

# ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ ЗОНДИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РУДНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

**А.В.Злобинский, К.А.Квашнин, В.С.Могилатов**

**АННОТАЦИЯ.** Обсуждается опыт применения площадной импульсной электроразведки с фиксированным источником для рудных объектов. В качестве источника применяется круговой электрический диполь – аналог вертикальной электрической линии. Речь идет о зондированиях с использованием поперечно-магнитной (ТМ – transverse magnetic) поляризации электромагнитного поля. Или, другими словами, нестационарного поля электрического типа.

**ABSTRACT.** The article discusses the experience of TEM mineral targets exploration by a new VECS (Vertical Electrical Currents Sounding) method. Key feature of the method is extended areal observations of the response induced by a new source type ( a circular electric dipole ) that is similar to a vertical electric dipole in causing transverse magnetic (TM) polarization of the electromagnetic field.

Хотя метод зондирования вертикальными токами (ЗВТ) имеет уже значительную историю (1991г. - первый полевой эксперимент), целый ряд успешных применений на руду и нефть, а также и солидный список публикаций (например, [1]), авторы все же ощущают необходимость снова пояснить суть метода. Применяемый импульсный источник электромагнитного поля - круговой электрический диполь (КЭД), аналог вертикальной электрической линии, возбуждает в Земле переходный процесс поля иной поляризации (ТМ), нежели процесс становления поля от незаземленной токовой петли. Поведение ТМ-поля вполне радикально отличается от широко известного ТЕ-процесса. Ну, например, ТМ-поле даже и в поздней стадии не определяется только суммарной продольной проводимостью разреза. На дневной поверхности горизонтально-слоистой среды регистрируется только радиальный электрический градиент, а магнитные компоненты отсутствуют. Именно отсутствие нормального (от одномерной среды) магнитного отклика позволило предложить новый метод изучения трехмерной структуры разреза, прежде всего, с целью определения углеводородных залежей. Метод этот (зондирования вертикальными токами с магнитным приемом – ЗВТ-М) весьма тонок, поскольку в отклике отсутствует одномерная составляющая по любому параметру – удельное сопротивление, параметры ВП, их анизотропии. На рис.1 приводится схема работы ЗВТ-М.

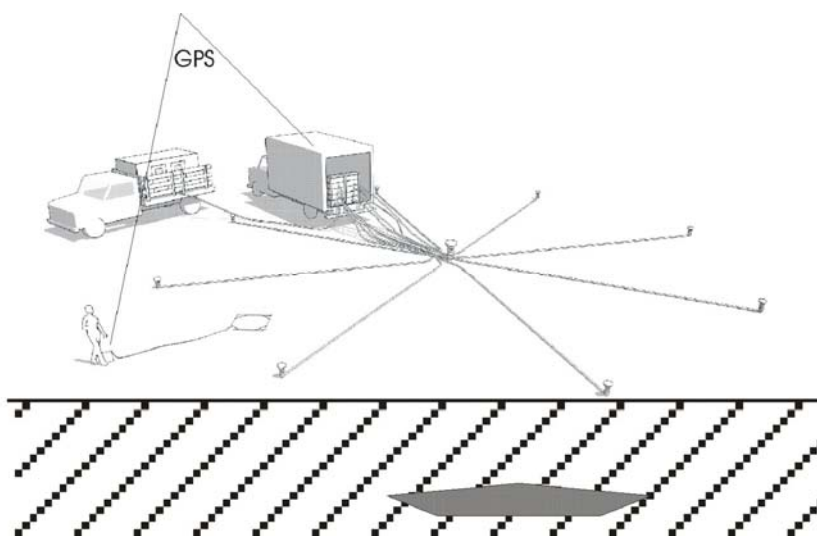


Рис.1. Общая схема работ методом ЗВТ-М.

Устраивается питающая установка – КЭД с радиусом, соответствующим глубине исследований. В зависимости от глубины и протяженности объекта радиус (или длины каждой из 8 радиальных линий) могут составлять от 100 м (малоглубинный рудный объект) до 2 км (площадные нефтепоисковые работы). 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. Измерительный комплекс состоит из компактного индукционного датчика и измерителя переходного сигнала – стандартных элементов аппаратуры МПП или ЗСБ. Комплекс (один или несколько) свободно перемещается по площади с использованием спутниковой пространственно-временной привязки к источнику. Удаление от источника до 5 радиусов источника. Таким образом, при закрепленном источнике радиусом 2 км может быть оперативно исследована площадь до 400 км<sup>2</sup>. Площадной сигнал ЗВТ, представленный на оптимальном фиксированном времени, свободный от фона вмещающей среды и целиком обязанный латеральным неоднородностям, с которыми связан пространственно, обладает высокой визуализирующей способностью. Дальнейшая интерпретация (инверсия) требует исключительно трехмерного подхода. Одномерный подход в любой форме бессмыслен.

Работы на углеводородных залежах описаны, например, в работе [2]. Здесь мы сообщаем о недавних интересных работах методом ЗВТ, произведенных фирмой «ЗаВеТ-Гео» на рудных объектах. Основными преимуществами ЗВТ в применении к данным работам являются:

1) Определение локальных неоднородностей удельного сопротивления среды в плане с высокой точностью. Площадной сигнал ЗВТ-М обладает высокой визуализирующей способностью.

2) 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

3) Экономическая целесообразность. Для проведения работ обычно требуется установить только один источник электромагнитного поля для покрытия всей изучаемой площади.

4) Устойчивость площадного сигнала к искажениям сигнала на отдельных точках наблюдения.

5) Относительная неприхотливость сигналов ЗВТ-М в смысле точности измерений и уровню помех.

В работах на рудных объектах площадной сигнал ЗВТ-М хорошо описывается влиянием локального проводника. Имеющиеся у нас средства трехмерного (по проводимости) моделирования (в борновском приближении и методом конечных элементов) позволяют качественно и количественно объяснить результаты измерений. В этом случае все процессы определяются распределением проводимости, в основном, устанавливаются вихревые токи, и мы имеем чистое электромагнитное зондирование во временной области. В этом случае время можно трансформировать в глубину, пользуясь представлением о скин-слое, и получать вполне определенный и близкий к реальному объекту электромагнитный образ. Приводим тут два примера результатов таких работ (2008г.) на рис.2 и 3.

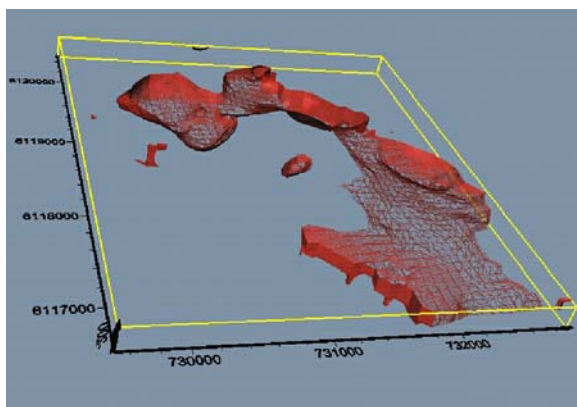


Рис. 2. Результаты работ ЗВТ-М на руду (медно-цинковая) в 3D-представлении (Австралия, Woodlawn)

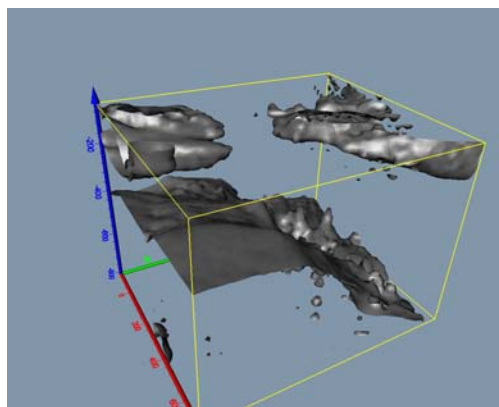


Рис. 3. Результаты работ ЗВТ-М на руду (никель) в 3D-представлении (Камчатка)

Рассмотрим более подробно работы под городом Каустинен (Западная Финляндия, 2009г.), в которых объектом поисков являлось месторождение лития. Перед нами была поставлена задача изучения морфологии пегматитовой жилы, со средним содержанием  $\text{LiO}_2$  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  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Весьма пригодилась устойчивость площадного сигнала, так как по центру площади работ проходила дорога, а вдоль нее линия электропередач. Шум от линии электропередач в профилях близких к дороге достигал  $200 \text{ мкВ}$ . Площадь работ составила около  $0,5 \text{ км}^2$  (прямоугольник со сторонами 500 и 1000 м). Было проведено 81 измерение методом ЗВТ, а также 2 измерения переходного процесса от горизонтальной линии для определения вмещающей среды.

Источником электромагнитного тока являлся круговой электрический диполь (КЭД), реализованный 8-ю радиальными линиями. Радиус КЭД был 200 м (длина каждой линии). Одно общее заземление всех линий устраивалось в центре КЭД, а остальные 8 заземлений располагались на окружности КЭД. Ток во всех 8-ми линиях был одинаков, за этим в автоматическом режиме следила аппаратура «ЗаВеТ». Общий ток в КЭД составил 4,48А. Измерения производились аппаратурой «Цикл-7» с использованием индукционного датчика ПДИ-100 (эф.площадь  $10000 \text{ м}^2$ ). Т.е. измерялась скорость магнитной индукции  $dV_z/dt$ . Обработка материала проводилась в программах «ЗаВеТ-М», «Подбор», «ВыборЗС». Расчеты теоретических сигналов от трехмерных моделей проводились в программе «GeoPrep».

На рис.4 представлен один из характерных переходных сигналов, полученных нами при проведении данных работ. Читатель должен понимать, что здесь зафиксирован не отклик всей, вместе с вмещающей, среды, а только отклик, связанный с наличием неоднородности (таков метод). Вмещающая среда вклада не дает, или дает слабый и скоротечный, связанный с не идеальностью установки КЭД. На полевой кривой мы наблюдаем до 10-15 мкс этот процесс становления, обусловленный не идеальностью. Далее растет полезный сигнал и достигает максимума (несколько мВ) на времени 20-30 мкс. Со времени примерно 100 мкс сигнал слишком мал.

Не идеальность КЭД состоит в том, что изотропное распределение питающего тока заменено на восемь токовых линий и в том, что координаты заземлений определены с погрешностью. В силу этого имеет место остаточное «нормальное» магнитное поле. Мы можем его рассчитать, если известен вмещающий одномерный разрез. Эту информацию нужно иметь либо априори, либо получить в результате обычных «одномерных» зондирований, что мы и сделали, произведя измерения процесса становления от горизонтальной линии (были использованы два луча из установки КЭД). В результате

интерпретации переходного процесса от горизонтальной линии, мы получили следующую вмещающую среду:

	Удельное сопротивление Ом*м	Мощность м
1	500	100
2	10000	беск.

Таблица 1

Было рассчитано остаточное поле ЗВТ-М для КЭД, состоящего из 8-ми линий с заданной погрешностью разбивки заземлений. Значительное расхождение сигнала от идеального КЭД (равномерно заземленного по окружности) и его реального 8-ми лучевого воплощения наблюдается до времени 10 мкс, для вышеприведенной горизонтально слоистой среды. На временах превышающих 100 мкс шум начинал превышать полезный получаемый сигнал, несмотря на обычную для импульсной методики процедуру накопления сигнала. Из этих соображений изучаемым диапазоном времени стал промежуток от 10 до 100 мкс.

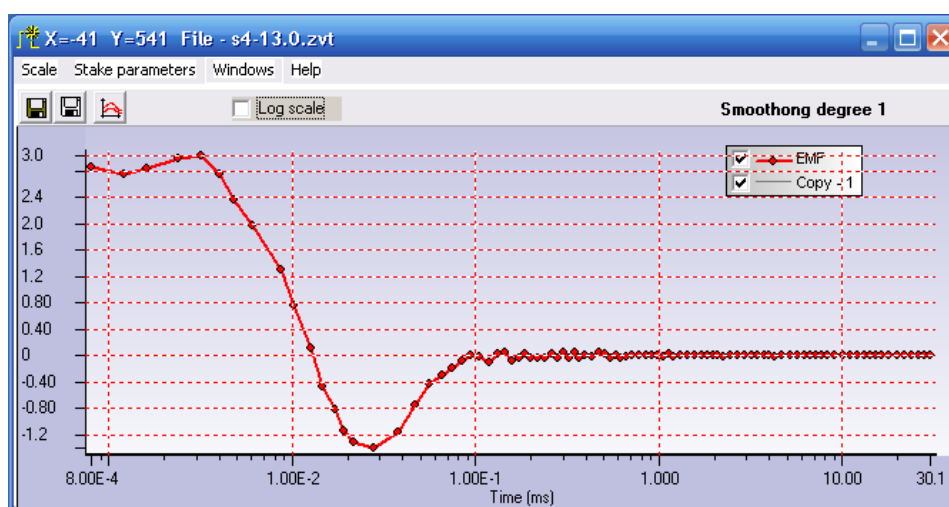
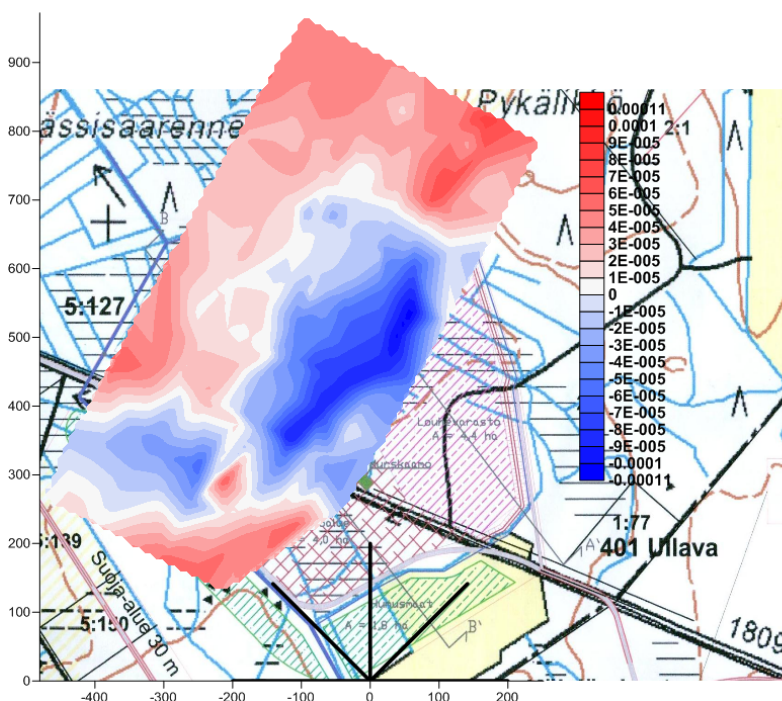


Рис. 4. Пример переходного сигнала ЗВТ. По вертикальной оси значения ЭДС в мВ.

На одном из этих времен мы можем представить площадной сигнал ЗВТ-М после несложной обработки (в основном, компенсация электромагнитного рассеивания с расстоянием), и такие площадные картинки рельефа сигнала до недавнего времени были



основным способом представления результатов работы методом ЗВТ-М. Однако, это вовсе не мало, поскольку этот рельеф в виде зон отрицательных и положительных значений сигнала очень тесно связан с границами реального объекта.

Рис.5. Площадное распределение измеренной ЭДС нормированной на ток и площадь приемника (мВ) на времени 21 мкс. Центр КЭД находится в точке с координатами 0, 0.

На рис.5 показано площадное распределение ЭДС в месте проведения работ. Красным цветом отображен положительный сигнал, синим цветом отрицательный сигнал. 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.

Мы можем также связать время установления сигнала на каждом пикете с определенной глубиной, воспользовавшись широко применяемой в зондированиях становлением и вообще весьма универсальной формулой для скин-слоя, и применяя некоторое дополнительное масштабирование, основанное на знании вмещающей среды и другой априорной информации. В результате, используя уже весь трехмерный куб данных, мы получим (рис.6) трехмерную визуализацию сигнала, аналогично представленным на рис.2 и 3.

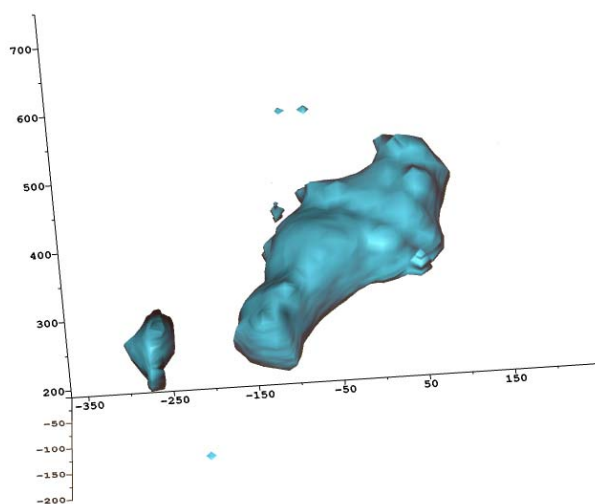


Рис.6. Трехмерная визуализация

Мы, разумеется, понимаем, что площадная визуализация на рис.5 и объемная на рис.6 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. Программа разработана на основе системы трехмерного моделирования для нестационарной геоэлектрики с использованием метода конечных элементов (Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова).

На рис.7 отображен интерфейс программы «GeoPrep» в процессе моделирования данных ЗВТ-М посредством расчета поля подходящего проводящего объекта. Мы рассмотрели более чем 50 моделей и рассчитали сигналы для них. На рис.7 и 8 представлена модель, которая позволила получить наименьшее расхождение между полевым и модельным сигналами. К сожалению, при современном развитии математического обеспечения и компьютерной техники, процесс подбора адекватной модели остается очень трудоемким и требует много времени и высокой квалификации интерпретатора. Нам очень сильно помогли наметить контур будущей модели визуализирующие свойства площадных данных метода ЗВТ.

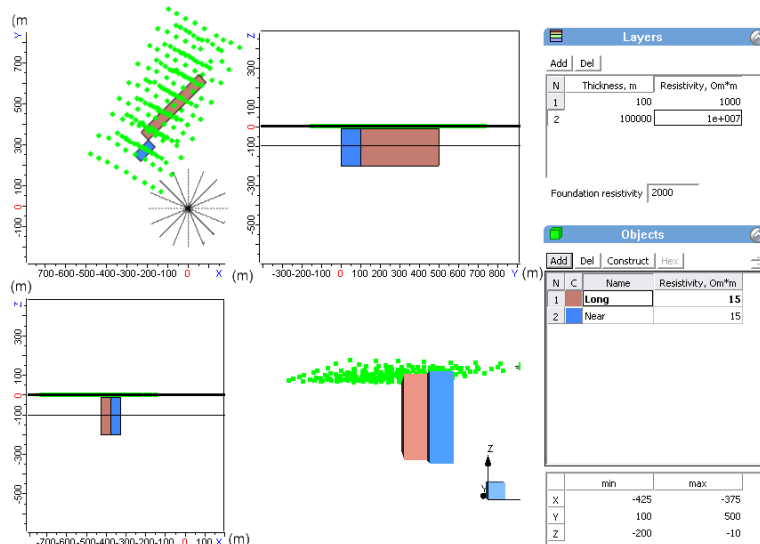


Рис.7. Интерфейс программы «GeoPeg» в процессе подбора локального объекта

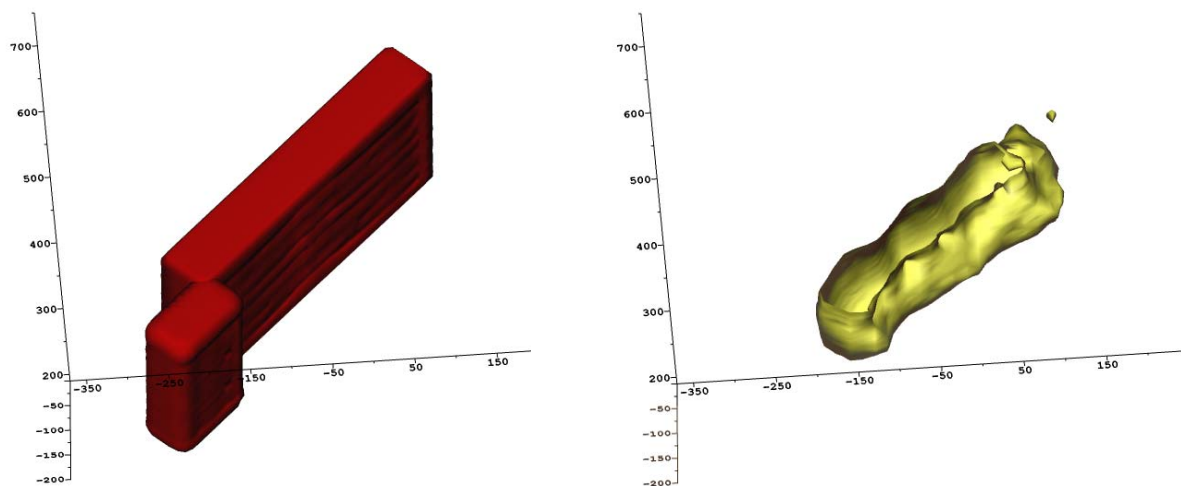


Рис.8. Изображение подобранного проводящего локального объекта и трехмерная визуализация синтетических данных

Рис.8 весьма интересен. Здесь показано подобранное тело, ответственное за пространственно-временное распределение сигналов ЗВТ, наиболее близкое к полевым данным. Но мы также показываем трехмерную визуализацию синтетических данных, аналогичную визуализации полевых данных на рис.6. Естественно, они похожи. На рис.9 все эти объекты совмещены. 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.

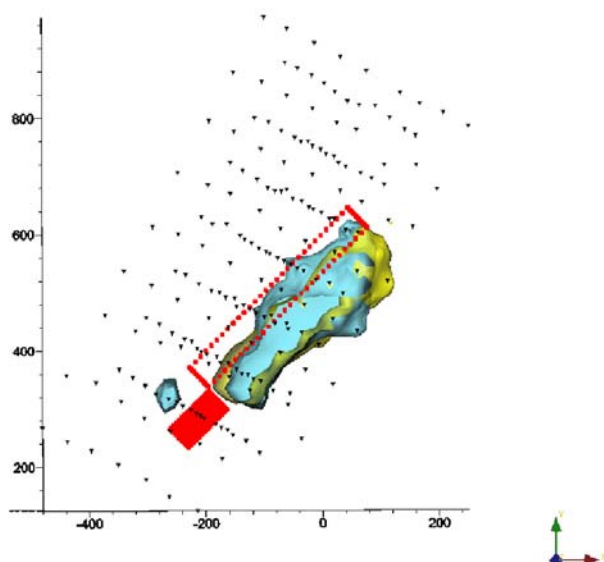


Рис.9. Совмещение подобранного проводящего локального объекта и трехмерных визуализаций синтетических и полевых данных

На наш взгляд задача решена. На основании этого сравнения мы в качестве искомого объекта и представили заказчикам работ подобранную нами модель. Результаты предоставленные нашей фирмой были сравнены с результатами магниторазведки. Оба метода дали хорошее согласие по расположению и форме изучаемого объекта. Также несколько заложённых ( неглубоких ) скважин показали полное согласие с предоставленной нами информацией.

Продемонстрированные результаты показывают эффективность и экономическую целесообразность проведения работ ЗВТ в подобных условиях. Мы вообще-то не отрицаем, что в таких условиях (контрастный объект) вполне эффективен оказался бы и обычный МПП. Но чтобы собрать столь же детальную площадную информацию, пришлось бы произвести 81 (по числу пикетов) соосных зондирований. Даже с небольшой генераторной петлей, как нам представляется, это много более трудоемкая работа, чем сделанная нами один раз установка КЭД. Измерения сигнала заняли 3 рабочих дня ( работало 2 измерительных группы). Фактически в собранных данных, без сложной обработки, мы прямо в поле увидели объект.

Рассмотренные электроразведочные работы подтвердили высокую визуализирующую способность данных ЗВТ-М. Даже и без подтверждения трехмерным моделированием площадные и объемные визуализации полевых данных представляют достаточно ценную информацию о пространственной локализации и форме объекта.

По сути, мы продемонстрировали 3D-электроразведку по соответственной, специальной экспериментальной схеме, позволяющей исключить отклик одномерного характера. Однако в процессе обработки и интерпретации мы нуждаемся в сведениях об одномерной вмещающей среде или в данных одномерной электроразведки.

В этой работе с рудным объектом мы впервые использовали серьезный трехмерный подход к интерпретации посредством использования строгого трехмерного моделирования. Опыт вполне удачный, но который показал, что мы нуждаемся также в методике подбора трехмерной модели (про автоматическую трехмерную инверсию мы пока даже не говорим).

Совершенно ясно, что мы пока упускаем возможности, связанные с регистрацией также и горизонтальных компонент индукции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Могилатов В.С., Балашов Б.П., 2005, Зондирования вертикальными токами: Новосибирск, издательство СО РАН, филиал «Гео».
2. Могилатов В.С., Мухамадиев Р.С., Балашов Б.П., Смоленцев В.В., Феофилов С.А., Темирбулатов Ш.С., Потапов В.В., 2003, Результаты работ по оконтуриванию залежей нефти в Татарстане методом зондирования вертикальными токами: Геофизика, №5, 47-54.

## ОБ АВТОРАХ



Аркадий Владимирович Злобинский,  
Ведущий программист группы методики и интерпретации ЗВТ  
ООО "НТК ЗаВеТ-ГЕО", кандидат технических наук, окончил  
физический факультет НГУ в 1992 г. Область интересов – обработка и  
интерпретация результатов электромагнитных зондирований.



Квашнин Константин Александрович,  
специалист группы методики и интерпретации ЗВТ  
ООО "НТК ЗаВеТ-ГЕО". Окончил НГУ в 2007 г. Область интересов -  
обработка и интерпретация данных метода ЗВТ, 1D/3D моделирование  
геоэлектромагнитных процессов, решение обратных задач  
геоэлектрики.



Владимир Сергеевич Могилатов  
главный научный сотрудник  
лаборатории геоэлектрики  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН  
доктор технических наук  
профессор кафедры геофизики НГУ