использовать не только для 1D интерпретации, но и для дополнительной визуализации границ трехмерного объекта.

О рудных полевых работах методом ЗВТ

Ниже приведены результаты некоторых рудных работ методом ЗВТ. Обзор начинается с работ, которые проводились по методике, которую теперь уже можно назвать классической в применении к ЗВТ. Проводились измерения переходной характеристики компоненты $\partial B_z / \partial t$ по заданной сети пикетов, после чего создавались площадные, на фиксированном времени построения с нормировкой в зависимости от удаления от источника. Строились также кажущиеся разрезы, в которых время трансформировалось в глубину по формуле скин-слоя. Используя уже весь трехмерный куб данных, мы также строили трехмерные образы изучаемого объекта.

Определенным этапом стала работа в Финляндии. В этой работе основными были измерения компоненты $\partial B_z / \partial t$, но при обработке материалов мы впервые решали обратную задачу посредством трехмерного математического моделирования и подбора локального объекта. В результате работ была получена трехмерная модель, расчетный сигнал от которой соответствовал полевому сигналу.

Подробно рассмотрена работа в Якутии (2012 г.) на кимберлитовых объектах. Эта работа интересна тем, что в ней впервые по плотной сети измерялась не только компонента $\partial B_z / \partial t$, но и компонента $\partial B_\phi / \partial t$. Кроме того мы дополнили исследования двумя профилями измерений компоненты E_z . В результате этих работ мы смогли выявить местоположения двух объектов (трубки), которые являются слабо-контрастными объектами.

Несколько слов об аппаратном обеспечении работ. Как правило, КЭД состоял из 8-ми лучей. При проведении рудных работ радиус КЭД составлял от 200 до 500 м. Мы пользуемся аппаратным комплексом «ЗаВеТ», разработанным и изготовленным нами же. Ток во всех 8-ми линиях одинаков, за этим в автоматическом режиме следит аппаратура «За-

ВеТ», которая позволяет задавать суммарный ток в диапазоне от 1,5 до 160 А. Стабильность тока и разброс значений в лучах находится в пределах 1%. По отношению к рудным работам силовая аппаратура обладает некоторой избыточностью.

Для измерений переходных сигналов использовалась аппаратура «Цикл-7». Мы используем компактные индуктивные датчики фирмы «ЗаВеТ-ГЕО» с различной эффективной площадью от 10000 до 125000 м².

Обработка материала проводится в программах «ЗаВеТ-М», «Подбор», «Выбор3С» [Могилатов, Захаркин и Злобинский, 2007]. Набор этих программ позволяет предварительно обрабатывать, нормировать и визуализировать данные ЗВТ и традиционных методов зондирования становлением, проводить одномерное моделирование от произвольного источника с произвольным импульсом тока с учетом параметров поляризации и анизотропии среды. Для трехмерного моделирования мы пользовались программой «GeoPrer», основанной алгоритмически на методе конечных элементов [Соловейчик, Персова и др., 2004].

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 км² (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 м². 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. 3, 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. 3, 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.

На рис.3в представлена трехмерная визуализация наших данных. Для ее построения мы создали на основе измерений компоненты $\partial B_z / \partial t$ трехмерный куб данных. В глубины трансформировалось 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 рис. 3 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.

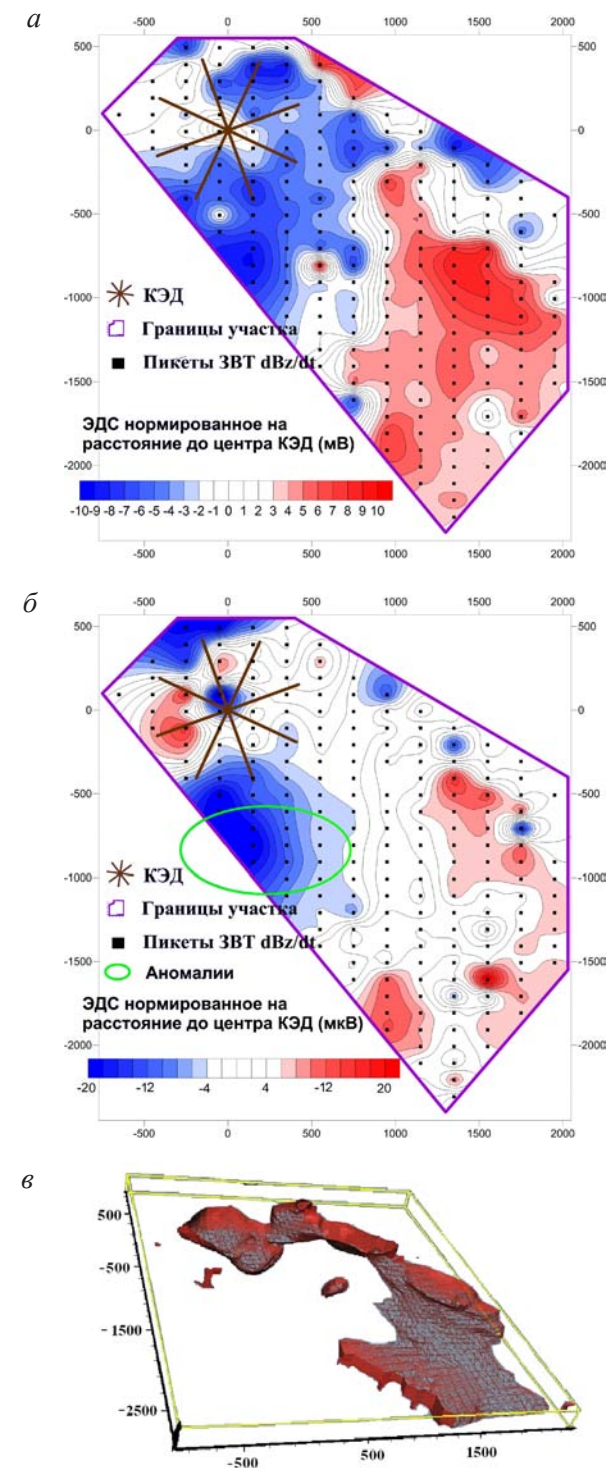


Рис. 3.

а – площадной (нормированный) сигнал ЗВТ на времени 0.34 мс.
б – площадной (нормированный) сигнал ЗВТ на времени 1.0 мс,
в – трехмерная визуализация

Работы на Камчатке

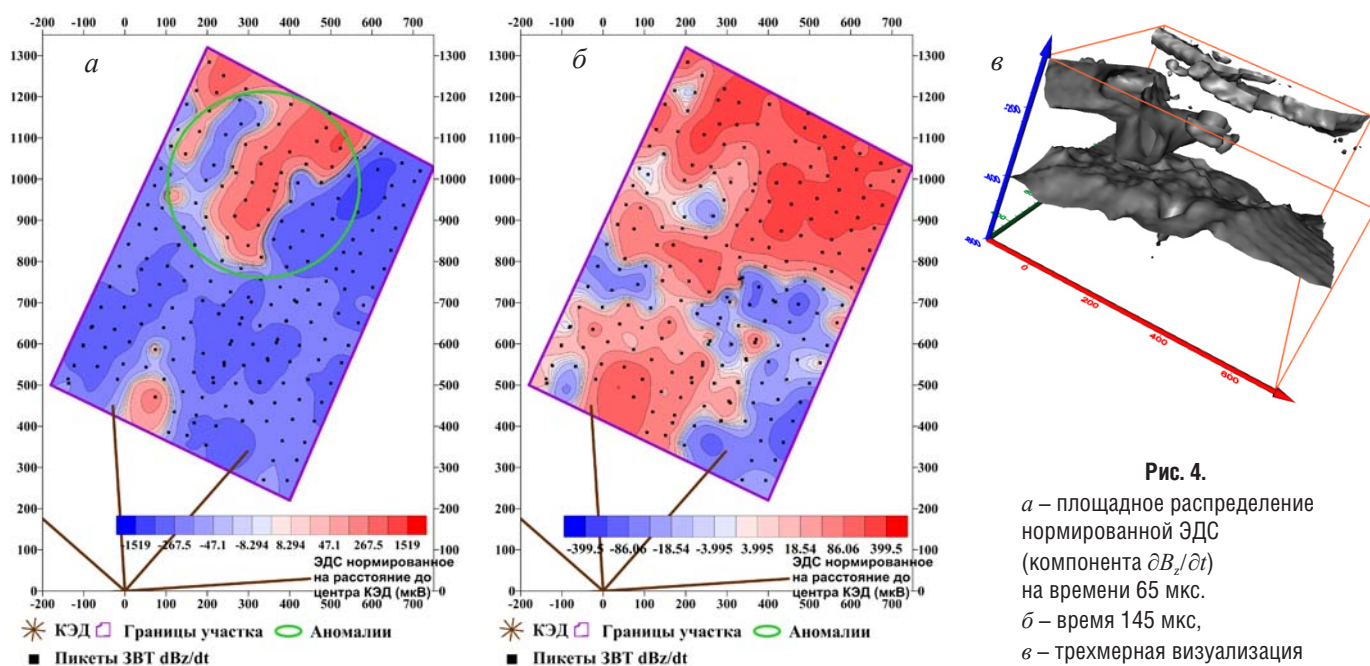
В ноябре 2008 года были проведены работы на Камчатке. Изучаемым объектом являлось рудное тело (никель), залегающее на небольшой глубине (первые десятки метров) и обладающее повышенной проводимостью (первые десятки Ом*м). Вмещающая среда – повышенного сопротивления (от 100 Ом*м). Радиус КЭД был 500 м (длина каждой линии). Общий ток в КЭД составил 1,6 А. Мы использовали индукционные датчики ПДИ-100 (эффективная площадь 10000 м²). Площадь работ составила около 0,5 км² (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. 4 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 моделирование для тел простых форм и отличающихся от вмещающих пород только по сопротивлению, показывает, что локальный объект создает дипольный 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. 4 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.



Работы в Финляндии

Рассмотрим рудные работы в Финляндии (подробно [Злобинский, Квашнин и др., 2010]). Перед нами была поставлена задача изучения морфологии пегматитовой жилы, со средним содержанием LiO_2 около 1%. Объект субвертикальный, длина – сотни метров, ширина от 20 до 70 метров, глубина от 10 до 200 метров. Удельное сопротивление изучаемого объекта было около $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Вмещающая среда плохо проводящая, удельное сопротивление свыше $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В этих работах основными были измерения компоненты $\partial B_z / \partial t$, но при обработке материалов мы впервые использовали 3D моделирование. В результате работ мы получили модель локального объекта, расчетный сигнал от которой соответствовал нашим полевым сигналам, т.е. мы завершили подобранную модель.

Радиус КЭД был 200 м (длина каждой линии). Общий ток в КЭД составил 4,48А. Мы использовали индукционные датчики ПДИ-100 (эффективная площадь 10000 м^2). Площадь работ составила около $0,5 \text{ км}^2$ (прямоугольник со сторонами 500 и 1000 м). Было проведено 81 измерение компоненты $\partial B_z / \partial t$, а также два измерения переходного процесса от горизонтальной линии для определения вмещающей среды. По центру площади работ проходила дорога, а вдоль нее линия электропередач. Шум от линии электропередач в профилях близких к дороге достигал 200 мкВ, несмотря на это мы получили качественный материал, метод подтвердил репутацию устойчивого к электромагнитным помехам.

На рис. 5, а представлен площадной сигнал (в виде изолиний) на времени 21 мкс. Красным цветом отображены положительные значения, синим – отрицательные. Белым цветом отображен сигнал близкий к 0. По опыту предыдущих работ и опыту физического и математического моделирования, мы предполагаем, что объект отражен синей зоной, слегка смещен в сторону красной.

На рис. 5, б представлена объемная визуализация сигнала. И площадная и объемная визуализации отражают всего лишь электромагнитный образ реального объекта. Этот образ по-прежнему нуждается в интерпретации. И даже не в геологической, а сначала в геоэлектрической. Такую интерпретацию мы теперь можем дать, используя программу трехмерного моделирования для сигналов ЗВТ.

В процессе моделирования данных ЗВТ посредством расчета поля подходящего проводящего объекта мы рассмотрели более чем 50 моделей и рассчитали сигналы для них, что можно назвать процедурой трехмерной инверсии. На рис. 5, в представлена модель, которая позволила получить наименьшее расхождение между полевым и модельными сигналами. К сожалению, пока процесс подбора адекватной модели остается очень трудоемким и требует много времени и высокой квалификации интерпретатора. Процесс подбора существенно упростили высокие визуализирующие возможности сигнала ЗВТ, сам характер сигнала позволил нам наметить контур будущей модели. На рис. 5, г изображена трехмерная визуализация синтетических данных, аналогичная визуализации полевых данных на рис. 5, б. Естественно, они похожи и, практически, совмещаются.

Работы в Якутии

Наконец, рассмотрим подробнее недавние (2012 г.) работы в Якутии на кимберлитовые трубки. Работы проводились в рамках договора с НИГП АК «АЛРОСА» (ОАО). Работы проводились на полигоне вблизи поселка Айхал. Эти работы интересны тем, что в них впервые по плотной сети измерялись не только компонента $\partial B_z / \partial t$, но и горизонтальная компонента $\partial B_\phi / \partial t$. Кроме того, мы дополнили работу двумя профилями измерений компоненты E_r . По результатам измерений компонент $\partial B_z / \partial t$, и $\partial B_\phi / \partial t$ было выявлено 3 аномалии, но только 2 из этих аномалий были выявлены

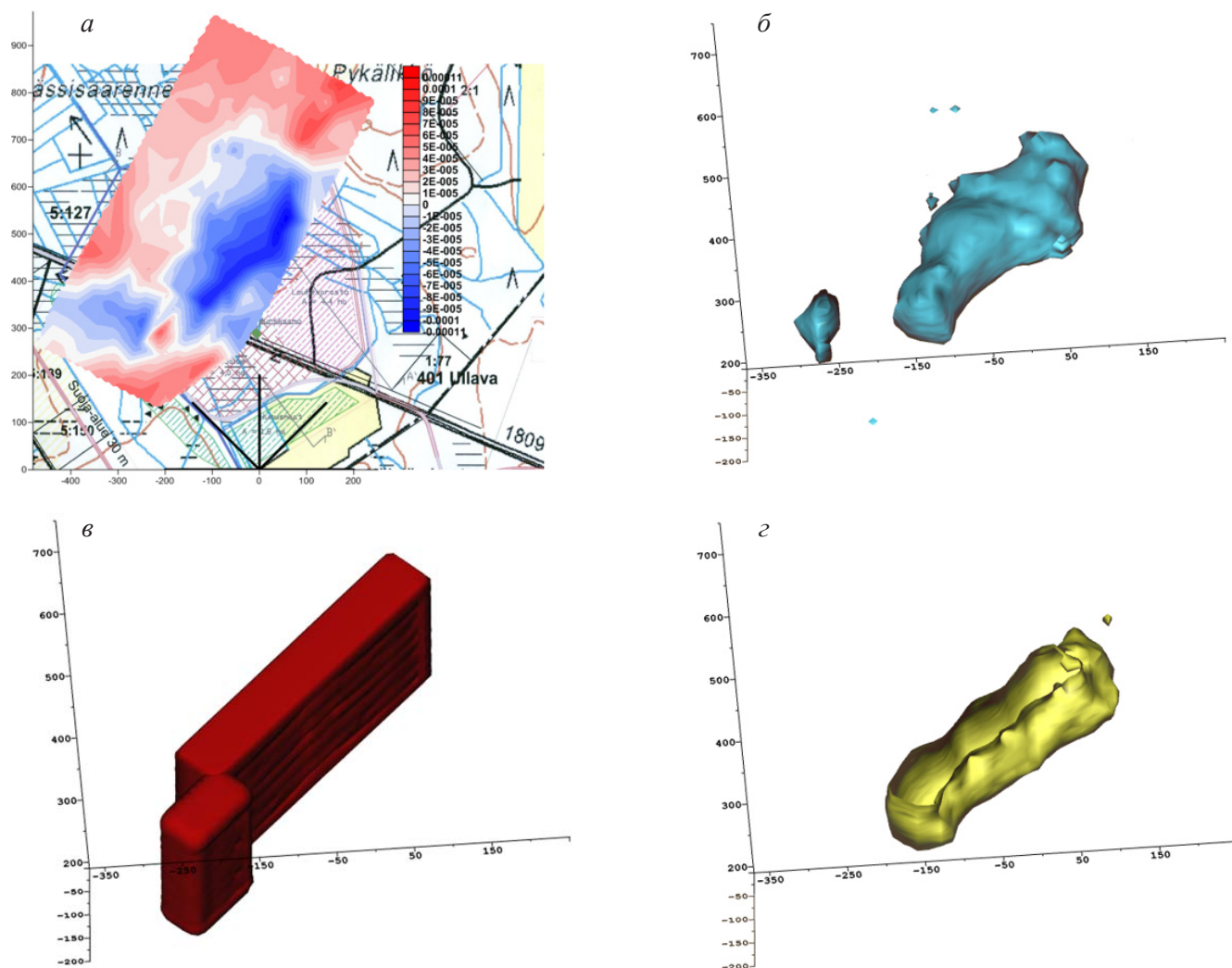


Рис. 5.

- а – площадное распределение измеренной ЭДС (нормированной) от компоненты $\partial B_z/\partial t$ на времени 21 мкс.
 б – трехмерная визуализация полевого сигнала ЗВТ.
 в – подобранная модель объекта.
 г – трехмерная визуализация синтетического сигнала

по обеим компонентам, одна выявилась только по измерениям одной компоненты и была отбракована. 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 м²). Площадь работ составила около 1,3 км² (прямоугольник со сторонами 1300 и 1000 м). Было проведено 238 измерений компоненты $\partial B_z/\partial t$, 105 измерений компоненты $\partial B_\phi/\partial t$, 12 измерений компоненты E_r , а также 4 пикета МПП с использованием генераторной петли 100x100м.

При обработке данных материалов мы сначала выделили аномалии по компонентам $\partial B_z/\partial t$ (сеть наблюдений 100x50м) и $\partial B_\phi/\partial t$ (сеть 200x50м). 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 .

На участке есть поднятие рельефа примерно 3 градуса в направлении с северо-запада на юго-восток, поэтому на поздних временах сигнал определялся этим обстоятельством. Мы провели математическое моделирование, которое подтвердило наше предположение, что на поздних временах сигнал определяется поднятием рельефа. На более ранних временах мы отчетливо наблюдаем сигнал от локальных 3D объектов. 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. 6, 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.

Как мы уже видели выше на моделировании, для компоненты $\partial B_\phi/\partial t$ характерно совпадение минимума сигнала с положением центра 3D объекта. Т. е. локальные аномалии совпадают в полевого сигнала компоненты $\partial B_\phi/\partial t$ с максимальными значениями

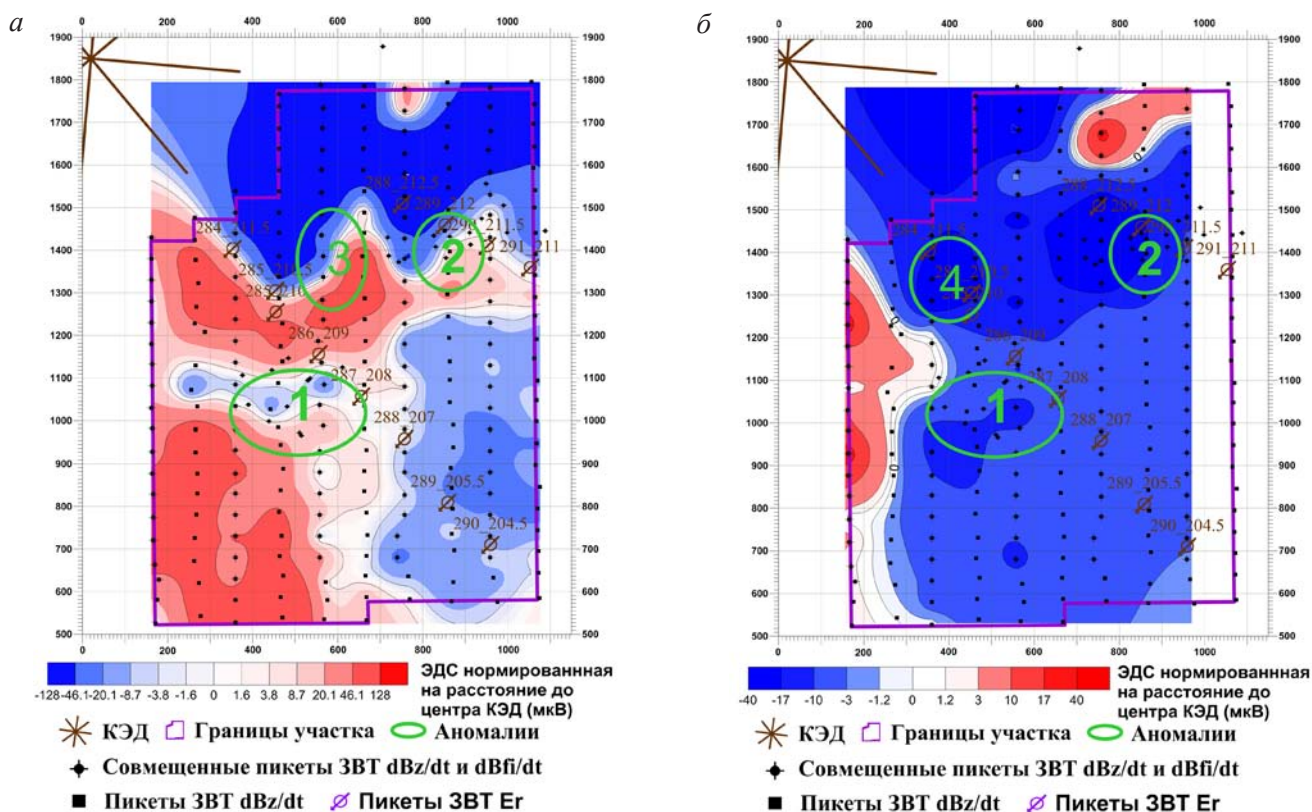
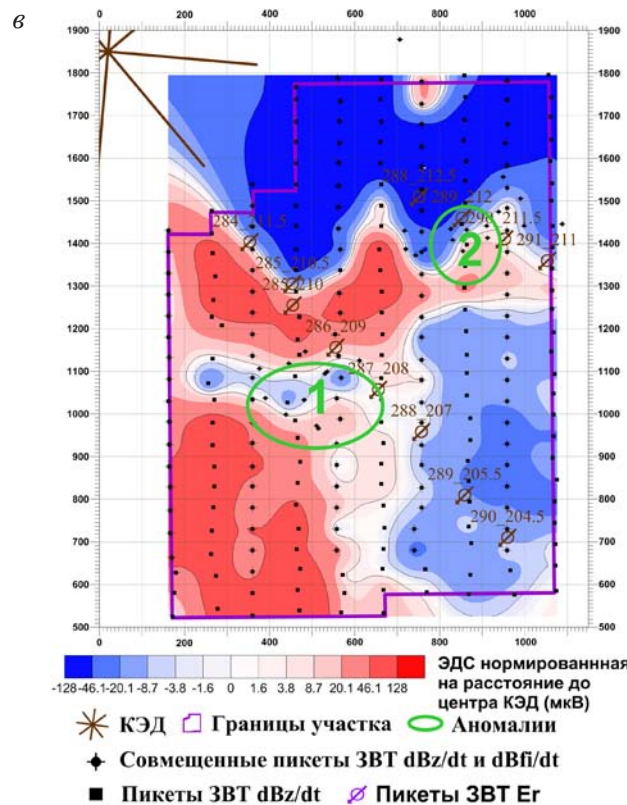


Рис. 6.

а – измерения $\partial B_z / \partial t$ на времени 93 мкс, и три выделенные аномалии.

б – измерения сигнала $\partial B_\phi / \partial t$ 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



сигнала. На рис. 6, *б* приведены результаты измерений компоненты $\partial B_\phi / \partial t$ на времени 75 мкс, на этом рисунке приведены выявленные нами 3 аномалии по результатам измерений компоненты $\partial B_\phi / \partial t$. Нужно отметить, что измерения компоненты $\partial B_\phi / \partial t$ 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 $\partial B_\phi / \partial t$, 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 $\partial B_\phi / \partial t$ по следующему профилю не проводились. Поэтому мы сместили аномалию 2 восточнее.

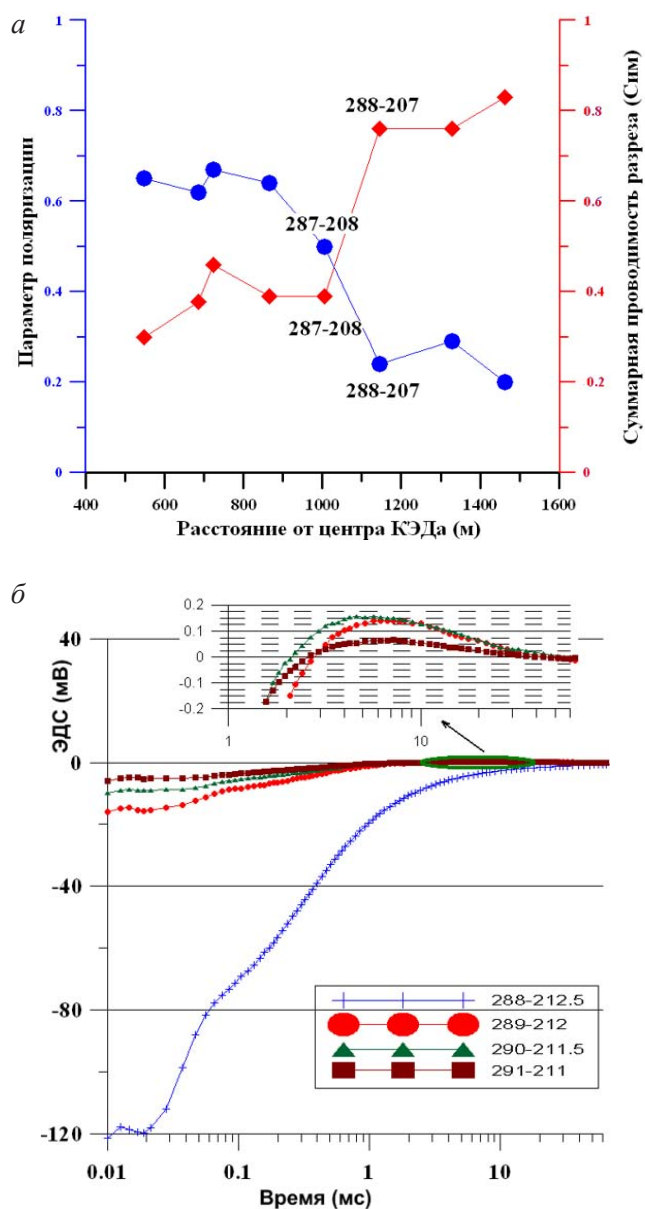


Рис. 7.

а – параметры среды по результатам интерпретации компоненты E_r (профиль 1).

Красные квадраты – суммарная проводимость среды.

Синие кружки – коэффициент поляризации первого слоя по модели Cole-Cole.

б – кривые ЭДС по 2-му профилю

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. На рис. 7, а приведены коэффициент поляризации и суммарная проводимость среды по результатам интерпретации 1-го профиля, состоящего

из 8 пикетов. Все кривые были подобраны с погрешностью менее 10 %, исключение составил пикет 288–207. При измерениях на пикете 288–207 после 5 мс наблюдается 2 перехода через 0, этот факт невозможно объяснить в рамках 1D модели. 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 (в нашем случае логичней всего предположить наличие локального объекта недалеко от пикетов 287–208 и 288–207). Этим мы подтверждаем восточную границу 1-ой аномалии.

2-ой профиль состоит из 4 пикетов с 288_212.5 по 291_211. На рис. 7, б приведены полевые сигналы всех 4-ех пикетов. Сигнал 288_212.5 пикета выглядит как сигнал, который можно подобрать в рамках 1D модели, тем не менее, подобрать 1D модель не удалось. Остальные 3 пикета имеют переходы через 0 (это видно на врезке рис. 7, б), что сразу предполагает невозможность использования 1D модели. Кроме того характер кривых сильно изменяется при переходе от 288–212.5 пикета к 289–212 пикету. Из характера изменения кривых на 2-ом профиле, нехарактерного для изменения между кривыми над горизонтально-слоистым разрезом, можно сделать предположение, что мы пересекли ближнюю к КЭД границу 3D объекта.

Итак, аномалии 1 и 2 выявляются по площадным наблюдениям компонент $\partial B_z / \partial t$ и $\partial B_\phi / \partial t$. При анализе электрической (E_r) компоненты мы отмечали, что вблизи пикетов 287–208 и 288–207 мы находимся рядом с 3D объектом, это подтверждает восточную границу 1-ой аномалии. При анализе измерений E_r компоненты 2-го профиля, мы также отметили, что пикет 288_212.5 находится между границей локального объекта и центром КЭД, а пикеты 289–212, 290–211.5 и 291–211 над 3D объектом или за дальней от центра КЭД границей 3D объекта. Тем самым мы подтвердили западную границу 2-ой аномалии. Итак, аномалии 1 и 2 подтверждены по измерениям 3-ех компонент электромагнитного поля. Расположение 1 и 2-ой аномалий, подтвержденных по всем 3-ем компонентам электромагнитного поля, показано на рис. 6, в. Т.е. аномалии 1 и 2 мы предлагаем как основной результат наших работ и связываем их с трубами.

Ну и в заключение несколько слов о 3D интерпретации. Полноценно решить обратную задачу по этим материалам не удалось. Работы проводились в условиях сложного строения вмещающей толщи, выяснение структуры которой само по себе является серьезной задачей, причем, в районе вечной мерзлоты. В этих местах велико влияние вызванной поляризации на ранних временах, даже в компонентах $\partial B_z / \partial t$ и $\partial B_\phi / \partial t$. У нас пока нет возможности полноценно и оперативно учитывать параметры поляризации при трехмерном моделировании. Несмотря на это, благодаря большому объему разнообразной информации собранной об объектах удалось выполнить поставленную задачу.

Обсуждение результатов и выводы

Работа методом ЗВТ в применении к рудным объектам имеет целый ряд особенностей и преимуществ с нашей точки зрения:

- Неоднородности среды по сопротивлению проявляются в поле КЭД гораздо сильнее, чем при использовании горизонтальной линии или петли.

- Принимаемые сигналы ($\partial B_z / \partial t$ и $\partial B_\phi / \partial t$) 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. 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.

- Измеряемые сигналы от разных компонент электромагнитного поля хорошо дополняют друг друга и позволяют отбраковывать аномалии, выявленные в измерениях отдельных компонент.

- При работе с круговым электрическим диполем 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 с оперативным сгущением сети наблюдений в тех местах, где фиксируется сигнал от объектов.

- 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 перемещать всю приемно-питающую установку.

Мы признаем, что указанные преимущества не носят абсолютный характер, а эффективно реализуются при определенных условиях. Главное из этих условий – выраженный одномерный характер вмещающей среды. Если вмещающая среда – сама трехмерная, то задача интерпретации становится слишком сложной. Но тогда она становится сложной для любого электромагнитного метода. Просто в этом случае применение сложной установки и сложной специфической аппаратуры теряет смысл. Все же мы уверены, что предлагаем интересную альтернативу традиционным методам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Злобинский А.В., Квашинин К.А., Могилатов В.С., 2010, Электроразведка методом зондирования вертикальными токами применительно к рудной геофизике: Геофизика, **6**, 53-57.
2. Могилатов В.С., Балашов Б.П., 2005, Зондирования вертикальными токами: Новосибирск, Издательство СО РАН, филиал «Гео».
3. Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В., 2007, Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор», Новосибирск, Академическое издательство «ГЕО».
4. Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г., Рояк М. Э., Тригубович Г. М., 2004, Конечноеэлементное моделирование электромагнитного поля для кругового электрического диполя в трехмерных средах: Сибирский журнал индустриальной математики, **1**, 114-129.

РЕЦЕНЗЕНТ – кандидат физико-математических наук П.Ю. Пушкарёв.

ОБ АВТОРАХ



ЗЛОБИНСКИЙ
Аркадий Владимирович

Генеральный директор Научно-технической компании ЗаВеТ-ГЕО, кандидат технических наук, окончил физический факультет Новосибирского Государственного Университета в 1992 г. Область интересов – обработка и интерпретация результатов электромагнитных зондирований. Автор около 20 научных работ (1 монография).



МОГИЛАТОВ
Владимир Сергеевич

Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ. Область научных интересов – физико-математические основы геоэлектрики с контролируемыми источниками. Автор около 100 научных работ (4 монографии, 12 изобретений)