

РГАСНТИ 38.57.23

УДК 550.837.31

А.А.Бобачев, И.Н.Модин, Е.В.Перваго, В.А.Шевнин. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. М., 1996, 50 с.// Разведочная геофизика. Обзор . АОЗТ «Геоинформмарк».- Библиогр.: с.47-50 (43 назв.).

Многоэлектродные системы наблюдений в электроразведке методом сопротивлений способствуют быстрому качественному совершенствованию электрических зондирований, широко применяемых для изучения небольших глубин. Новая методика стимулирует развитие исследований в области моделирования неоднородных сред, анализа полей и подавления геологических помех, интерпретации данных в неоднородных средах, и обусловила переход метода электрических зондирований на качественно новый уровень.

Алексей Анатольевич Бобачев
Игорь Николаевич Модин
Евгений Владимирович Перваго
Владимир Алексеевич Шевнин

Многоэлектродные электрические зондирования
в условиях горизонтально-неоднородных сред

Ведущий редактор А.В.Ермакова
Технический редактор М.К.Кузьмина

Подписано в печать с оригинал-макета

Формат 60X84/16.

Усл.печ.л.

Тираж

Бумага картографическая.

Усл.кр.-отт.

Заказ

Печать офсетная

Усл.-изд.л.

АОЗТ «Геоинформмарк». 109172, Москва, ул.Гончарная, 38. Тел.ред.915-60-84

КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ГЕОЛОГИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НЕДР

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЗАКРЫТОГО ТИПА
«ГЕОИНФОРММАРК»

РАЗВЕДОЧНАЯ ГЕОФИЗИКА

Обзорная информация

Выпуск 2

**МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ЗОНДИРОВАНИЯ
В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫХ
СРЕД**

Издается с 1964 г.

Москва 1996

Выходит 2 раза в год

РГАСНТИ 38.57.23
УДК 550.837.31

А.А.Бобачев, И.Н.Модин, Е.В.Перваго, В.А.Шевнин (МГУ)

Введение

Метод сопротивлений (в модификации электрических зондирований), предложенный в начале XX века М. и К. Шлюмберже находит все более широкое применение в малоглубинной геофизике при решении задач инженерной геологии, гидрогеологии, экологии, археологии. В середине 90-х годов в развитии метода сопротивлений появились признаки резких изменений, имеющие характер перехода на принципиально иной качественный уровень. Они связаны с разработками новой многоканальной компьютеризированной аппаратуры, многоэлектродных систем наблюдений, с успехами в компьютерной технике, способах визуализации полей, с развитием программного обеспечения для решения прямых и обратных задач, в том числе на основе новых идей и подходов. Первое использование многоэлектродных систем наблюдений можно найти в 50-х годах, когда в электроразведке ВП в рудных районах в Канаде и США начали использовать дипольную осевую установку с одним питающим и несколькими приемными диполями, так называемый "экспандер". Тогда же по предложению Маддена, Кантвелла и Халлофа (см. Marshall D.J. and Madden T.R., 1959. Induced polarization: a study of its causes. // Geophysics.- Vol.24.- P.790-816) результаты измерений стали строить в виде псевдоразрезов ρ_K (и η_K).

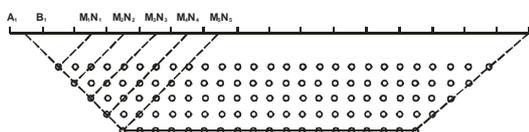


Рис.1. Схема размещения точек записи на псевдоразрезе

Особенности построения псевдоразрезов можно понять из рис.1. Крайний слева диполь, используется как питающий, а ряд диполей справа от него как приемные. Точка записи относится к середине разноса установки и к глубине Z , для нахождения которой из центров диполей под углом 45° проводят линии до пересечения в точке записи.

При изменении разноса установки точка записи изменяет свою глубину. Сеть последовательных положений питающего и приемных диполей образует поле точек в котором наносят значения ρ_K (и η_K) и проводят изолинии, отражающие изменения геоэлектрического разреза по линии профиля и в некотором интервале глубин. Естественно, что псевдоразрез не дает точного представления о распределении истинных параметров разреза, но лишь является простой и достаточно наглядной формой представления результатов измерений. Современные многоэлектродные системы позволяют увеличить интервал прослеживания разреза по глубине. Когда число каналов в пределах одной расстановки электродов оказывается исчерпанным, часть электродов перемещается по профилю таким образом, чтобы получить непрерывное продолжение псевдоразреза (так называемая катящаяся установка). Кроме дипольной осевой установки в

многоэлектродных системах нашли применение двухэлектродная, Веннера, Шлюмберже и трехэлектродная установки.

Установки и методики многоэлектродных исследований

С конца 80-х и особенно с начала 90-х годов в разных странах мира стала все более широко использоваться многоканальная аппаратура и на ее основе методика многоэлектродных наблюдений, сочетающая признаки зондирования и профилирования. В 50-е годы в Канаде и США она называлась "Экспандер", а в настоящее время получила название Electrical Imaging (R.Barker, 1992), Сплошных Электрических Зондирований - СЭЗ (Электроразведка..., 1994). Часто употребляется и термин Electrical Tomography или Electrical Resistivity Tomography - ERT (H.Shima, 1989). Особенности этой методики являются многоканальные измерения с помощью системы электродов, заранее размещенных вдоль одного профиля на равных расстояниях друг от друга. Переключение электродов осуществляется микропроцессором по заданной программе. Основная цель данной методики - одновременное прослеживание разреза вдоль профиля и по глубине. В каждый момент времени осуществляется измерение с электроразведочной установкой, обладающей заданным расположением питающих и приемных электродов, действующим разномом и положением точки записи. Применяются установки: двухэлектродная (AM), трехэлектродные односторонние или двухсторонние (AMN+MNB), симметричные четырехэлектродные Шлюмберже и Веннера и дипольная осевая (ABMN).

Выбор установки многоэлектродного зондирования

Отдельной проблемой многоэлектродных наблюдений является выбор установки. Некоторые специалисты предпочитают конкретную установку, другие - полагают, что все установки равнозначны, так как любую из них можно рассчитать на основе измерений с двухэлектродной установкой AM. Многие считают двухэлектродную установку самой удобной, поскольку на нее якобы минимальное влияние оказывают приповерхностные неоднородности. На наш взгляд, наиболее удобны установки с измерением не потенциала (U), а электрического поля (E). Потенциал-установка, требующая двух линий бесконечности и весьма чувствительная к электромагнитным помехам, имеет больше недостатков, чем достоинств. Эта установка имеет более слабую, по сравнению с градиентными установками, чувствительность как к горизонтальным, так и к вертикальным границам. Возможность пересчета любой установки из AM также сомнительна, так как пересчет осуществляется с помощью дифференцирования, а данные содержат погрешности. В МГУ предпочитают установку AMN+MNB, так как она измеряет не потенциал, а электрическое поле, поле одного точечного источника, т.е. более простое, и дает два изображения, сопоставление которых помогает лучше определить положение глубинных неоднородностей. При работе на ограниченной площади, где нет условий для размещения бесконечности, используют дипольную осевую установку ABMN. Для этой установки с равными диполями второе изображение можно получить смещением точки записи на основе принципа взаимности, т.е. без дополнительных измерений.

Аппаратура

Прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники привел к значительным изменениям аппаратуры для метода сопротивлений. Появились портативные многоканальные автоматизированные комплексы аппаратуры для метода сопротивлений, изменившие традиционную методику полевых работ.

Попытки реализовать многоканальные измерения в электроразведке предпринимались в разных странах и ранее. Как уже упоминалось, в 50-х годах для метода ВП в Канаде и США применялась установка "Экспандер". Фирмой Scintrex (Канада) для такой установки выпускались многоканальные измерители ВП. В России для ВП Л.З.Бобровниковым и В.А.Поповым (Бобровников и др., 1985) была разработана цифровая аппаратура на 8 и 16 измерительных каналов. В НПО «ВИРГ-Рудгеофизика» была предложена методика интерпретации данных точечных зондирований, получившая название "Разрез" и основанная на подмеченном В.А.Комаровым явлении, что при помещении токового электрода вблизи рудного тела и перемещении приемных электродов по профилю, максимальная аномалия ВП наблюдается на расстоянии, примерно равном глубине рудного тела. Это позволило реализовать для выявления гипоцентра рудного тела метод засечек. В программе "Разрез" методика была распространена на данные ВП и на данные метода сопротивлений. Эта методика требовала большого числа наблюдений при разных положениях питающих электродов и вплотную подводила к идее многоканальной аппаратуры с автоматически коммутируемыми каналами. Измерениям методом сопротивлений в движении часто препятствовали трудности гальванических контактов питающих и приемных электродов с землей. Б.Г.Сапожниковым в С.Петербурге была разработана аппаратура и методика для бесконтактного возбуждения и измерения поля на частоте 625

Гц, реализованная в аппаратуре ЭРА-В. Одновременно в этой аппаратуре для частоты 4.88 Гц разработаны бесконтактные измерительные датчики (так называемые "активные электроды"). За рубежом в последнее время появились разработки для бесконтактных измерений в движении с помощью емкостных электродов. В одной из таких разработок, выполненной совместно японской фирмой OYO Corp. и французской фирмой BRGM и подготовленной к серийному производству фирмой IRIS (Франция) используется рабочая частота 10 кГц. Питающие и приемные электроды в виде металлических пластин размером 30 x 30 см составляют дипольную экваториальную установку с одним питающим и шестью приемными диполями с разносами от 1 до 6 м. Установка расстилается на земле и буксируется за автомобилем на скорости около 2 км/ч. Компьютер Ноутбук осуществляет практически непрерывную регистрацию поля по всем каналам. Результаты можно рассматривать и как многоканальное профилирование и как неглубокое дистанционное электрическое зондирование, используемое для экологических и почвенных исследований.

В последние десять лет аппаратура для многоканальных электрических зондирований методом сопротивлений начала выпускаться во многих странах. В большинстве случаев эта аппаратура четко разделяется на два блока: собственно аппаратуру для метода сопротивлений, состоящую из генераторной и измерительной части, и приставку, обеспечивающую многоканальные измерения и представляющую собой, микрокомпьютер или микропроцессор, работающий под управлением компьютера типа Ноутбук. Такая аппаратура выпускается фирмами: OYO Corp. - Япония (McOHM-21), АВЕМ - Швеция (Terrameter SAS 300 C, Multimac & Lund Imaging System), Scintrex - Канада & Campus - Англия (GeoPulse), BGS - Англия (RESCAN), DMT - Германия (ECS-960 with RESECS), Advanced Geosciences, Inc. - США (STING & SWIFT), IRIS - Франция - (Syscal-R1, R2 with Intelligent Nodes). Подобные комплекты аппаратуры производят в Чехии - предприятие Брно-Геофизика (ResiStar RS-100 with ME-100), в Венгрии - компания Триас (RESP-12 и GRM-30.2), в Болгарии - М.Георгиев, институт Тракологии БАН. В России нам известно о разработке подобной (пока несерийной) многоканальной аппаратуры, управляемой микрокомпьютером в Ижевском физико-техническом институте Уральского отделения РАН (И.В.Журбин), применяемой для изучения археологических объектов. Одни комплекты аппаратуры более специализированы, и предназначены для работы лишь с определенными установками и полевыми методиками, другие легко перенастраиваются на работу с разными установками и методиками. Число переключаемых электродов также различается в широких пределах: от 4 x 64 канала - у Lund Imaging system, 4 x 50 каналов у фирмы Campus, SWIFT - до 254 каналов, McOHM-21 до 750 каналов, DMT - до 960 каналов. По устным сообщениям, в США используются комплекты, следящие за 10000 датчиков-электродов. Такие многоканальные системы применяются для мониторинга территорий вблизи мест испытаний ядерных зарядов. Многоканальность систем достигается аналогично, как например, в 256 канальной системе, разработанной в Geco-Prakla, входящей в объединение «Schlumberger»: каждые 16 каналов контролируются микропроцессором, микропроцессор более высокого уровня собирает информацию и управляет работой микропроцессоров нижнего уровня, и такая топология контрольно-измерительной системы в случае необходимости может наращиваться до любого требуемого уровня.

В таких многоканальных системах стало трудно использовать многожильные кабели, в которых каждая жила соединялась с определенным электродом. Стали разрабатываться и применяться коммутируемые кабели и электроды. В одних системах переключение электродов могло осуществляться лишь последовательно (циклически) (4-х жильный кабель, фирма АВЕМ), в других (7-жильный кабель) - произвольно, в любой нужной последовательности (STING & SWIFT, GEOPULSE).

В печати и на конференциях приводятся многочисленные примеры применения многоэлектродных систем для профильного зондирования неоднородных сред, площадного картирования, мониторинга подземных вод, загрязнений. Ниже рассматривается возможность подобных наблюдений и в подземных условиях (в частности, на угольных месторождениях). Большие перспективы имеют такие системы для изучения анизотропии негоризонтальных напластований с помощью азимутальных электрических профилирований и зондирований. Геофизики многих стран, применяющие многоэлектродные системы наблюдений, отмечают существенное повышение производительности, уменьшение численности персонала, вплоть до выполнения наблюдений одним человеком. К этим преимуществам надо добавить высокую наглядность изображений псевдоразрезов, увеличенную детальность изучения разреза в горизонтальном направлении. Главным же преимуществом многоэлектродных наблюдений, пока недооцененным, по нашему мнению, является возможность распознавания и подавления геологических помех.

Переход электроразведки на многоканальные системы измерений похож на ситуацию в сейсморазведке МОВ. По одной сейсмотрассе в принципе можно увидеть приход волны и, предположив ее природу и скорость, оценить глубину границы. Но многоканальный прием дает возможность выделять оси синфазности, определять природу волн (прямая, отраженная, рефрагированная и т.д.), строить годографы и определять по ним скорости, выявлять и подавлять кратные волны, осуществлять пространственную фильтрацию записей. Преимущества многоканальной записи в МОВ настолько очевидны, что

одноканальные измерения (на суше) практически не применяются и более того, наблюдается тенденция к увеличению числа каналов и переходу от профильных к площадным системам наблюдений.

Чтобы более четко оценить преимущества многоэлектродных электрических зондирований, надо вспомнить классическую методику ВЭЗ и изучаемые этим методом модели.

Классическая модель и методика электрических зондирований

Классическая модель исследования для метода ВЭЗ - это модель горизонтально-слоистого разреза. Для нее теоретически обоснована и за много лет идеально практически отработана методика наблюдений, в которой предусматривается увеличение разносов в геометрической прогрессии в соответствии с принципом глубинности ВЭЗ. Для уменьшения влияния ошибок наблюдений и помех, как правило, используется симметричная четырехэлектродная установка Шлюмберже. Обычно с увеличением разносов питающих электродов поочередно используется несколько линий MN разной длины, что делает кривую ВЭЗ сегментированной. Точки ВЭЗ размещают по профилям или по площади. Каждая кривая интерпретируется в рамках модели горизонтально-слоистой среды (ГСС), а затем строится общий разрез, где выделенные границы коррелируются между точками ВЭЗ. Такая методика подчиняется идее "электробурения" - есть отдельные точки, в которых изучено изменение удельного сопротивления с глубиной, а затем на геоэлектрическом разрезе все точки зондирований собираются в единое целое путем корреляции геоэлектрических горизонтов. В последнее время становится очевидным, что эта методика ВЭЗ в значительной степени исчерпала себя и одной из причин этого является **невозможность бороться с искажениями кривых ВЭЗ, оставаясь в рамках классической модели и методики.**

Определение искажений

При совмещении экспериментальных кривых ВЭЗ с теоретическими нередко обнаруживается неполное совпадение кривых. Оно может быть вызвано случайными ошибками измерений и такими геологическими особенностями строения, которые не укладываются в рамки горизонтально-слоистой среды (ГСС). Будем понимать под локально-нормальной кривой ВЭЗ такую, которая соответствует реальному разрезу в точке зондирования, если все границы раздела слоев, пересеченные в данной точке вертикальной скважиной, считать горизонтальными. Отличия кривой ВЭЗ от локально-нормальной в данной точке будем называть искажениями. Анализ искажений был начат в магнитотеллурических методах (М.Н.Бердичевский, Л.Л.Ваньян, В.И.Дмитриев) и оказал существенное влияние на аналогичные исследования для ВЭЗ (Электроразведка..., 1994, Яковлев, 1989).

Признаки искажений кривых ВЭЗ

Для обнаружения искажений нужно сформулировать признаки их проявления на кривых ВЭЗ. Мы различаем несколько групп таких признаков:

1. **Для отдельной непрерывной кривой ВЭЗ:** а) когда участок кривой ВЭЗ идет вверх под углом круче 45° ; б) идет вниз круче, чем кривая с $\mu=0$; в) имеются отдельные резкие экстремумы или изломы на экспериментальной кривой ВЭЗ, которые нельзя совместить с теоретической кривой.
2. **Для сегментированной кривой ВЭЗ:** большие расстояния по вертикали между сегментами; пересечение сегментов или их взаимное расположение, не соответствующее теоретическому.
3. **Для профиля ВЭЗ:** резкие изменения формы или уровня кривых ВЭЗ при переходе от точки к точке, когда расстояние между точками зондирования меньше максимальной глубины исследования.
4. **Для пары трехэлектродных кривых ВЭЗ,** измеренных в одной точке (AMN+MNB): различия в форме этих двух кривых.

Анализ полевых данных ВЭЗ для различных регионов показал, что перечисленные признаки искажений кривых, даже в самых спокойных геоэлектрических условиях, обнаруживаются на более чем 70% кривых ВЭЗ. Таким образом, можно считать установленным следующий факт: искажения кривых ВЭЗ в той или иной степени выявляются почти на всех кривых. Причинами искажений являются геологические неоднородности. Интерпретация искаженных кривых в рамках ГСС дает неверные результаты. Так как искажения проявляются столь часто, то необходимо считать искажающие неоднородности неотъемлемым элементом исследуемой модели и так изменить технологию ВЭЗ, чтобы минимизировать ущерб от искажений. Новая технология ВЭЗ может быть построена на основе изучения такой модели разреза, которая должна включать источники искажений. Так как определить искажения по единичной кривой ВЭЗ во многих случаях трудно или невозможно, то необходимо переходить к совместному анализу профильных данных ВЭЗ. Вероятно, именно этими соображениями можно объяснить вывод В.П.Колесникова, что "одна кривая ВЭЗ ничего не стоит", только профиль или площадная система наблюдений ВЭЗ имеют значение.

Если электрические зондирования становятся не единичными, а профильными, то и основной формой визуализации результатов следует считать не отдельные кривые ВЭЗ, а разрезы (псевдоразрезы) ρ_K .

Полная модель и методика ее исследования

Полная модель исследования (Рис.2) включает три компонента: горизонтально-слоистую структуру, глубинные и приповерхностные неоднородности. Приповерхностные неоднородности (ППН) обычно не представляют интереса и являются чистой геологической помехой. Глубинные, как правило, являются объектом поиска. Но влияние приповерхностных неоднородностей во много раз сильнее глубинных, так как они расположены ближе к точкам возбуждения и измерения поля. Когда приповерхностных помех много и влияние их заметно, их действие подобно эффекту разбитого стекла или покрытой рябью поверхности моря, препятствующим обнаружению за ними более глубоких объектов. Учитывая сильное влияние приповерхностных помех, перед интерпретацией желательно удалить эти помехи или же ослабить их проявление. Размеры глубинных неоднородностей, когда они представляют интерес для исследования, определяют шаг зондирования, а глубина залегания изучаемых объектов - требуемую минимальную и максимальную глубинность. Так как приповерхностные неоднородности не представляют интереса, а их размеры малы, то невозможно определять детальность исследования на основе учета их размеров. Но игнорировать наличие приповерхностных неоднородностей нельзя. Когда надо минимизировать число попаданий питающих электродов в неоднородности, при том, что их расположение неизвестно, то следует выполнять зондирования, увеличивая разносы с арифметическим шагом, равным расстоянию между зондированиями, таким образом, чтобы от разных точек ВЭЗ питающие электроды попадали в одни и те же точки. Арифметический шаг роста разносов не согласуется с принципами зондирования, но необходим для выявления приповерхностных неоднородностей. Искажения приповерхностными неоднородностями вблизи питающих электродов при увеличении разносов в геометрической прогрессии проявляются в поле ρ_K как случайная геологическая помеха, а при линейном увеличении разносов с шагом, равным шагу между точками ВЭЗ, - как регулярная помеха. В последнем случае эту помеху значительно легче обнаружить, диагностировать и впоследствии - удалить. Желательно выполнять зондирования с одним питающим электродом (AMN+MNB), а не двумя (AMNB), так как в этом случае легче разобраться с диагностикой (происхождением) искажений.

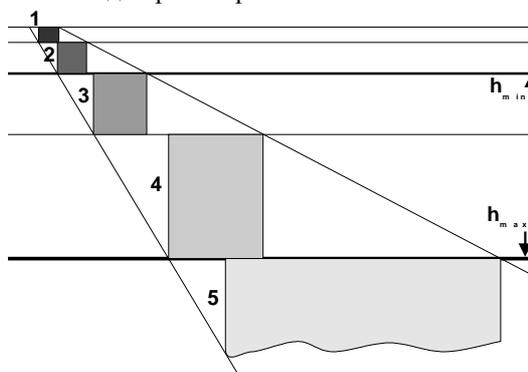


Рис.2. Полная модель геозлектрического разреза

Основные типы искажений кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями.

Было установлено (Бобачев и др., 1995), что искажающее влияние приповерхностных неоднородностей (ППН) зависит прежде всего от типа элемента установки (дипольного или одиночного), попадающего на неоднородность (рис.3). Кроме того, проявление искажения на разрезе ρ_K зависят от выбора точки записи (к какому элементу установки она относится: к неподвижному или подвижному). Искажения неоднородностями, расположенными вблизи неподвижных элементов установки, и неоднородностями, пересекаемыми подвижными элементами установки, на разрезе ρ_K проявляются по-разному.



Рис.3. Классификация искажений, вызванных ППН

Искажения могут быть выявлены как на отдельной кривой зондирования, так и на псевдоразрезе ρ_K .

Рис.4 показывает, как проявляется полусферическая ППН на кривых электрического зондирования для трехэлектродной установки AMN с точкой записи, относимой к неподвижному элементу установки. Кривая 0 соответствует фоновому двуслойному разрезу без ППН. Кривые 1, 2, 3, 4 отвечают различным вариантам встречи (б) элементов установки AMN с ППН. В случае 1 неподвижный диполь MN находится над ППН в 3 м правее центра, а одиночный электрод А перемещается вправо. В случае 2 одиночный электрод А находится над ППН в 3 м правее центра, а перемещается диполь MN. В случае 3 неподвижный

одиночный электрод находится вне ППН, а подвижный диполь MN проходит над неоднородностью. В случае 4 неподвижный диполь MN находится вне ППН, а одиночный электрод проходит над ней.

В рассматриваемых случаях мы наблюдаем искажения двух типов: 1) квазиконформные, 2) неконформные. Квазиконформные искажения наблюдаются в случаях 1 и 2, когда неподвижный элемент установки находится над ППН. Здесь кривая ρ_K смещается по оси сопротивлений, почти не меняя своей формы. Неконформные искажения наблюдаются в случаях 3 и 4, когда подвижный элемент установки проходит над ППН. Здесь меняется форма участка кривой ρ_K , отвечающего прохождению элемента установки над ППН. Отметим, что дипольный элемент установки дает более сильные по амплитуде эффекты, чем одиночный (поле наиболее резко меняется на границах ППН). Отметим также, что случаи 2 и 3 соответствуют методике точечных зондирований (ТЗ - питающий электрод А неподвижен, измерительный диполь MN перемещается вдоль профиля, точка записи относится к электроду А).

Для часто используемой нами установки AMN с точкой записи в середине неподвижной линии MN,

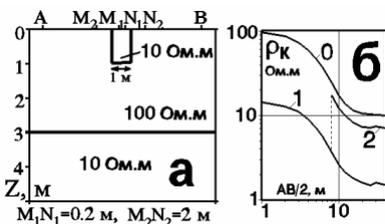


Рис.5. Проявление Р-эффекта на сегментированной кривой ВЭЗ

искажения, связанные с питающим и измерительным элементами, различны по амплитуде и по форме. Поэтому для их описания мы используем более локальные термины - Р и С эффект.

Р- (или S-) эффект - это искажения неоднородностями вблизи приемных электродов. Р-эффект - от "potential" - измерительных электродов, а S- эффект - был так впервые назван М.Н.Бердичевским и использовался в МТЗ для описания аналогичного эффекта; название произошло от термина "sigma" - проводимость. Р-эффект проявляется как вертикальный сдвиг всей кривой или ее сегментов по оси сопротивлений без изменения формы. Объяснение Р-эффекта можно

дать с помощью формулы:
$$\rho_K = K \frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho_{MN} j_{MN}}{j_0} = \frac{E_{MN}}{j_0},$$

где главной причиной Р-эффекта следует считать изменение ρ_{MN} на приповерхностной неоднородности. Если кривая несегментирована, то Р-эффект обнаруживается при сопоставлении этой кривой с соседними, а для сегментированной кривой - по заметному расхождению сегментов по вертикали при сохранении общей формы кривой (рис.5). Устранение Р-эффекта называется нормализацией кривой.

Для сегментированной кривой сначала осуществляется частичная нормализация (все сегменты сдвигаются до соприкосновения друг с другом). Сопоставляя кривые по профилю, можно осуществить более полную нормализацию, приводя все кривые к одному базовому уровню - к той части всех кривых, которая наиболее выдержана по профилю (рис.6). На рис. 6 показаны практические результаты ВЭЗ на археологическом объекте у дер. Красное на Куликовом поле. Шаг между зондированиями равен 1 м, а максимальные разносы - до 20 м. Разный уровень кривых ВЭЗ на рис.6,а не может быть вызван глубинными объектами, хотя на разрезе изолинии напоминают волнистую структуру. После нормализации кривых разрез выглядит как горизонтально-слоистый (рис.6, г).

С - эффект - это искажения кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями, вызванные движущимися над ППН питающими электродами (С эффект - от слова "segment"). Хотя отражения на графиках профилирования и зондирования моментов перехода перемещаемого питающего электрода через приповерхностную неоднородность (контакт, пласт: полусферу и т.п.) были известны давно из работ И.М.Блоха, В.Р.Бурсиана, А.И.Заборовского и др., но как серьезная причина искажений кривых зондирования С - эффект был осознан в 1991 г., сначала на результатах математического моделирования и лишь после этого на экспериментальных данных. Причина в том, что при стандартной методике зондирования и на разрезе кажущихся сопротивлений его очень трудно распознать. Проявление С-эффекта на кривой AMN над полусферической ППН показано на рис.4 (кривая 4), а проявление на псевдоразрезе ρ_K - на рис.7(а). Сильная вертикальная аномалия на рис.7,а - это Р-эффект, а С-эффект можно заметить по искривлению изолиний в виде наклонной зоны на разрезе ρ_K под углом 45° (вправо вниз). Когда питающий электрод попадает в неоднородность,

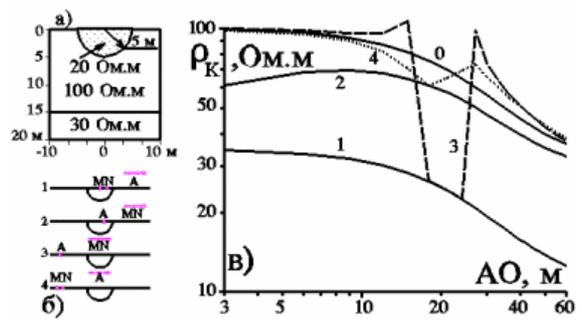


Рис.4. Модель (а), варианты встречи с ППН (б) и кривые AMN зондирования (в)

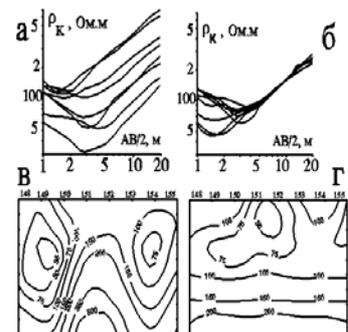


Рис.6. Р-эффект на полевых данных ВЭЗ (д.Красное, Куликово поле)

кривая ВЭЗ заметно искажается на 1-2 разностях за счет резкого перераспределения плотности тока в разрезе j_{MN} . С-эффект обладает рядом особенностей, делающих его еще более опасным, чем Р-эффект: а) изменяется форма кривой и следовательно, тип разреза и видимое число слоев; б) на серии кривых ВЭЗ по профилю он проявляется на разрезе ρ_K как наклонный слой, причем с использованием линейного масштаба по оси разностей он выглядит прямолинейным, а с использованием логарифмического масштаба - изогнутым; в) при стандартной методике зондирования с четырехэлектродной установкой Шлюмберже и логарифмическим шагом увеличения разностей С-эффект может возникать то от электрода А, то от В, и на соседних кривых по профилю проявляться нерегулярно, лишь при точном попадании питающего электрода в неоднородность. При этом пропадает главный диагностический признак - форма искажения; г) на разрезах ρ_K С-эффект виден не очень заметно за счет фоновых изменений поля.

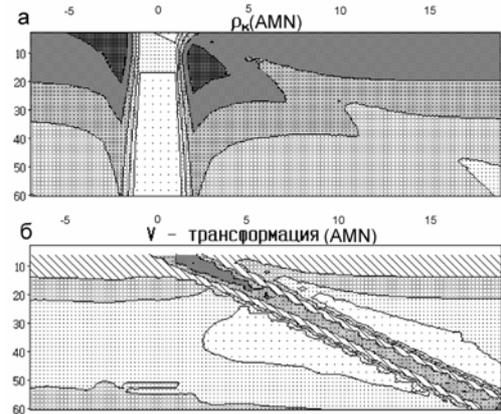


Рис.7. Проявление Р (вверху) и С-эффекта (внизу) на псевдоразрезе ρ_K (а) и его V трансформации (б)

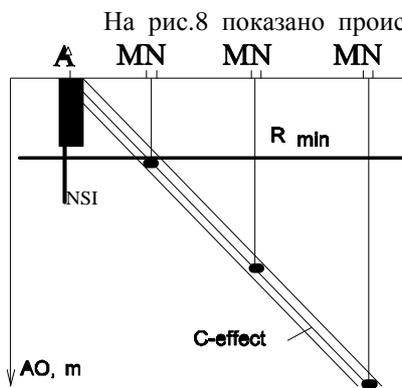


Рис.8. Схема возникновения С-эффекта.

На рис.8 показано происхождение С-эффекта, возникающего от одной ППН при измерениях с разными точками расположения неподвижного диполя MN и одним подвижным электродом А, проходящим над ППН (темный прямоугольник). Система координат: расстояние по профилю (вправо), разнос АО (вниз). Точка записи относится к MN. При выборе линейного масштаба по оси разностей АО в данной системе координат, соответствующей разрезу ρ_K , С-эффект проявит себя как линейная зона искажений, наклоненная под углом 45° . Так как разности АО начинаются с некоторого R_{min} , и разрез ρ_K рисуется с этого уровня, показанного на рис.8 горизонтальной линией, то аномалия от С-эффекта подходит к этому уровню не в точке фактического размещения ППН, а на расстоянии R_{min} от нее, что учитывается на рис.9. Рис.9 представляет искажающие эффекты, вызванные ППН в системе координат разреза ρ_K для разных установок. Случаи 4 и 5 соответствуют трехэлектродной

установке AMN и MNB, с точкой записи в центре MN. Попадание MN в ППН вызывает Р-эффект (показан тремя вертикальными линиями), а попадание токовых электродов А или В - вызывает С-эффект (показан тремя наклонными линиями). Для установок Шлюмберже (случаи 2 и 3) от каждой ППН распространяются три луча искажений (вертикально вниз - Р-эффект и два луча от С-эффектов, расходящихся от ППН с ростом разности АО). Для нескольких ППН (случай 3) искажающие эффекты накладываются друг на друга и в результате возрастает общий уровень геологических помех и уменьшаются возможности корреляции кривых ВЭЗ по профилю, вплоть до полной потери возможности прослеживания границ в разрезе по данным ВЭЗ. Случай 1 на рис.9 соответствует установкам АМ и АВМН (ДОЗ) с точкой записи в центре установки. В этом случае токовые и приемные элементы установок эквивалентны, поэтому ППН вызывает появление двух одинаковых линии искажений, расходящихся на разрезе ρ_K под углом 45° . Искажения для установки Веннера имеют наиболее сложную форму. Так как одновременно растут как разности АВ, так и MN, и при этом с разной скоростью, а точка записи остается неподвижной, то углы наклона зон искажений от электродов АВ и MN на разрезе ρ_K различаются. При наличии нескольких ППН все эти зоны накладываются друг на друга, и поле ρ_K оказывается очень сложным.

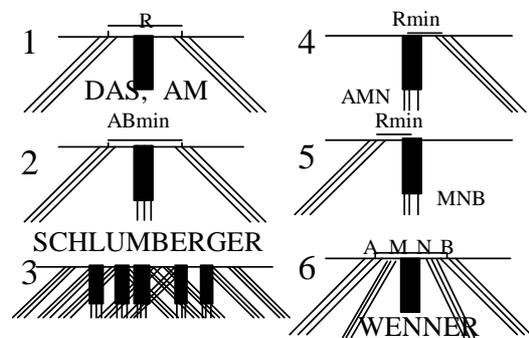


Рис.9. Эффекты искажений (тройные линии) от ППН (черные прямоугольники) для разных установок.

Способы визуализации.

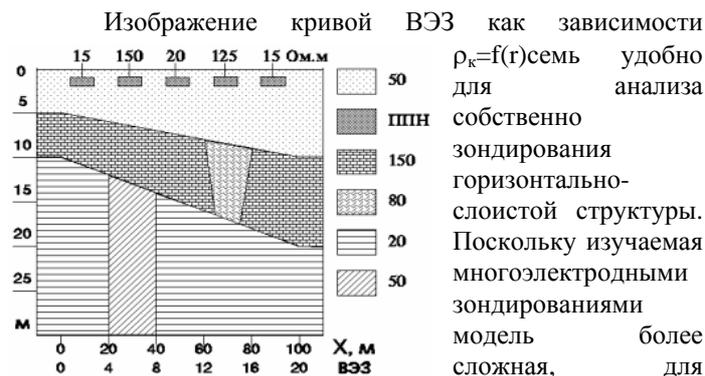


Рис. 10. Модель слоистой среды с глубинными объектами и ППН.

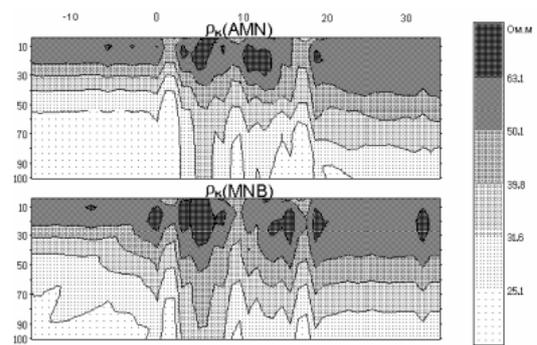


Рис.11.Поля ρ_k для AMN (вверху) и MNB (внизу) установок.

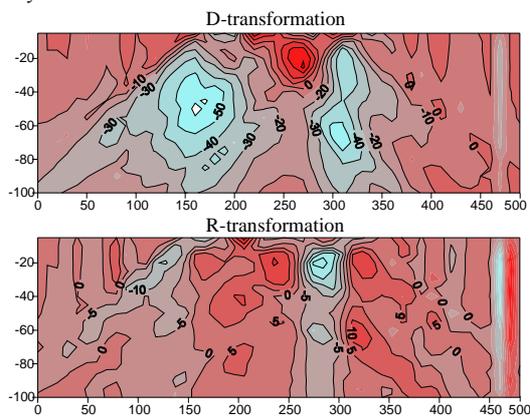


Рис.12. Поле D-трансформации (А) и ее горизонтальной производной (Б).

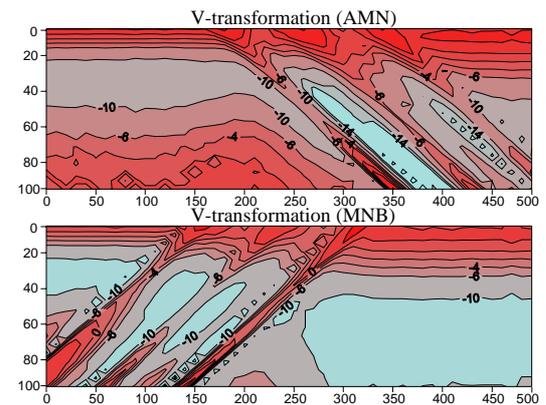


Рис.13. Поля V-трансформаций для AMN (вверху) и MNB (внизу) установок.

(глубинных и поверхностных неоднородностей, Р- и С-эффектов и слоистой структуры) должен быть найден свой оптимальный способ визуализации. Для этой цели в МГУ создан программный комплекс IPI-2D, позволяющий изображать данные сплошных электрических зондирований (СЭЗ) в разных видах. Поясним возможности визуализации на примере полей для модели, центральная часть которой показана на рис.10. За ее пределами неоднородности отсутствуют. Общая длина области моделирования - 700 м. В первом слое находятся пять объектов, имитирующие приповерхностные неоднородности. Во втором слое одна неоднородность пониженного сопротивления - модель палеодолины, в третьем слое - зона пониженного сопротивления - модель тектонической зоны. Шаг ВЭЗ по профилю - 5 м, разности ВЭЗ от 5 до 100 м, номера пикетов ВЭЗ от -15 до +35, т.е. рабочая часть профиля - 300 м.

Наиболее распространенной формой визуализации результатов многоэлектродных измерений является разрез кажущихся сопротивлений. В результате интерпретации строится модель среды, и часто два изображения - исходного поля и интерпретационной модели представляются рядом. Нередко к ним добавляют и третье изображение - теоретически рассчитанное поле для данной модели, подтверждающее состоятельность интерпретации.

Но при изучении сложных сред нельзя

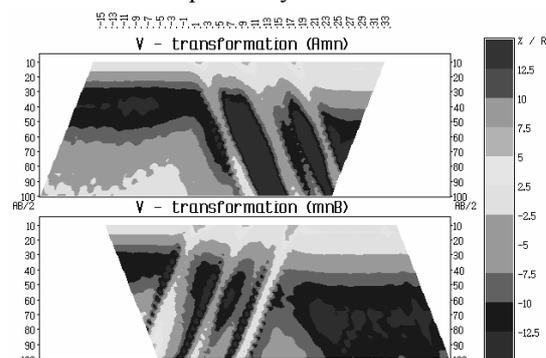


Рис.14. Поле V- трансформации с точкой записи, отнесенной к электродам А и В (VX).

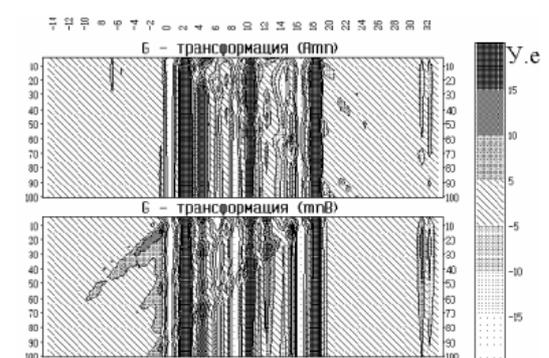


Рис.15. G-трансформация поля ρ_k .

ограничиваться какой либо одной формой визуализации и для каждой составляющей должен быть найден свой способ изображения. Разрез кажущихся сопротивлений не является идеальной формой изображения, так как интерполирует поле между отдельными точками зондирования и сглаживает его многие детали. Кривые ВЭЗ и их совокупность являются наиболее привычной формой визуализации зондирований, они более детальны по сравнению с разрезом ρ_K , но не столь наглядны.

При регистрации в каждой точке двух зондирований AMN и MNB полезно сопоставлять поля для этих установок, так как различия между ними подчеркивают положение неоднородностей. Это различие можно увидеть с помощью разностной или D-трансформации. Приповерхностные неоднородности вызывают наиболее сильные искажения кривых зондирований двух типов, в зависимости от того, находятся ли эти неоднородности вблизи подвижных или неподвижных элементов установки (питающих и приемных электродов), а также от того одиночный электрод или диполь попадает на неоднородность. Искажения от ППН после детального изучения нами были отнесены к особым видам искажений (вызванным геологической помехой). Достоинство современных многоэлектродных систем наблюдений состоит в том, что **искажения от ППН проявляются в поле ρ_K как регулярная помеха, поэтому их легче распознать и впоследствии удалить.**

Для распознавания искажений от ППН можно применить две трансформации поля ρ_K , названные V и G трансформациями (рис. 13-15). V-трансформация есть результат дифференцирования разреза ρ_K вдоль оси разносов (рис.13-14), а G-трансформация - результат дифференцирования вдоль линии наблюдений (рис.15), первая трансформация подчеркивает искажения от движущихся элементов установки (рис.13), а вторая - от неподвижных элементов установки (рис.15). Для большей выразительности V-трансформации используется линейный масштаб по вертикальной оси (Z), а дополнительным эффективным приемом является перенос точки записи от середины MN к питающему электроду А для верхней и В для нижней картинки - VX (рис.14).

Подобная система визуализации данных ВЭЗ ставит своей целью оценить на качественном уровне степень проявленности элементов новой модели - горизонтальной структуры, глубинной или приповерхностной неоднородности, Р- и С - эффекты. В некоторых случаях с помощью трансформаций удастся увидеть глубинный объект на фоне приповерхностных искажений, в других случаях сначала требуется удалить приповерхностные искажения.

Способы решения прямых и обратных задач для неоднородных сред

Прямые задачи.

Решение прямых задач метода сопротивлений для неоднородных геоэлектрических разрезов может осуществляться на основе аналогового и физического моделирования, расчетов по аналитическим формулам и численного моделирования. Мы не будем рассматривать здесь вопросы физического моделирования. Аналитические решения прямых задач могут быть получены при решении уравнения Лапласа для определенных моделей либо методом зеркальных отображений, либо методом разделения переменных (метод Фурье). Подобные решения излагаются в учебниках по электроразведке, обзор решений приведен в нашей книге (Электрическое зондирование, ч.1, 1988) и в книге Земцова и Шака (1990). Метод зеркальных отображений отличается наибольшей простотой решения, с его помощью без решения дифференциальных уравнений сразу получается решение для потенциала точечного источника над заданной моделью. Но круг моделей, для которых этим методом могут быть получены решения, очень узок.

Классическим подходом к решению многих задач электроразведки методом сопротивлений является метод разделения переменных или метод Фурье. Идея его заключается в сведении дифференциального уравнения в частных производных (уравнения Лапласа в кусочно-однородных средах) к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, имеющих аналитическое решение. В итоге решение исходного уравнения записывается в виде ряда, содержащего в зависимости от системы координат, в которой решается задача, тригонометрические, цилиндрические или сферические функции. Заметим, что хотя выражения для искомых величин записываются в явном виде, часто их расчет требует весьма значительных вычислительных затрат вследствие медленной сходимости соответствующих рядов. Довольно полный обзор подобных задач приведен в работе Земцова и Шака (1990).

Численные методы решения прямых задач.

Численные методы математического моделирования, позволяющие рассчитывать поле постоянного тока в неоднородных средах, известны достаточно давно. Однако их широкое применение стало возможно лишь с появлением в 70-80 годы мощных вычислительных средств, что обеспечило резкое увеличение круга решаемых прямых задач электроразведки. В этих методах искомые параметры электрического поля

находятся путем численного решения соответствующих уравнений. По типу этих уравнений численные методы можно разделить на методы дифференциальных и методы интегральных уравнений. При их решении происходит замена исходных непрерывных функций, описывающих зависимость поля от координат, на более простые (кусочно-постоянные, кусочно-линейные и т.п.) функции. При этом все пространство или его часть разбивается на области, размеры которых зависят от требуемой точности аппроксимации. Совокупность границ этих областей часто называется *сеткой*, а сами численные методы - *сеточными*. Бесконечное множество чисел, представляющих неизвестную непрерывную функцию, заменяется конечным числом неизвестных параметров простых функций. Такой прием называется *дискретизацией задачи*. В результате дискретизации задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Аппроксимация искоемых функций более простыми делает решение приближенным. Размерность СЛАУ определяется детальностью дискретизации, которая зависит от сложности модели и требуемой точности расчета поля. В реальных задачах возникают системы, состоящие из большого числа (от нескольких десятков до десятков тысяч) уравнений.

Для расчета электрического поля в неоднородных средах применяются: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод интегральных уравнений (МИУ) и др.

Первые два метода относятся к методам дифференциальных уравнений и основываются на непосредственном численном решении краевых задач. В этих методах размеры области дискретизации обычно значительно превышают размеры исследуемых неоднородностей. На границе области дискретизации задается тот или иной тип граничных условий, а сама область моделирования разбивается на элементы (в МКЭ) или покрывается сеткой (в МКР). Фактически МКР является простейшим частным случаем МКЭ. В МКР дифференциальный оператор заменяется его разностным аналогом, связывающим значения потенциала в различных узлах сетки. В МКЭ записывается система уравнений для параметров функций, которыми аппроксимируется потенциал в пределах выбранных элементов. Получаемые системы уравнений имеют большую размерность, причем матрицы коэффициентов системы сильно разрежены, а сами коэффициенты связаны с локальным распределением электропроводности и геометрией сетки. Метод конечных элементов обладает более высокими аппроксимационными возможностями, но сложнее при реализации. Конечно-разностный подход привлекает своей простотой и универсальностью, поэтому и получил большое применение.

В методе интегральных уравнений электрическое поле рассматривается как сумма нормального и аномального полей. Источниками последнего являются заряды, индуцируемые в местах нарушения однородности среды. В результате краевая задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода для поверхностной или объемной плотности аномалеобразующих источников. Наиболее целесообразно использовать МИУ при изучении однородных по сопротивлению локальных объектов, погруженных в однородное полупространство или слоистую среду. При этом дискретизации подвергается только поверхность неоднородности, что существенно сокращает размерность задачи по сравнению с МКР и МКЭ. МИУ также может эффективно использоваться для расчета полей в моделях с локальными неоднородностями при произвольном распределении проводимости внутри них. Коэффициенты СЛАУ, возникающие при дискретизации задачи связаны с геоэлектрическим разрезом, в котором помещается неоднородность. Их расчет более трудоемок в сравнении с МКР и МКЭ. Однако общие вычислительные затраты в МИУ, как правило, меньше, чем в методах дифференциальных уравнений. Алгоритмы, основанные на МИУ, ориентированы в основном на решение прямых задач для определенного типа моделей, что является недостатком этого метода.

В целом каждый из перечисленных методов характеризуется своей группой моделей, для которых его применение оптимально. Поэтому в последние годы наметился процесс развития методов, сочетающих преимущества разных подходов (так называемые гибридные методы).

Метод решения прямых и обратных задач с помощью α -центров.

Идея решения прямой задачи электроразведки с помощью α -центров принадлежит известному румынскому геофизику С. Стефанеску (Stefanescu, S., 1970, *Nouvells applications de la theorie des milieux alpha harmoniques a la prospection electrique en courant continu: Geophys. Prosp.*, **18**, Suppl., 786-799. Stefanescu, S., and Stefanescu, D., 1974.). Возможность решения трехмерной обратной задачи электроразведки с использованием α -центров была показана в работе Петрика, Силла и Уарда (Petrick, Sill, Ward, 1981.)

Основная идея α -центров состоит в переходе от традиционных кусочно-однородных сред к среде с непрерывно меняющимся сопротивлением. Сопротивление в любой точке разреза определяется параметрами нескольких α -центров по формуле:

Здесь σ - проводимость среды в точке наблюдения М, В и C_i - некие параметры системы из i α -центров, R_i - расстояние от i -го α -центра до точки наблюдения. Покажем график зависимости проводимости σ от расстояния от α -центра (рис.16). Для такого распределения $\sigma(x,y,z)$ аналитическое решение прямой задачи получается просто решением системы линейных уравнений. Кроме этого, благодаря простой связи

ρ_K с параметрами α -центров, удается достаточно просто и устойчиво решать обратную задачу для такого класса моделей.

В отличие от традиционных методов решения 2D и 3D задач, таких как МИУ и МКР, где определяется приближенное решение для точной модели, в методе α -центров находится **точное решение для приближенной модели**. Это означает, что между сопротивлением среды и полем имеется точная аналитическая зависимость. Благодаря этому метод α -центров позволяет строить быстрые алгоритмы для решения обратных 2D и 3D задач. Сопротивление среды в реальных геологических условиях изменяется, как правило, не скачкообразно, а непрерывно и поскольку в данном методе проводимость σ рассматривается как непрерывная функция, это позволяет использовать его для решения 2D и 3D задач не только для сред с кусочно-постоянным распределением проводимости, но и для градиентных сред.

Рассмотрим физический смысл понятия α -центров: если коэффициент $C > 0$, то α -центр представляет собой идеальный точечный проводник ("проводящую воронку"); если коэффициент $C < 0$, то α -центр является идеальным сферическим изолятором конечного радиуса. В реальных условиях возникает некоторое чередование проводящих и непроводящих α -центров, комбинация которых позволяет на плоскости моделирования получить распределение проводимости, близкое к заданному.

Х.Шима (Shima, 1990) предложил переместить α -центры с плоскости моделирования на параллельные плоскости, находящиеся на расстоянии, превышающем радиус α -центра, для того, чтобы не попасть в область действия "проводящих воронок" и "сфер-изоляторов". При таком расположении α -центров можно использовать α -метод Стефанеску для моделирования как высокоомных, так и проводящих тел. Х.Шима использует метод α -центров для решения как прямых, так и обратных задач электроразведки методом сопротивлений. Современные модели могут включать до нескольких тысяч α -центров, что позволяет с их помощью изучать весьма сложные распределения сопротивления среды для наблюдений с поверхности земли, наблюдений скважина - поверхность, томографических исследований между горными выработками.

Обратные задачи для 2D неоднородных сред

Данные ВЭЗ по профилю, представленные в виде псевдоразреза ρ_K приводят к мысли о желательности интерпретации в рамках 2D моделей. Но в этом случае традиционный метод подбора оказывается чрезвычайно трудоемким. Актуальной задачей является ускорение такого подбора. Кроме 2D подбора для интерпретации многоэлектродных зондирований используются и другие методы. Наиболее простой способ предложил А.Зохди (Zohdy, 1989).

Алгоритм А.Зохди 1989 г.

Идея американского геофизика А.Зохди получила широкую известность. Он предложил быстрый способ интерпретации профильных (и площадных) данных ВЭЗ, когда каждая кривая по профилю (или по площади) интерпретируется отдельно в рамках 1D модели, но все мощности слоев в заведомо многослойном решении оказываются одинаковыми, что значительно облегчает построение общей интерпретационной модели. Фактически мощности слоев в модели А.Зохди возрастают с глубиной в геометрической прогрессии и так, что на декаду глубин приходится обычно 6 слоев. Это дает возможность представлять профильные и площадные геоэлектрические модели интерпретации в виде блоков, имеющих на равной глубине одинаковые размеры, но разные свойства. Многие авторы после проверки предложения А.Зохди указывали на такие недостатки его алгоритма в 2D случаях, как появление ложных структур, усиление эффектов от контрастных неоднородностей, большие отличия от истинных структур и т.д., но идея блочной модели оказалась очень удобной и нашла последователей.

А.Зохди отнес свой алгоритм к методам интерпретации, основанных на инверсии самой кривой ρ_K в модель разреза, и к этой же группе причислил и известный алгоритм Кунца и Рокруа.

Первый этап алгоритма - кривая ВЭЗ оцифровывается с постоянным шагом геометрической прогрессии в 6 точек на декаду разносов. После трансформации получается модель с числом слоев, равным числу разносов, причем мощности слоев равномерно возрастают в той же геометрической прогрессии.

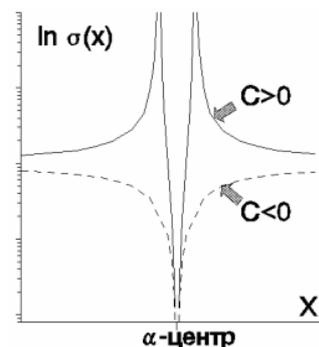


Рис.16. График зависимости $\sigma(x)$ для одного α -центра (сплошная линия - проводник, пунктир - изолятор)

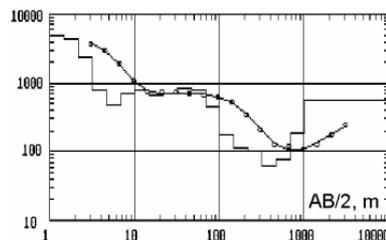


Рис.17. Пример интерпретации по программе Зохди (1989)

В стартовой модели глубины границ равны соответствующим разностям, а сопротивления слоев - значениям ρ_k на этих разностях. В процессе подбора сначала корректируются все мощности путем умножения на постоянный коэффициент 0.9 для достижения наилучшего соответствия кривых ВЭЗ, а потом корректируются только сопротивления слоев по формуле:

где i - номер итерации, j - номер слоя и разности, ρ_k - кажущееся сопротивление с верхним индексом «э» - экспериментальное, «т» - теоретическое, $\rho_i(j)$ - сопротивление j -го слоя на i -й итерации, «нов» - новое, «ст» - старое.

Получаемое таким образом решение подвержено сильному влиянию принципа эквивалентности и макроанизотропии. Неустойчивость решения не позволяет его рассматривать как строго количественную интерпретацию ВЭЗ, а лишь как некую трансформацию, дающую представление о характере изменения ρ с глубиной (рис.17). Эти модели интерпретации А.Зохди удобно использовать для группового представления данных ВЭЗ по профилю или площади, строя, разрезы "истинных" сопротивлений, и карты "истинных" сопротивлений на заданной "истинной" глубине. Понятие "истинный" в кавычках свидетельствует о весьма относительной истинности такого решения.

Метод С.Бристовы.

Метод Бристовы относится к группе методов, именуемых на западе методами обратного проектирования "Back-projection". Этот метод, являющийся разновидностью метода засечек, был опубликован в 1966 г. и привлек к себе большое внимание. Фактически Бристов предложил использовать точечные трехэлектродные зондирования с неподвижным питающим электродом и движущимся измерительным диполем MN. Максимальная аномалия от находящегося на глубине объекта наблюдается при положении питающего электрода над объектом, когда диполь MN удален на расстояние, равное глубине объекта. Два разных положения питающего электрода дают точку пересечения, попадающую в объект. В случае нескольких положений питающего электрода область пересечения позволяет оценить размеры объекта. Существует еще ряд сходных приемов, относящихся к классу задач "обратного проектирования" (Lowry и Shive, 1990). Аналогичная идея была описана для метода ВП в книге В.А.Комарова (1972, 1980) и детально проработана в алгоритме "Разрез".

Алгоритм "Разрез"

Алгоритм "Разрез" (Методич. рек., 1989) разработан К.М.Ермохиным, А.А.Петровым, А.Н.Федоровым и др. в ВИРГ-Рудгеофизика и предназначена для построения кажущихся центров возмущающих объектов по данным точечных зондирований (ТЗ) и срединного градиента (СГ) в методе вызванной поляризации. Построение ведется для профильных измерений; получаемый при этом разрез позволяет судить о положении возмущающего тела в пространстве.

В основу способа, предназначенного для автоматизированного построения геоэлектрического разреза положена известная закономерность графиков η_k , установленная расчетным путем (Комаров, 1972, 1980; Методич. рек.,1989) и заключающаяся в том, что расстояние от токового электрода до центра сферического тела примерно равно расстоянию от источника тока до точки максимума η_k . Эта закономерность в течение длительного времени использовалась при ручной интерпретации данных ВП. Центр поляризованного изометричного тела находился по пересечению дуг окружностей, проведенных из ряда стоянок токового электрода А радиусом, равным расстоянию от А до точки максимума кажущейся поляризуемости (рис.18).

В алгоритме "Разрез" на вертикальную плоскость, проходящую через профиль наблюдений, наносится координатная сетка. Узлам сетки присваиваются значения кажущейся поляризуемости (η_k), равные измеренным, находящимся на таком же расстоянии от токового электрода, что и рассматриваемый узел (P_1 и P_2 на рис.18). Значения η_k , измеренные на участке профиля справа от токового электрода А, наносятся на правую половину плоскости разреза, а значения η_k с левой ветви графика ТЗ - на левую половину плоскости разреза. Границей правой и левой полуплоскости служит вертикальный луч, проведенный из стоянки токового электрода вертикально вниз. В каждой узловой точке значения η_k суммируются для всех имеющихся ТЗ. Для большей

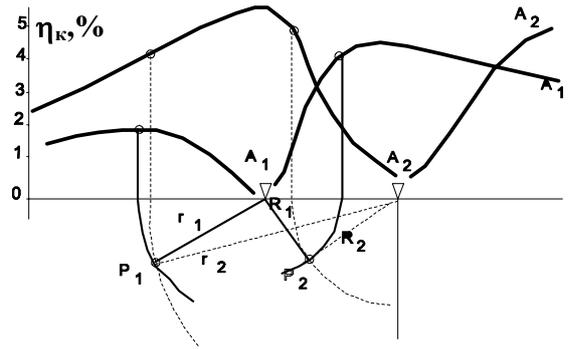
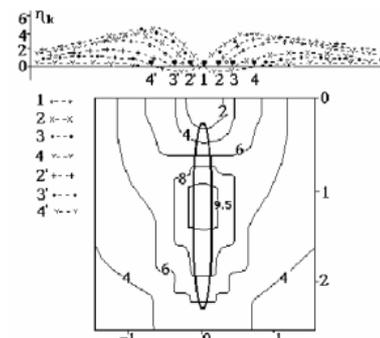


Рис.18. Идея метода засечек. Алгоритм "Разрез".



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ГРАФИКИ η_k НАД ВЕРТИКАЛЬНЫМ СФЕРОИДОМ.
Рис.19. Пример расчета по программе "Разрез" над вертикальным сфероидом.

достоверности построений желательнее иметь не менее трех стоянок питающих электродов.

Чтобы учесть возможное различие числа суммируемых значений η_k в разных узловых точках, вычисляют их средние значения. Затем находят среди средних максимальное для рассматриваемой плоскости разреза, и на него делят полученные средние значения в каждой узловой точке. В результате получают относительные интенсивности вызванной поляризации (ОИ-ВП). Аналогичные операции для ρ_k дают относительные интенсивности кажущегося сопротивления (ОИ-КС). Значения относительных интенсивностей кодируются целыми числами (индексами). Полученный разрез можно разбить на области с одинаковыми индексами. Область, где значения индексов максимальны, дает наиболее вероятное местоположение центра возмущающего тела.

Методика построения геоэлектрического разреза по алгоритму "Разрез" была опробована на телах сфероидальной формы. Примеры графиков η_k (вверху) и разрезов ОИ-ВП (внизу) для вертикального сфероида приведены на рис.19. Для расчетов использовалась модель сфероида с отношением осей $a/c=10$, отношением сопротивлений $\rho_2/\rho_1=0.1$ и с избыточной поляризуемостью 40%. Судя по рис.19, гипоцентр находится близко к истинному центру вертикального сфероида. Для других моделей это совпадение может быть хуже.

Решение обратных задач электроразведки при поисках локальных объектов.

Локальные аномалии от тел относительно простой формы могут быть проинтерпретированы с помощью метода подбора. Такие алгоритмы и программы разрабатывали многие научные группы и специалисты в России и за рубежом (А.А.Петров, А.Н.Федоров, К.М.Ермохин, В.Н.Земцов, В.Г.Шак, Н.Г.Шкабарня, П.С.Мартышко, Olayinka, Mundry, Nomilus, Lee, и др.). Среди многих отличий в алгоритмах одним из основных является способ решения прямой задачи. В.Н.Земцов и В.Г.Шак (1990), Н.Г.Шкабарня (1986) использовали аналитические алгоритмы решения прямой задачи для набора тел правильной геометрической формы (клиновидных, сферических, цилиндрических, параболических структур, серии вертикальных пластов, вертикального контакта), что обеспечивало высокую скорость расчета. Другие специалисты использовали численные методы. К.М.Ермохин предложил подбирать локальные объекты совокупностью кубиков, поле каждого из них аппроксимируется дипольным источником. На этой основе и на идеях А.В.Цирульского группой специалистов ВИРГ-Рудгеофизика разработан двухэтапный метод интерпретации данных электроразведки методами постоянного тока, ВП и ЕП, получаемых при съемках с установками СГ, ТЗ и с установками с произвольным положением питающих и приемных электродов.

В двухэтапном методе на первом этапе наблюдаемое поле после внесения соответствующих поправок аппроксимируется полем некоторой совокупности сингулярных источников, а на втором этапе решается "теоретическая обратная задача" (ТОЗ), когда для заданных источников строятся семейства тел, эквивалентных по создаваемому ими внешнему полю.

Первый этап. Аппроксимация наблюдаемых полей полем совокупности сингулярных источников.

Ставится задача обнаружения неизвестных локальных объектов в известной вмещающей среде. Внешний по отношению к аномальному объекту потенциал, создаваемый точечными источниками, расположенными на поверхности кусочно-однородной среды, представляет собой совокупность первичного потенциала точечных источников, потенциалов, создаваемых известными структурными неоднородностями вмещающей среды, и потенциала, создаваемого искомыми аномальными телами. В качестве источников, аппроксимирующих аномальные поля используется система диполей, помещенных в заданную вмещающую среду, что позволяет одновременно определять совокупность источников, учитывая при этом и их взаимовлияние. Это можно осуществить с помощью алгоритма подбора, путем минимизации невязки экспериментального и теоретического полей. Цель решения задачи состоит в том, чтобы найти совокупность диполей, которые при наименьшем их числе обеспечат заданную точность аппроксимации исходных данных. Задав вначале один диполь, минимизируют функционал невязки, определяя при этом координаты диполя и его момент. Если достигнутая точность подбора не устраивает, количество диполей увеличивают, и процесс повторяется.

Второй этап. Решение теоретической обратной задачи. На втором этапе уже предполагается, что вне аномальных тел поле или его потенциал известны аналитически, как поле совокупности дипольных источников, помещенных в заданную среду. Так как при формальном подборе, как правило, заранее не известно поле скольких аномальных тел описывают найденные диполи, и какие из них относятся к конкретному телу, у интерпретатора есть возможность проверить различные гипотезы объединения диполей в группы, соответствующие отдельным телам. Каждая из таких гипотез в одинаковой степени не противоречит наблюдаемому полю, и лишь привлечение дополнительной информации сможет помочь отдать предпочтение какой-нибудь из них.

Основная неопределенность остается при данном подходе на первом этапе (аппроксимации модели). Второй этап должен быть строго детерминирован. Ответ на вопрос о единственности решения ТОЗ зависит от класса объектов, в котором оно ищется. Если внутри локального объекта нет источников тока, то можно показать, что решение ТОЗ единственно. Если источник тока попадает внутрь тела (метод заряда) -

единственности нет. Зафиксировав величину электропроводности однородного аномального объекта, можно единственным образом построить его поверхность. Меняя электропроводность, можно получить семейство поверхностей объектов, создающих эквивалентные поля. В наблюдаемом поле не содержится сведений о том, какому из объектов семейства следует отдать предпочтение. Такую информацию могут дать геологические представления о строении среды, данные других геофизических методов и т.п.

Двухэтапный метод был практически реализован в виде серии программ интерпретации потенциальных электрических полей:

Решение обратной задачи электроразведки для случая горизонтальной дневной поверхности. Для решения обратных задач в случае однородного полупространства был разработан комплекс программ "Подбор" с дополнительными обозначениями 2, 3, ПТ, ВП. Число, входящее в название, обозначает размерность решаемой обратной задачи. Программы с аббревиатурой ПТ позволяют определять элементы залегания локальных объектов, отличающихся от вмещающей среды по электропроводности, а программы с аббревиатурой ВП - только по поляризуемости (рис.20,а).

Решение обратной задачи электроразведки при наличии неровного рельефа. Для этого случая разработан модифицированный способ двухэтапного решения обратной задачи (Петров, Федоров, 1989), предполагающий одновременный учет влияния рельефа как на первичные, так и на вторичные поля (рис.20,б).

Алгоритм решения обратной задачи состоит из трех основных частей.

1. Определение значений аномального потенциала на поверхности наблюдения, путем вычитания из наблюдаемого поля нормальной составляющей.

2. Аппроксимация аномального потенциала потенциалом диполей. Часть поля, обязанная своим происхождением дневной поверхности, вычисляется как аналитическое продолжение с неровной поверхности заданного потенциала в область, не имеющую особенностей.

3. Построение поверхности аномального объекта. Этот этап полностью аналогичен построению в случае ровного рельефа. Этот алгоритм реализован в программе "Рельеф-2-ПТ".

Решение обратной задачи электроразведки при наличии проводящих наносов. Подобное решение используется для интерпретации электроразведочных данных при поисках локальных объектов, полученных над двухъярусными структурами. Схема реализована в комплексе программ, в состав которого входят программы вычисления параметров системы аппроксимирующей влияние проводящих наносов и программа "Наносы-2-ПТ", в которой осуществляется решение двумерной обратной задачи с использованием найденной аппроксимации (рис.20,в).

На основе решения двумерных обратных задач программы позволяют получить в первом приближении контуры аномальных объектов в однородном полупространстве, как с ровной дневной поверхностью, так и при наличии рельефа, и в двухслойной проводящей среде с плоскопараллельными границами. При интерпретации полевых данных эти программы могут использоваться для качественных оценок элементов залегания локальных аномальных объектов. Для более точных количественных оценок могут применяться программы, реализующие решение 2.5 и 3-х мерных прямых и обратных задач.

Поиск новых приемов интерпретации специально предназначенных для многоэлектродных зондирований привел к появлению двух алгоритмов: 2D трансформации данных (Loke, Barker) и количественной 2D интерпретации (Ch.Stoyer, Interpex Ltd.). Достоинство первого подхода - высокая скорость работы. Достоинство второго - более строгая постановка задачи, а недостаток - длительное время интерпретации.

Алгоритм Локе и Баркера (1995). Этот алгоритм в последние годы завоевал широкую известность. Он является самым быстрым алгоритмом инверсии данных, полученных по методике Resistivity Tomography. Основан на инверсии данных по методу наименьших квадратов, и с его помощью можно получить 2D модель разреза, свободную от искажений, присущих разрезу ρ_k и связанных с положением токовых электродов. Кроме того, данная процедура сравнительно малочувствительна к случайному шуму в

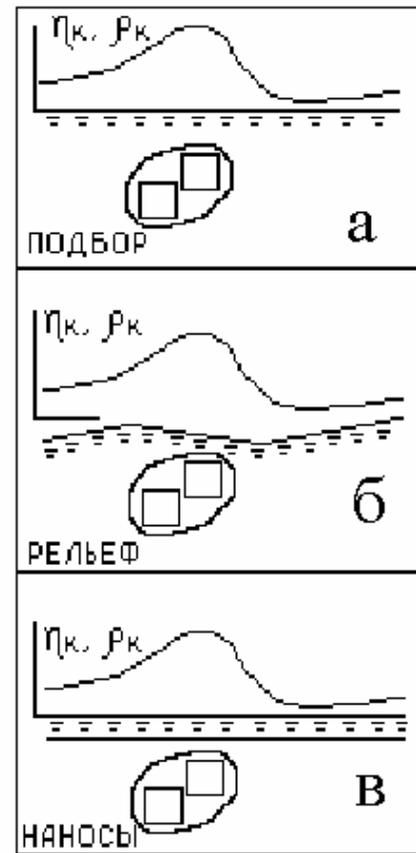


Рис.20. Схематические модели для программ "Подбор", "Рельеф" и "Наносы"

данных. Авторы назвали эту методику *деконволюцией на основе метода наименьших квадратов*, потому что этот алгоритм разделяет аномалии значений ρ_k , вызванные геометрией установки и аномалии, вызванные распределением истинных сопротивлений в геоэлектрическом разрезе. Модель разреза состоит из блоков одинакового размера в пределах каждой горизонтальной полосы. С глубиной размеры блоков могут возрастать, но таким образом, что более крупные блоки как бы являются объединением нескольких мелких. В процессе инверсии число, положение и размеры блоков не меняются, подбираются только их свойства. В качестве стартовой модели используется модель однородного полупространства, для которой частные производные кажущегося сопротивления могут быть рассчитаны аналитически. Ряд допущений сделанных в алгоритме для максимального ускорения вычислений предполагает плавное и неконтрастное изменение сопротивлений. В разрезах с резкими изменениями сопротивлений правильность работы алгоритма не гарантируется.

Обычно полевые результаты представляют в форме псевдоразреза ρ_k , который дает весьма наглядное представление об изменении сопротивлений на глубине. Однако формы контуров аномалий электрического поля зависят не только от распределения сопротивлений, но также и от расположения приемных и питающих электродов используемой установки. Даже для простого прямоугольного тела, разрезы кажущихся сопротивлений для разных установок могут сильно различаться.

Алгоритм инверсии может быть разделен на три основных шага. Первый шаг - вычисление значений ρ_k для рассматриваемой модели. Это обычно выполняется с помощью метода конечных разностей или метода конечных элементов. Второй шаг - вычисление матрицы (Jacobian) частных производных. Третий шаг - решение системы линейных уравнений относительно поправок в параметры модели. Авторы добились резкого увеличения быстродействия алгоритма за счет предварительного вычисления матрицы частных производных, сохраняемой затем на диске. При расчете матрицы сделано допущение, что матрица не зависит от свойств блоков, а только от их геометрии. Так как геометрия в процессе подбора не меняется, то пересчет матрицы не требуется. Быстродействие алгоритма позволяет вести интерпретацию двумерного разреза для одной расстановки (50-130 электродов) за несколько секунд, что является очень важной особенностью алгоритма. Недостаток состоит в том, что слишком сильные допущения, позволившие создать столь быстродействующий алгоритм, редко выполняются на практике. Программа работает автоматически и не способна воспринимать и учитывать априорную информацию. Поэтому модели, получаемые с ее помощью не всегда соответствуют реальной среде.

Программа для 2D интерпретации фирмы Interpex Ltd. Фирма Interpex Ltd. распространяет программы интерпретации для многих геофизических методов и в том числе для электрических зондирований. Весной 1996 г. Interpex объявила о выпуске программы Resix IP2D1.v3, для решения прямых и обратных задач метода сопротивлений и ВП для 2D моделей. Прямая задача считается с помощью метода конечных элементов (Luiz Rijo, 1977). Программа считает 2D модели, имеющие в сечении форму многоугольников, для достижения наилучшего совмещения с псевдорезами ρ_k используется алгоритм инверсии по Inman (метод хребта - Ridge regression). Пользователь должен создать модель начального приближения из многоугольников (это удобно осуществить с помощью мыши). В пределах каждого многоугольника электрические свойства постоянны. С помощью алгоритма инверсии можно добиться наилучшего совмещения экспериментального и теоретического полей. Можно задавать до 100 тел и до 1000 угловых точек в каждом многоугольнике. Можно вести оптимизацию всех параметров модели (геометрических координат и свойств многоугольников), а можно зафиксировать часть параметров, чтобы быстрее подбирать остальные. Могут быть зафиксированы известные по данным бурения или по замерам электрических свойств параметры.

Программа позволяет ввести в данные ρ_k поправку за рельеф путем расчета эффекта рельефа для однородного полупространства и деления наблюдаемого поля на рассчитанные эффекты от рельефа.

Детальность сетки метода конечных элементов зависит от числа питающих электродов и числа разносов. Сетка создается сначала автоматически, но может быть отредактирована (разрезана или сгущена) по желанию пользователя. Отчетная графика состоит из экспериментального и теоретически рассчитанного псевдорезов и модели, и может быть в градациях серого или в цвете по желанию пользователя. (Interpex Software Catalog, 1986)

На наш взгляд, оба перечисленных выше подхода недостаточно учитывают или игнорируют роль геологических помех. Алгоритм Локе и Баркера может интерпретировать данные с геологическими помехами, попутно снимая их искажающее влияние, но имеет серьезные ограничения на контрастность среды. Кроме того, не используя априорную информацию, метод может дать одно из эквивалентных решений, далекое от реальности. Алгоритм фирмы Interpex Ltd. может учесть влияние геологических помех, если они заложены в модель, но такая модель окажется перегруженной мелкими телами, снижающими скорость интерпретации. Мы считаем, что наиболее эффективным должен оказаться подход, при котором влияние геологических помех сначала (до интерпретации) исключается из экспериментального поля, а затем

уже производится интерпретация. Это позволит упростить модель и резко повысить скорость алгоритма инверсии.

Для подавления помех нами разработаны две процедуры, базирующие на несколько разных принципах и реализованные в виде программ: МРС (на базе сингулярного разложения матрицы ρ_k для псевдоразреза) и Median (на базе свойства регулярности геологических помех и алгоритма медианной полировки для их устранения).

Способы исключения искажений, вызванных ППН

Для удаления Р-эффекта может быть использовано несколько процедур: 1) ручная визуальная нормализация (приведение всех кривых к одному выбранному заранее уровню по одному, общему для всех кривых ВЭЗ участку кривых; 2) статистическая нормализация на основе метода главных компонент (алгоритма МРС); 3) статистическая нормализация на основе алгоритма медианной полировки. Для удаления С-эффекта может эффективно использоваться алгоритм МРС и медианная полировка.

Метод главных компонент (алгоритм МРС) является одной из форм факторного анализа - широко известного в статистике. Факторный анализ часто используется для обработки многомерной статистической геофизической информации. Метод главных компонент (МГК) позволяет разложить поля признаков на линейно независимые компоненты по степени возрастания дисперсии. При этом геофизические аномалии могут быть выявлены на одной или нескольких компонентах, если в этих компонентах удастся разделить функции распределения от изучаемых объектов. Весьма доходчиво и подробно основы МГК изложены в книге Дж. Дэвиса (1990). Впервые Р. Венцалек в диссертационной работе (1991). использовал его для анализа разрезов кажущегося сопротивления, полученных над двумерными геоэлектрическими структурами. Венцалек ограничился лишь общей констатацией некоторых особенностей аномального поля, не связывая их проявления с определенными типами искажений кривых ВЭЗ.

В применении к вертикальным электрическим зондированиям идею метода МГК можно сформулировать следующим образом. Пусть на профиле наблюдений зарегистрированы значения кажущегося сопротивления на N разносах и M пикетах. Будем считать совокупность значений кажущегося сопротивления на каждом разносе за отдельный признак. Тогда каждый пикет будет выглядеть как точка в N -мерном пространстве, и у нас будет M таких точек. Границы области распространения точек в N -мерном пространстве примерно описываются N -осным эллипсоидом. Задача МГК - повернуть оси координат так, чтобы они были направлены вдоль осей N -осного эллипсоида. Тогда проекции точек на новые оси нам дадут независимые, некоррелируемые параметры, которые и называются *главными компонентами*. Для того чтобы новые значения имели физический смысл, их проецируют на старые оси и получают величины, похожие на исходные поля. При этом первой компонентой можно считать проекции на первую ось исходных параметров. Сумма всех главных компонент дает нам исходное поле (в данном случае разрез кажущегося сопротивления). При отбрасывании компонент высокого ранга, дающих небольшой вклад в общую дисперсию поля, МГК работает как метод пространственной низкочастотной фильтрации, при которой максимально сохраняется форма низкочастотной составляющей, а высокочастотные аномалии эффективно подавляются. Экспериментальные исследования показали, что подавляющая часть информации о геоэлектрическом разрезе содержится в первых двух-трех компонентах. Остальные компоненты связаны с помехами (как со случайными ошибками, так и с аномалиями от питающих электродов, С-эффектом). Отбрасывание высокочастотных компонент приводит к сглаживанию экспериментального поля.

В течение ряда лет метод главных компонент активно использовался для подавления С-эффекта и низкочастотного сглаживания разрезов кажущегося сопротивления. Программа МРС хорошо зарекомендовала себя в разнообразных геологических условиях (Крымская геологическая база МГУ, Подмосковье, Поволжье, Краснодарский край и Донецк). Во всех этих случаях заметно устраняется С-эффект и достаточно уверенно восстанавливается одномерный геоэлектрический разрез. Для этого необходимо на завершающей стадии обработки перед интерпретацией после МРС произвести объединение двух разрезов AMN и MNB в разрез AMNB путем суммирования.

Алгоритм медианной полировки был предложен Дж. Тьюки (1981), а для обработки профильных данных ВЭЗ использован Е.В. Перваго. Этот алгоритм позволяет эффективно удалять из разрезов кажущихся сопротивлений как С, так и Р-эффекты. Величины Р и С - эффектов могут быть оценены отдельно для каждого пикета профиля и представлены в виде отдельных графиков. Данный алгоритм разделяет эффекты от неоднородностей, выходящих непосредственно на поверхность, находящихся на глубине, и влияние горизонтально-слоистой составляющей разреза. Работа алгоритма основана на свойстве регулярности проявления эффектов от этих составляющих. Программа сравнивает выборки из экспериментального поля, взятые для одного пикета по всем разносам, для одного разноса по всем пикетам, и выборку вдоль оси проявления С-эффекта, - с аналогичными выборками. Если данная выборка имеет систематический сдвиг в уровне ρ_k по отношению к соседним, это свидетельствует о регулярности соответствующего эффекта. Фактически алгоритм разделяет суммарное поле на основные составляющие:

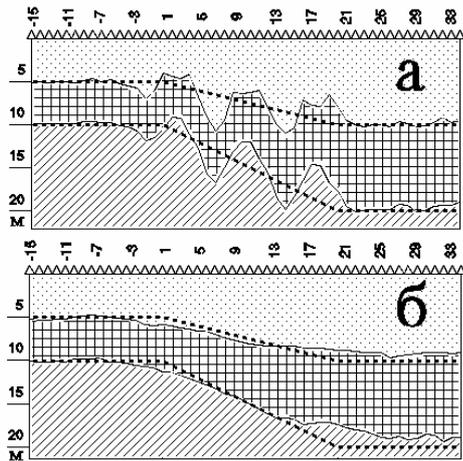


Рис.21 Сравнение результатов 1D интерпретации ВЭЗ для модели с рис.10 до (а) и после (б) обработки

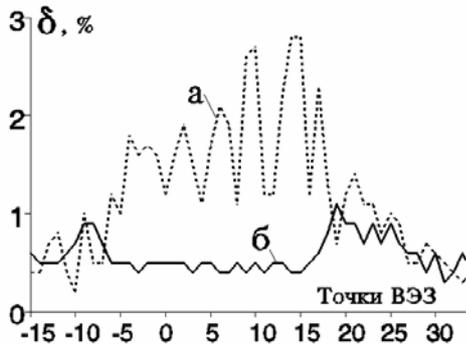


Рис. 22 Среднеквадратические погрешности интерпретации ВЭЗ до (а) и после (б) обработки.

обработки для всех точек ВЭЗ по профилю показаны на рис.22. Как на теоретических моделях, так и на большом экспериментальном материале нами установлено, что после обработки заметно снижается погрешность интерпретации, причем наиболее заметно там, где находились ППН (рис.22, Пк -5-+20).

Практический пример. Продемонстрируем методику измерений и обработки ВЭЗ в неоднородных средах на примере материалов учебной практики студентов на Крымской базе геологического факультета МГУ. Участок профиля длиной около 300 м изучен двусторонними трехэлектродными зондированиями (AMN и MNB) с шагом ВЭЗ по профилю 10 м. Разносы АО от 2 до 20 м возрастали с шагом 2 м, а с 20 до 100 м с шагом 10 м. Участок представляет собой грабенообразную структуру, в

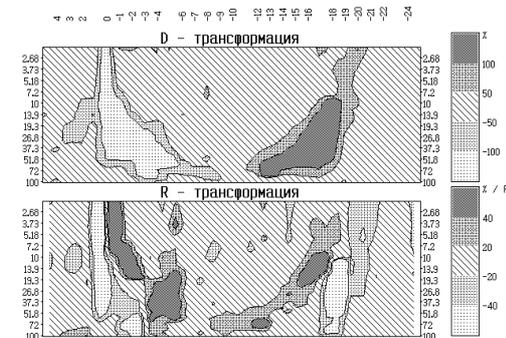


Рис.24 D-трансформация псевдоразрезов ρ_k , г.Придорожная.

эффекты от горизонтально-слоистой структуры, от неоднородностей вблизи движущихся и неподвижных элементов установки и случайные помехи. После разделения каждая составляющая очищается от случайных помех, а эффекты от неоднородностей разделяются на поверхностные и глубинные по характеру их проявления в поле ρ_k .

Работая в стандартном режиме программа затем вновь собирает (восстанавливает) поле ρ_k из составляющих: очищенных от случайных помех и эффектов от ППН. В расширенном режиме программа сохраняет все составляющие поля в отдельных файлах и может собрать их в любом сочетании, определяемом пользователем.

Таким образом, методика обработки программами MPC и Median в пакете IPI-2D позволяет выявить эффекты искажений приповерхностными неоднородностями и удалить их, увидеть глубинные неоднородные объекты и выделить составляющую горизонтально-слоистого разреза. Слоистый разрез может быть подвергнут количественной 1D интерпретации. Глубинные объекты могут быть промоделированы с помощью расчета прямой задачи для 2D модели, включающей как эти неоднородности, так и слоистый разрез.

Модельный пример. Если модельные данные ρ_k из примера на рис.10-11 преобразовать к установке AMNB и осуществить 1D интерпретацию, то форма границ окажется сильно искаженной (глубинная структура изучается как бы через разбитое стекло) (рис.21,а). Если же выполнить фильтрацию искажений, то одномерная интерпретация воспроизведет структуру модели с существенно большей точностью (рис.21,б). Дополнительной оценкой качества обработки может являться величина среднеквадратической погрешности интерпретации кривых ВЭЗ (невязка). Графики таких погрешностей до и после

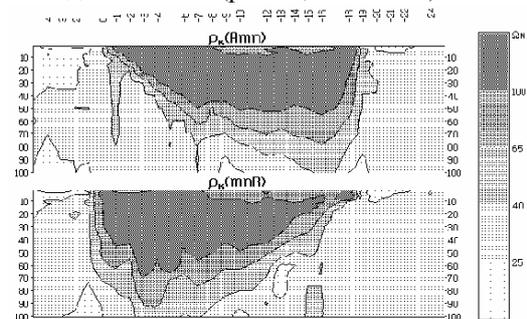


Рис.23. Разрезы ρ_k для AMN и MNB установок. Участок - г. Придорожная

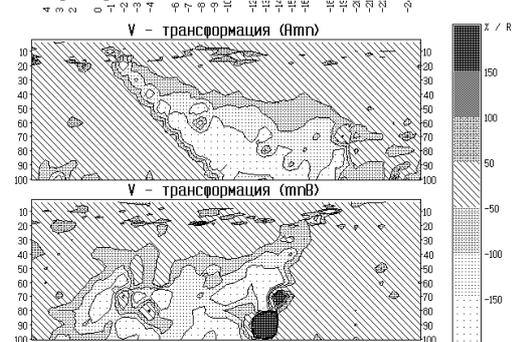


Рис.25. V-трансформация псевдоразрезов ρ_k , г.Придорожная.

которой тело известняков, слагающих г.Придорожную, ограничено двумя субвертикальными разломами. Вмещающий разрез сложен мергелями.

Разрезы кажущихся сопротивлений (рис.23) очень выразительно представляют эту структуру. Хорошо заметна разница между разрезами AMN и MNB (рис.24). На разрезах вертикальных производных (рис.25) видно, что основными источниками искажений являются два разлома на Пк 0 и Пк-18, причем наклон наиболее резких зон под углом 45° восемь свидетельствует о наличии сильного С-эффекта. Наиболее ярко С-эффект проявляется, когда питающий электрод переходит из высокоомного блока известняков в более проводящие мергели, поэтому для AMN он проявляется на Пк 0 (электрод А идет влево), а для MNB - на Пк-18 (электрод В - вправо).

Одномерная интерпретация как трехэлектродных кривых, так и полученных из них суммированием четырехэлектродных симметричных зондирований без подавления искажений не дает удовлетворительных результатов в силу значительных искажений полевых кривых горизонтальными неоднородностями.

Наилучшие результаты удалось получить с помощью следующей методики обработки. Данные трехэлектродных зондирований (AMN и MNB отдельно) обработали с помощью программы компонентного анализа (MPC) для подавления высокочастотных помех и уменьшения влияния искажений. После этой процедуры на разрезах ρ_K трехэлектродных ВЭЗ практически без искажений видна геологическая структура, что отмечается по возросшему сходству разрезов кажущегося сопротивления для установок AMN и MNB. Различия остались лишь на 20-метровых участках вблизи краев структуры (Пк 0-2 и -16-18). После суммирования результатов компонентного анализа для AMN и MNB получается разрез ρ_K , наилучшим образом соответствующий априорным данным по этой структуре. Косвенной оценкой работы алгоритма компонентного анализа может служить ошибка совмещения интерпретируемых кривых ВЭЗ с теоретическими. Для кривой ВЭЗ с Пк -3, например, до обработки она была равна 13,7%, а после обработки - 1,4%.

На рис.26,а показан геоэлектрический разрез по результатам одномерной интерпретации ВЭЗ на г.Придорожная. Этот разрез был использован как модель для расчета теоретического двумерного поля ρ_K по программе IE2DL. После некоторой коррекции получена 2D модель (рис.26,б) для которой теоретически рассчитанный разрез ρ_K , весьма близок к исходному.

С 1991 г. нами отработано более 20 объектов со средним объемом в 200 зондирований на каждом объекте. В основном работы проводились в условиях городов и крупных промышленных объектов: на участках с нарушенным поверхностным слоем, создающим высокий фон геологических помех. Благодаря методике СЭЗ и использованию процедур подавления геологических помех во всех случаях удалось успешно решать задачи детального исследования геологического разреза.

Принципы томографии при изучении неоднородных сред с использованием методов постоянного тока

Томография - это процесс восстановления разреза по данным на его границах. Однако, говоря о томографии в электроразведке, необходимо отметить две основные проблемы: в отличие от томографии, основанной на волновых явлениях, лучевой подход неприменим в методе сопротивлений. Кроме того, должны учитываться эффекты вмещающего разреза.

В томографии методом сопротивления используется потенциальное поле, поэтому она значительно отличается от других типов геотомографий, основанных на волновых явлениях. В них проекционные данные отражают распределение физических свойств вдоль волнового луча, а в томографии методом сопротивления на полученные данные влияет распределение сопротивлений в довольно большой области. Таким образом, структуры, лежащие вне области изучения, могут значительно влиять на результаты интерпретации. Результаты наблюдений обычно искажены из-за влияния неоднородностей рельефа, или шахтных выработок при подземных исследованиях. Зачастую трудно учесть такие искажения при интерпретации, поэтому необходимо провести предварительную компенсацию. Для этого используется математическое 2.5D моделирование рельефа методом конечных элементов или методом интегральных уравнений, результаты которого вычитаются из наблюдаемого поля.

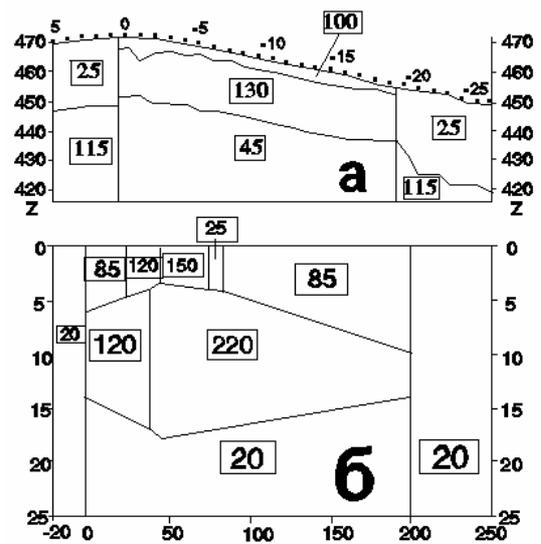


Рис. 26 Геоэлектрические 1D и 2D модели г.Придорожной

Результаты интерпретации сложно связаны с распределением сопротивления как внутри области моделирования, так и вне ее. При интерпретации необходимо учитывать вмещающий разрез. Численное моделирование, проведенное Н. Shima (1992), показало, что нужно учитывать объем среды примерно на 40% больше (во все стороны), чем изучаемая томографией область.

Векторные измерения и их обработка

Первичное и вторичное электрические поля, сумму которых мы измеряем в методе сопротивлений являются векторными величинами, т.е. имеют X-составляющую (относительно направления на источник тока) и перпендикулярные ей Y и Z составляющие. Последняя может быть измерена при наблюдениях в подземных условиях (рис.27).

Идея векторных измерений электрического поля не нова. Например, В.А.Комаров, Л.М.Иоффе и М.В.Семенов выполнили векторную съемку ВП еще в 1954 г. С тех пор накоплен некоторый опыт исследований на постоянном токе. Однако во многих монографиях, посвященных методу сопротивлений (в том числе в "Справочнике геофизика. Электроразведка" и в "Справочнике по шахтной и скважинной геофизике"), этот вопрос обойден молчанием. Поэтому для практиков векторная съемка остается до сих пор мало используемым видом работ. По нашему мнению, два момента сдерживали развитие этого направления: 1) отсутствие серийной аппаратуры, с помощью которой можно вести такую съемку; 2) отсутствие аппарата интерпретации векторных измерений. Широко используемая в России низкочастотная аппаратура АНЧ-3 или ЭРА не имеют возможности измерять знак сигнала, который очень важен для Y-компоненты, а для X - не имеет особого значения. (В 1996 г. начала выпускаться ЭРА-В-Знак с возможностью оценки знака сигнала.) Y-компонента довольно чувствительна к ошибкам в углах ориентации линии MN. Практические неудобства перемещения по профилю и точной установки линии MN для измерения Y-компоненты многим кажутся более существенными, чем выигрыш от ее измерения. При обычной наземной съемке, когда с помощью линейных установок изучаются слоистые и квазислоистые толщи, компонента поля E_y часто отсутствует, хотя при измерениях вблизи двумерных и трехмерных объектов эта компонента поля может быть сравнима по величине с главной компонентой E_x . Но и в этих случаях векторным измерениям часто предпочитают площадные с линейной установкой. Убедленным сторонником измерения двух составляющих при наземной электроразведке в течение многих лет был А.Н.Боголюбов и его сотрудники (Боголюбов и др., 1984). При проведении работ в городах нередко возникают затруднения с размещением систем наблюдений. Площади, занятые асфальтом и зданиями, намного превышают площади скверов и газонов вдоль тротуаров улиц. В таких условиях задача получения максимальной информативности от наблюдений на ограниченной свободной площади становится совершенно естественной, и векторные наблюдения должны занять соответствующее им место. При выполнении обычных профильных или площадных наблюдений результаты измерений относят к объему среды под профилем или точками площади. Векторные наблюдения помогают увидеть объекты находящиеся в стороне от профиля или иной системы наблюдений. Источник тока можно сравнить с направленным лучом фонарика, освещающего объект. Векторные наблюдения помогают приблизить эту аналогию к реальности, способствуя восстановлению местоположения и формы границы раздела, "освещаемой лучом" от источника тока. При исследованиях в шахтах (внутри массива горных пород), вблизи неоднородностей характер электрического поля становится настолько сложным, что интерпретация таких полей без векторных измерений едва ли возможна. За счет обтекания током геоэлектрических неоднородностей отдельные компоненты поля могут резко меняться даже на небольшом расстоянии. Связь с разрезом кажущегося сопротивления, определенного по измерению одной компоненты E_x , может быть очень сложной. Это можно объяснить тем, что обычно при расчете ρ_k нормировку наблюдаемого поля ведут относительно той компоненты плотности тока, вдоль которой измеряют электрическое поле $\rho_k = E_x / J_{0,x}$. В неоднородных средах аномальная часть поля $E_{ан,x}$ может быть во много раз больше первичного поля $E_{0,x}$ и не совпадать с ним по знаку. В результате кажущееся сопротивление может принимать отрицательное значение, а по величине во много раз превосходить удельное сопротивление вмещающей среды.

Такие ситуации сплошь и рядом бывают при шахтных исследованиях. Однако очень часто они остаются незамеченными, так как измерения проводятся без учета знака сигнала на приемных электродах (при работах используется аппаратура низкой частоты). В результате такие работы лишь сигнализируют об аномальном объекте где-то рядом с шахтой, но его свойства и геометрию по модулю одной из компонент поля определить чрезвычайно сложно. Они лишь больше увеличивают неопределенность, чем дают какую-

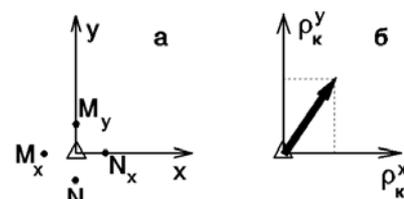


Рис. 27. Векторное представление кажущегося сопротивления.

то новую информацию. Именно наблюдения в горных выработках особо нуждаются в векторных измерениях в силу резко сокращенного пространства, где можно проводить возбуждение и измерение поля.

По нашему мнению, с помощью векторной съемки, т. е. измерения сразу нескольких компонент электрического поля и с учетом знака принимаемого сигнала, может быть существенно повышена эффективность наземной и подземной электроразведки. Рассмотрим, какие преимущества это может дать. Во-первых, мы получаем более полную картину распределения электрического поля в среде. Во-вторых, с помощью векторных представлений можно значительно улучшить интерпретацию полевых материалов. Нами для интерпретации векторных наблюдений в наземных и подземных условиях опробован способ построения аномальных векторов.

Способ построения аномальных векторов

Известно, что при возбуждении электрического поля в неоднородной среде наряду с первичными источниками тока на внешних и внутренних границах индуцируются вторичные источники. Как раз такую ситуацию описывает метод интегральных уравнений (Электрические зондирования..., ч.1, 1988):

$$E_n^\Sigma(M) = E_n^0(M) + \int_S I_s(P) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dS,$$

где E_n^0 - первичное поле, E_n^Σ - полное поле, а

Данное выражение является интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода

относительно интенсивности вторичных источников. Первое слагаемое - поле первичных источников, второе слагаемое описывает поле взаимодействия

$$I_s(M) = 2 \frac{\rho_i - \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \cdot E_n^{Bn}(M).$$

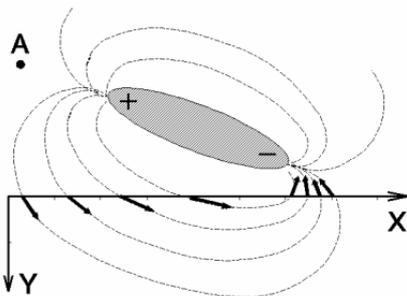


Рис.29. Поведение аномальных векторов ρ_k вблизи неоднородности

вторичных источников между собой, I_s - плотность источника в точке M , лежащей на поверхности тела, $E_n^{Bn}(M)$ - поле всех внешних источников в точке M .

Предположим, что мы каким-то образом сумели вычестить влияние первичного поля из суммарного наблюдаемого поля (это можно сделать, если известен вмещающий слоистый геоэлектрический разрез). Тогда *остаточное поле будет связано только с источниками на*

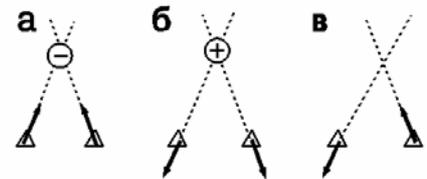
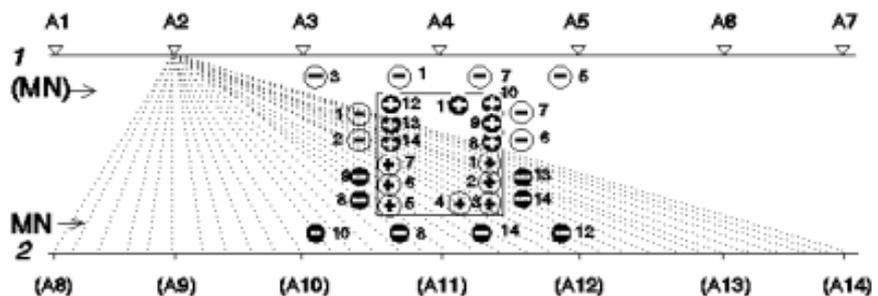


Рис.28. Схождение и расхождение векторов поля

неоднородностях.

Аномальные вектора располагаются строго в соответствии со структурой аномального электрического поля. Векторы сходятся к отрицательным источникам и расходятся от положительных. Таким образом, если продолжить два вектора, то они где-то пересекутся. Точка пересечения в самом грубом линейном приближении располагается вблизи эпицентра вторичного источника (рис.28). Если построить группу векторов, то часть из них будет



Условные обозначения:
 Вторичные источники при положении питающего электрода на профиле 1: \ominus - отрицательный, \oplus - положительный, $\ominus 5$ - вторичный источник для питающего электрода A5
 на профиле 2: \ominus - отрицательный, \oplus - положительный

Рис.30. Моделирование векторной съемки при межшахтном просвечивании

направлена к одному источнику, а другая - к источнику противоположного знака. На рис.29 схематически показана структура векторов ρ_k вблизи вытянутой высокоомной неоднородности, которая как бы подсвечивается питающим электродом А. Действительно, та часть тела, которая обращена в сторону первичного источника выталкивает электрический ток, который обтекает ее с внешней стороны. Такая ситуация эквивалентна тому, что на левом конце неоднородности располагаются положительные заряды. С противоположной стороны неоднородности на поверхности расположены отрицательные источники.

Если мы продолжим векторы и найдем все точки их взаимного пересечения, то эти точки лягут в какой-то компактной области вблизи эпицентров вторичных источников. Разделим всю область на квадраты, внутри которых подсчитаем количество взаимных пересечений векторов с учетом знака. Отнесем количество пересечений к центру квадрата. Тогда можно построить псевдотомограмму (карту) распределения вторичных источников в плане.

С помощью программы трехмерного моделирования IE3R1 была решена следующая задача (рис.30): две горизонтальные горные выработки длиной 145 м располагаются на большой глубине параллельно друг другу на расстоянии 30 м, между ними находится неоднородность в виде куба со стороной 20 м. Работы проводятся с помощью просвечивания: сначала питающий электрод А проходит по одному штреку с шагом 25 м, а регистрация идет в другом штреке. Затем положение питающих и приемных электродов меняется. На рис.31 показано "распределение" вторичных токовых источников, когда питающий электрод находится в точке A_1 . Максимум и минимум на псевдотомограмме отмечен специальными значками. Если теперь на одной картинке собрать все максимумы и минимумы, которые получаются при разных положениях токовых электродов, то достаточно уверенно отрисовывается проводник, расположенный между штреками (см. рис. 30).

Основная идея подобной обработки состоит в том, что вторичные источники (заряды) концентрируются на поверхности неоднородности в зависимости от расположения токовых электродов. Можно оспаривать правильность и точность векторных построений, можно предлагать другие способы определения положения и интенсивности вторичных источников, но трудно не признать, что векторные измерения открывают новые возможности проведения работ и интерпретации материалов электроразведки. С помощью векторной съемки из одного штрека можно определять положение неоднородностей выше, ниже или в стороне от горной выработки.

Пример наземной векторной съемки. Летом 1993 г. авторы впервые опробовали методику векторной съемки применительно к гидрогеологическим задачам при наземных исследованиях в г.Донецке.

Для проведения работ была модернизирована аппаратура АНЧ-3. В результате на измеритель по двухжильному проводу стал подаваться опорный сигнал с генератора для определения фазы (полярности) измерительного сигнала.

Второй особенностью этих исследований было то, что они сильно походили на ситуацию, связанную с шахтными работами (междушахтное просвечивание с целью изучения выемочного ствола). Изучалась обводненность горных пород под фундаментом нового жилого двухсекционного дома по ул. Пухова, 7. Наблюдения могли быть проведены только по двум профилям с двух разных сторон от дома, в пределах вытянутых вдоль строения газонов (рис.32).

Проблема дополнительного укрепления фундамента дома возникла после начала строительства. До строительства на территории всего микрорайона институтом УкрНИМИ были проведены детальные геолого-геофизические исследования с целью

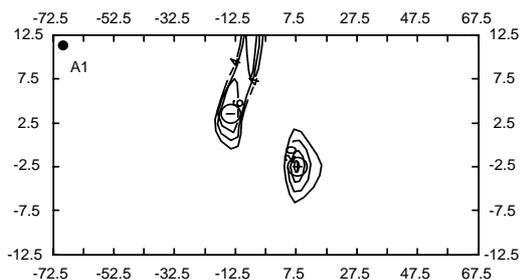


Рис.31. Псевдотомограмма распределения вторичных токовых источников для модели с рис.30.

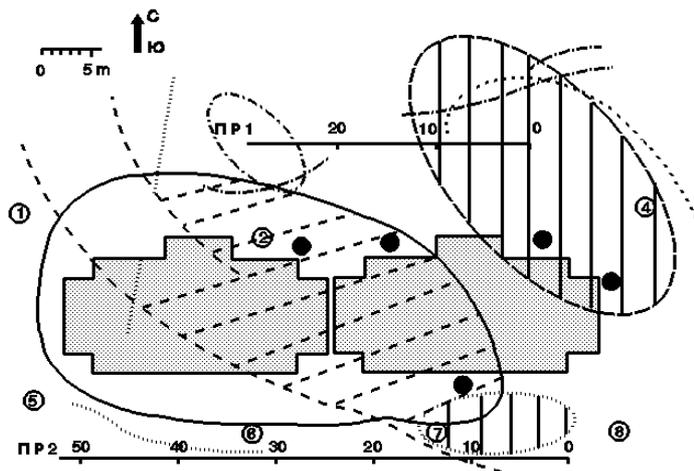


Рис.32. Результаты векторной съемки, проведенной в 1993 г.

выявления старых горных выработок под проектируемыми фундаментами зданий на глубинах от 10 до 50 м. В результате были сделаны рекомендации для проведения тампонажных работ, предназначенных для цементации основания. На территории микрорайона перед началом заложения фундаментов домов было пробурено свыше 200 скважин (около 20 - 30 скважин под каждый дом) и проведено тампонирование подземных пустот водно-цементным раствором. После завершения этих работ началось возведение зданий. После строительства дома со всей очевидностью проявились недостатки проведенных работ по укреплению грунтов. Одна из секций этого дома испытала неравномерное катастрофическое проседание и теперь налегает на другую его секцию. На взгляд геологов эта ситуация вызвана разубоживанием грунтов при тампонировании цементным раствором, в котором преобладала вода.

Геологическая ситуация. На площади работ наблюдается моноклиальное падение коренных пород каменноугольного возраста на север под углом около 10°. Сверху залегают современные отложения мощностью около 2 м, которые подстилаются слоем суглинков мощностью до 10 м. Ниже располагается аргиллито-алевролитовая толща мощностью 5 - 10 м. На глубине 8 - 15 м залегают угольный пласт, над и под которым расположены слои песчаников мощностью около 1 - 2 м.

Методика работ. Работы проводились по методике векторной съемки электрического поля постоянного тока с трехэлектродной установкой AMN. Электрод В относился в "бесконечность". Однако при расчете нормального поля его влияние формально учитывалось, как поле удаленного на определенное расстояние питающего точечного электрода. Поле электрода А рассчитывалось как поле вертикального линейного электрода, имеющего верхнее и нижнее ограничение в зависимости от уровня воды в скважине.

Измерения проводились по двум профилям (см.рис.32). При этом профиль 1 располагался севернее дома, профиль 2 - южнее. Шаг по профилю наблюдений составлял 1 м. Длина линии MN - 5 м. Разности потенциалов dU_x и dU_y измерялись двумя взаимно перпендикулярными линиями MN с учетом знака сигнала в измерительной линии.

Обработка полевых материалов. Обработка велась по следующему алгоритму. Сначала рассчитывались компоненты электрического поля: $E_x = \Delta U_x / MN_x$; $E_y = \Delta U_y / MN_y$

Затем производилась нормировка компонент поля для учета сферического расхождения тока в однородном полупространстве: $\vec{\rho}_k = E / \|J_0\|$.

Модуль плотности первичного тока рассчитывался по формуле: $\|J_0\| = \sqrt{J_{0,x}^2 + J_{0,y}^2}$

В дальнейшем к полученной кривой по профилю для каждого положения источника подыскивалось такое сопротивление среды ρ , которое обеспечивало минимальную невязку между экспериментальными и теоретическими значениями модуля кажущегося сопротивления: $\vec{\rho}_k^{an} = \arg \min \|\vec{\rho}_k^{набл} - \vec{\rho}_k^{теор}\|$ где:

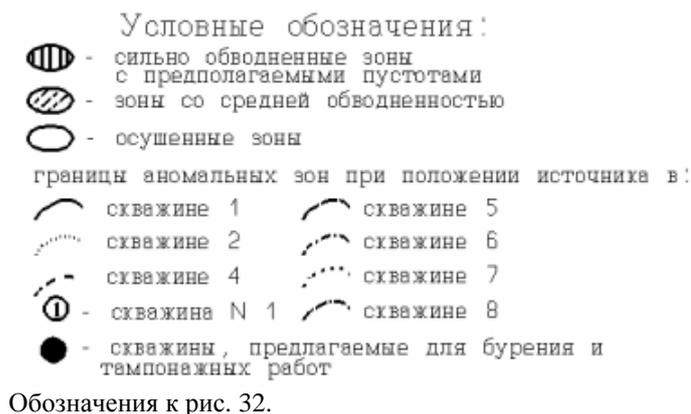
$$\|\vec{\rho}\| = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2};$$

$$\vec{\rho}_k^{теор} = \rho \cdot J_0 / \|J_0\|.$$

Таким образом рассчитывались аномальные компоненты кажущегося сопротивления:

$$\vec{\rho}_k^{an} = \vec{\rho}_k^{набл} - \vec{\rho}_k^{теор}$$

В дальнейшем в каждой точке наблюдения строился вектор аномального сопротивления. Так как влияние первичных питающих электродов в аномальном поле отсутствует, то источником аномального поля являются вторичные заряды, которые индуцируются на поверхностях локальных неоднородностей и на их внутренних границах. Основная идея обработки данных векторной съемки заключается в том, что сближение векторов в плане показывает наличие отрицательных источников, расхождение - положительных источников. Как показывает опыт численного моделирования, при разных положениях питающих электродов высвечиваются разные участки поверхности неоднородности или разные неоднородности. С другой стороны, число плюсов не всегда равно числу минусов, так как области стоков и истоков на неоднородностях могут располагаться на разной глубине. В результате часть источников от локальной неоднородности может быть не видна. И последнее, за счет двумерной площадной взаимозависимости



векторов такая съемка позволяет "рассмотреть" объекты, которые расположены на некотором удалении от профиля наблюдений (например под домом или между стволами шахты).

На рис.33 показан пример построения векторной диаграммы. Источник первичного поля находился в скв.5, измерения велись по профилю 1.

Результаты работ. Результаты работ были представлены на рис.32. Область, расположенная в северо-восточной части участка, и заштрихованная сплошными линиями четко выделяется по наблюдениям по пр.1 со скважин 5,6,7,8. Границы этой зоны достаточно плотно ложатся в плане друг к другу, отражая разные участки поверхности проводящей неоднородности. По нашему мнению, эта аномалия соответствует разуплотненной обводненной зоне, в которой весьма вероятно наличие крупных пустот. Это мнение основано еще на том факте, что попавшая в эту зону скв. 4 была водообильна и при ее бурении наблюдался провал бурового инструмента. Часть этой зоны проходит под восточным краем дома 7. Аналогичная зона наблюдается в районе скважины 7 и профиля 2 (скв. 7 и 8 были водообильны). Однако эта зона локальна и под дом возможно не распространяется.

От электрода в скв. 1 наблюдается большая отрицательная аномалия, захватывающая центральную часть дома 7. Вероятно, ее можно трактовать как зону средней водонасыщенности пород (хотя скв. 2, которая находится в непосредственной близости от дома 7 в пределах этой зоны, была очень водообильна). Аномалии от электродов на скв. 2 и 4 четко указывают на положение высокоомной зоны, расположенной в юго-западной части участка. В эту зону попадают сухие скв. 5 и 1.

Таким образом, наибольшей опасности подвержено северо-восточное крыло дома 7. Здесь обязательно проведение осушительных и дополнительных тампонажных работ. В юго-западной части дома грунты сухие. Для повышения надежности было рекомендовано провести упрочнение средней части дома с северной стороны.

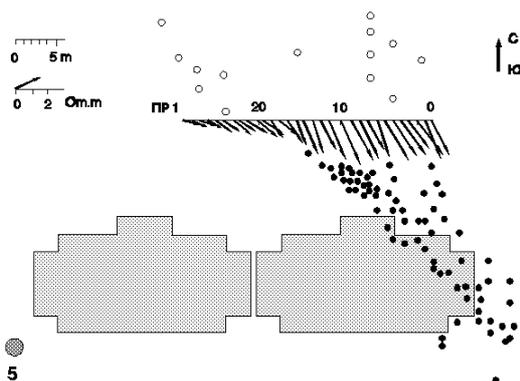


Рис.33. Пример векторных построений

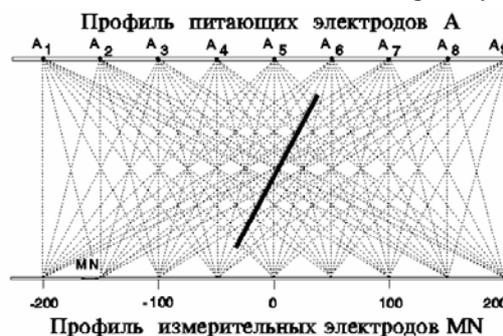


Рис.34. Схема наблюдений по методике межшахтного просвечивания

Интерпретация электрического просвечивания на основе аналогии электрического и магнитного полей

В угольных районах нередко встречаются различные нарушения угольного пласта, которые выражаются в уменьшении его мощности или в его полном исчезновении. Для выявления такого рода нарушений применяется электроразведка. Использование электроразведки на угольных пластах в Ростовской области, например, основано на том, что основным объектом добычи является антрацит, который по сравнению с вмещающими терригенными породами является почти идеальным проводником. Поэтому электрический ток от точечного источника распространяется только вдоль угольного пласта, практически не уходя за его пределы вверх и вниз. Учитывая, что мощность пласта во много раз меньше расстояния, на котором проводится измерение электрического поля, можно свести задачу о распределении электрического поля в подобной среде к чисто двумерной. В реальных условиях исследования ведутся по методике межшахтного просвечивания, когда для каждого положения питающего электрода A_i (электрод В находится в "бесконечности" на расстоянии порядка 1 км), расположенного в одном штреке, проводятся измерения E_x -компоненты поля в противоположном штреке (рис. 34).

Для решения обратной задачи при поиске нарушений угольного пласта Иванова, Модин и Перваго (1996) использовали алгоритм, предложенный Г.А.Трошковым и А.А.Грозновой (1982) для интерпретации магнитных аномалий. По программе двумерного моделирования IE2DL были рассчитаны значения E_x -компоненты электрического поля для высокоомных двумерных тел различной формы (рис. 35), с помощью которых можно аппроксимировать зоны

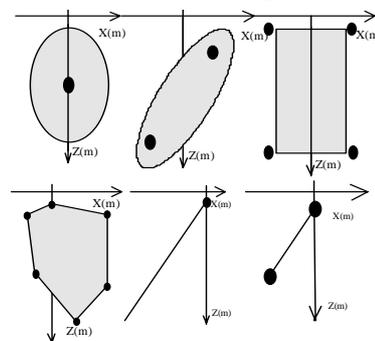


Рис.35. Набор моделей для сравнения аномалий электрического и магнитного полей

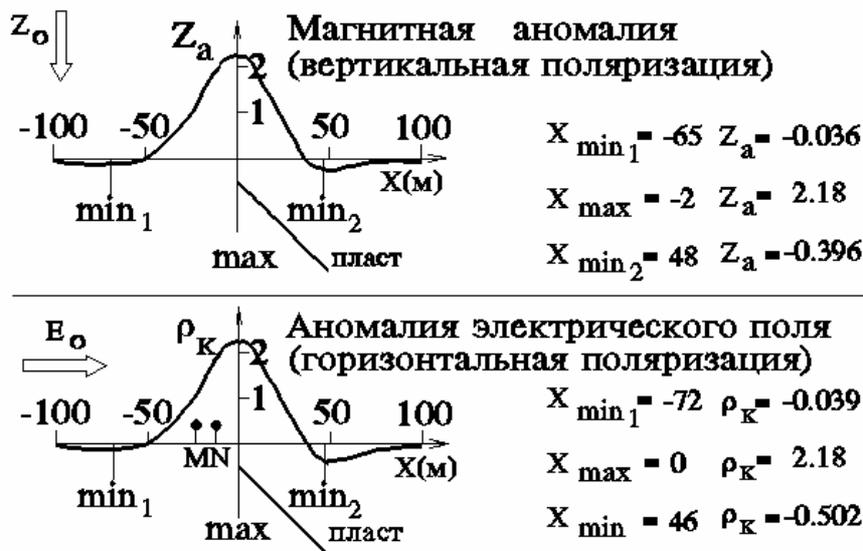


Рис.36. Идентичность электрических и магнитных полей.

электрического поля $E_{фон}$, и нормированное $E_{ан}$ может быть найдено по формуле:

$$E_{ан}/j_0 = (E_x - E_{фон})/j_0,$$

где j_0 - модуль плотности тока источника в точке измерения.

С помощью программы двумерного моделирования магнитного поля (А.А.Булычев, 1990) для нескольких моделей были рассчитаны вертикальные составляющие Z аномального поля. Расчеты проводились в предположении, что первичное магнитное поле Земли направлено вертикально и соответственно объект также имеет вертикальную намагниченность. Сравнение аномальных вертикального магнитного поля и горизонтального электрического полей от одних и тех же моделей показало их полную идентичность, если поляризующее поле однородно (рис.36). Следовательно, для нормированного электрического поля в достаточно грубом приближении можно использовать подходы в интерпретации, которые разработаны в магниторазведке.

Для решения обратной задачи используется метод особых точек, в модификации алгоритма Трошкова. Этот метод основан на математическом аппарате теории функций комплексного переменного. Для использования метода особых точек необходимо представить напряженность электрического поля в области свободной от зарядов (т.е. вторичных источников тока) в виде **аналитической функции** (Серкеров,1990). В нашем случае электрическое поле можно представить как функцию комплексного переменного:

$$E(z) = E_x(x,y) + i E_y(x,y), \text{ где } z = x + i y.$$

В соответствии с уравнениями Максвелла, в области свободной от зарядов, напряженность электрического поля удовлетворяет условиям отсутствия вихрей $rotE=0$ и источников $divE=0$. В случае двумерной задачи из уравнений Максвелла следуют условия Коши - Римана: $dE_x/dy = dE_y/dx$ и $dE_x/dx = -dE_y/dy$. Условия Коши - Римана **необходимы и достаточны для аналитичности функции $E(z)$** .

При применении аналитических функций для интерпретации аномалий важное значение имеют особые точки этих функций, в окрестности которых функцию нельзя представить в виде абсолютно и равномерно сходящегося ряда Тейлора. Особые точки располагаются внутри тела, или на его границе, тем самым они дают важную информацию о геометрии самого тела. Например, центр круга - полюс третьего порядка; фокусы эллипса, кромки тонкого пласта - полюсы второго порядка и точки излома границ - полюсы первого порядка. Причем в процессе интерпретации алгоритм позволяет находить координаты полюсов, ближайших к линии наблюдения, и определять их порядок (Трошков, Грознова, 1985). Важным отличием от магниторазведки является возможность изменения угла поляризации объекта. В этом случае в результате интерпретации мы имеем целый набор особых точек, что позволяет значительно надежнее определять геометрию тела.

Для опробования метода особых точек по программе двумерного моделирования были рассчитаны аномальные электрические поля для двух моделей. Эти модели имитируют возможные разрывные нарушения в пласте антрацита.

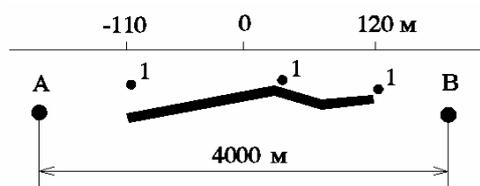


Рис.37. Особые точки разломной зоны в квазиоднородном электрическом поле.

нарушений угольного пласта.

Расчет производился при однородном поляризующем поле. После расчета полного электрического поля от питающего электрода A_i может быть найдено аномальное поле $E_{ан}$, вызванное только объектом поиска. Для того чтобы найти это поле, необходимо иметь информацию о положении второго питающего электрода B , геометрии горных выработок и структуре шахтного поля. В этом случае с помощью прямой задачи рассчитывается фоновая составляющая

Для высокоомной неоднородности в виде материальной ломаной линии расчет производился при условии однородного электрического поля. Результаты интерпретации показаны на рис.37. Точки излома неоднородности проявляются как полюсы первого порядка. Чем ближе особая точка к профилю наблюдения, тем точнее определяются ее координаты. Для модели двух тонких пластов высокого сопротивления, расположенных под углом друг к другу, расчеты аномальных электрических полей проводились для методики межшахтного просвечивания. Аномальные электрические поля были рассчитаны для 18 положений питающего электрода на профиле 1 и профиле 2. Результат обработки представлены на рис.38. Когда измерения производятся по профилю 1, проявляется верхняя кромка второго пласта, ближайшая к линии наблюдения (черные точки). Нижние кромки пластов вместе определяются как полюс первого порядка (излом). Перемещая питающий электрод на профиль 1, а линию MN на профиль 2, мы "подсвечиваем" модель с другой стороны и определяем координаты верхней кромки первого пласта. Верхние кромки пластов при этом проявляются как полюсы второго порядка (контурные точки).

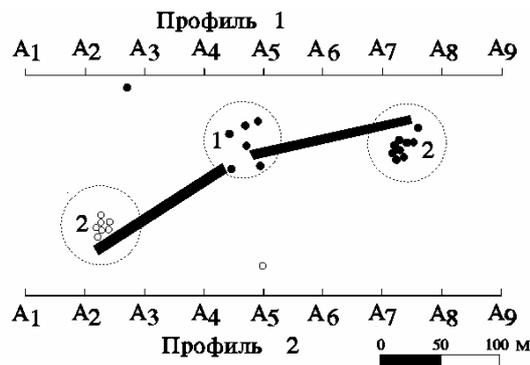


Рис.38. Особые точки разломной зоны при межшахтном просвечивании.

Заключение

В последние несколько лет традиционный метод вертикальных электрических зондирований претерпел значительные изменения, имеющие характер перехода на принципиально иной качественный уровень. Эти изменения связаны с общим прогрессом в развитии микроэлектроники и аппаратуры для электроразведки и привели к созданию многоэлектродных систем наблюдений, с числом каналов от нескольких десятков до нескольких сотен, переключением которых управляет микропроцессор. Радикально изменилась методика зондирований, от разрозненных зондирований, в которых разносы традиционно увеличивались в геометрической прогрессии, к профильным (или сплошным) зондированиям, в которых разносы возрастают с постоянным линейным шагом, а сами зондирования как бы «катятся» по профилю. Несмотря на резко возросший объем наблюдений на единицу длины профиля, отмечается рост производительности наблюдений при уменьшении численности персонала. Новая методика вызвала изменения в области теории прямых и обратных задач электрических зондирований неоднородных сред, появление новых компьютерных программ для обработки, визуализации и интерпретации экспериментальных данных. Кроме электрических зондирований многоэлектродные системы наблюдений могут использоваться для картирования, мониторинга природных или искусственных изменений геологической среды, при подземных наблюдениях, в том числе томографических просвечиваниях пространства между горными выработками. Новая система наблюдений позволила превратить проявления геологических помех, вызванных приповерхностными неоднородностями, из случайных в регулярные, что в свою очередь позволило существенно увеличить точность и детальность исследования неоднородной геологической среды.

Литература

1. Березина С.А., Бобачев А.А. и др. Интерпретация электрических зондирований в неоднородных средах. // Вестник. Моск. Ун-та. Сер. Геология.- 1994, N 2.- С.24-32.
2. Бобачев А.А., Марченко М.Н. и др. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. // Физика Земли. N 12, 1995.- С.79-90.
3. Бобровников Л.З., Кадыров И.Н., Попов В.А. Электроразведочная аппаратура и оборудование.- М.: Недра, 1985.- 336 с.
4. Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.А. Руководство по интерпретации кривых ВЭЗ МДС.- М.: Стройиздат. 1984.- 200 с.
5. Венцалек Р. Автоматизация интерпретации профильных ВЭЗ.// Автореф. дисс. канд. техн. наук. - М., МГРИ, 1991.- 27 с.
6. Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии.- М.: Недра, 1990.
7. С.В.Иванова, И.Н.Модин, Е.В.Перваго (МГУ). Выявление структуры нарушения угольного пласта с помощью электрического просвечивания на постоянном токе. Тезисы межд. конф. С.Петербург, 17-21 июня 1996 г. "Эффективная и безопасная добыча угля на базе современных достижений геомеханики", ВНИМИ, С-Пб, 1966, стр.111-115.

8. Земцов В.Н., Шак В.Г. Электрические зондирования на постоянном токе в рудных районах. М., Недра. 1990. 108 с.
9. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1972, 1980. 391 с.
10. О.Куфуд Зондирование методом сопротивлений. М.,Недра.1984.270 с.
11. Методические рекомендации по применению точечных зондирований для построения геоэлектрического разреза. Л., 1989. 62 с.
12. Молев М.Д., Киселев Н.Н. и др. Методические указания по шахтной электроразведке малоамплитудных нарушений угольных пластов. Тр.ВНИМИ, Л.:1986.82 с.
13. А.С.Нахабцев. Низкочастотная электроразведка с линейными источниками гармонического поля. С.-Петербург, Недра, 1992, 360 с.
14. Ортогональное электроразведание с незаземленными рабочими линиями. Л., Недра, 1990, 115 с. Редактор: А.С.Нахабцев.
15. Петров А.А., Федоров А.Н. Решение обратной задачи электроразведки методами постоянного тока и вызванной поляризации // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. N 11. С. 60-65.
16. Петров А.А., Федоров А.Н. Интерпретация данных электроразведки постоянным током в условиях неровного рельефа // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. N 12. С. 84-88.
17. Серкерев С.А. Теория гравитационного и магнитного потенциалов.- М.: Недра, 1990. - 304 с.
18. Трошков Г.А., Грознова А.А. Математические методы интерпретации магнитных аномалий. - М.: Недра, 1985.
19. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. М., Мир, 1981 г., 693 с.
20. Шкабарня Н.Г. Автоматизированная интерпретация кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в рудных районах // Разведка и охрана недр. 1986. N11. С. 40-45.
21. Электрическое зондирование геологической среды / Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина. Ч.1.М.,МГУ,1988.176с. Ч.2.М., МГУ, 1992. 200 с.
22. Электроразведка методом сопротивлений. / Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина. М., изд.МГУ, 1994 г., 160 с.
23. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л., Недра, 1985, 96 с. Составители: А.С.Нахабцев, Б.Г.Сапожников, А.И.Яблчанский.
24. Яковлев А.Г. Влияние геоэлектрических неоднородностей на результаты электромагнитных зондирований. Автореф. дисс. к.ф.-м. наук. М., 1989. 17 с.
25. Barker R.D. 1981. The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. Geophysical Prospecting, 29, 128-143.
26. Barker R.D., 1992, A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface: First Break, 10, no. 2, 53-62.
27. Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A. VES field and processing technology for the case of high level geological noise. Report, presented at Annual SAGEEP conference, April 1995, Orlando, Florida, USA.2.
28. Bobachev A.A., M.N. Marchenko, Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A. VES field and processing technology with canceling geological noise. JEEG - Journal of EEGS, USA 10 pp.
29. T.Dahlin. 2D resistivity surveying for environmental and engineering application. First Break, 1996, vol.14, N 7, p.275-283.
30. Griffiths D.H. and Turnbull J. A multi-electrode array for resistivity surveying, First Break, 3 (7), 16-20.
31. M.H.Loke and R.D.Barker. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics. Vol.60, No 6, 1995, p.1682-1690.
32. Loke, M. H., and Barker, R. D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, Geophysical Prospecting, 44(1), 131-152.
33. Lowry T., Shive P.N. (1990). An evaluation of Bristow's method for the detection of subsurface cavities. Geophysics, Vol.55, N 5. P.514-520.
34. I.N.Modin, D.K.Bolshakov, B.G.Sapognikov, V.A.Shevvin. Non-contact resistivity measurements. Report, presented at Annual EAGE conference, June 1996, Amsterdam, The Netherlands.
35. Overmeeren R.A. van and Ritsema I.L. Continuous vertical electrical sounding. First Break, 6(10), 313-324.
36. Pazdirek,O., Blaha,V., Benes,L., Safranek,V., Man,O., Zima,L., Knez,J.G. (1995) Quo vadis, DC resistivity? New ways in direct current resistivity field acquisition technology. Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment. Vol.II, N 2, p.5-10. Czech Republic.
37. Petrick, W. R., Sill, W. R., Ward, S. H., 1981, Three-dimensional Resistivity Inversion Using Alpha Centers, Geophysics, v. 46, 1148-1162.
38. Shima H. and Sakayama T., 1987, Resistivity Tomography: An Approach to 2-D Resistivity Inverse Problems, presented at 57th Annual International SEG Meeting, New Orleans.
39. Shima H., Hideki S., 1988, Application of Resistivity Tomography for Detection of Faults and Evaluation of their Hydraulic Continuity. 58th An.Int.SEG Meeting, Anaheim.

40. Shima H., 1989, The Effects on Reconstructed Images of Surrounding Resistivity Structures in Resistivity Tomography. 59th An.Int.SEG Meeting, Dallas.
41. Shima, H., 1990, Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers: Geophysics, 55, 682-694.
42. Shima H., 1992, 2-D and 3-D Resistivity Image reconstruction using crosshole data: Geophysics, Vol. 57, No. 10, p. 270-1281.
43. Stefanescu, S., and Stefanescu, D., 1974, Mathematical Models of Conducting Ore Bodies for Direct Current Electrical Prospecting, Geophys. Prospecting 22, 246-260.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	3
Выбор установки многоэлектродного зондирования	3
Аппаратура	3
Классическая модель и методика электрических зондирований	5
Определение искажений	5
Признаки искажений кривых ВЭЗ	5
Полная модель и методика ее исследования	6
Основные типы искажений кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями.	6
Способы визуализации.	9
СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД	10
Прямые задачи.	10
Обратные задачи для 2D неоднородных сред	12
Способы исключения искажений, вызванных ППН	17
ПРИНЦИПЫ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА.	19
Векторные измерения и их обработка	20
Способ построения аномальных векторов	21
Интерпретация электрического просвечивания на основе аналогии электрического и магнитного полей	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	26
ЛИТЕРАТУРА	26

РГАСНТИ 38.57.23
УДК 550.837.31

А.А.Бобачев, И.Н.Модин, Е.В.Перваго, В.А.Шевнин. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. М., 1996, 50 с. // Разведочная геофизика. Обзор . АОЗТ «Геоинформмарк».- Библиогр.: с.47-50 (43 назв.).

В обзоре рассмотрено современное состояние и перспективы быстро развивающегося направления в электроразведке методом сопротивлений, связанного с применением многоэлектродных (до 960 каналов) систем наблюдений. Во многих странах начат выпуск аппаратуры для многоэлектродных наблюдений с автоматическим переключением каналов под управлением микропроцессора или микрокомпьютера. Появились системы 2D интерпретации многоэлектродных электрических зондирований. Новая технология отличается от традиционной методики ВЭЗ более высокой производительностью и требует меньшей численности персонала. Отмечено, что наиболее важным результатом перехода на новые системы наблюдений в электроразведке является возможность выявления и подавления геологических помех, вызывающих искажения полевых данных. После устранения искажений точность интерпретации может быть существенно повышена, что позволяет решать задачи детального изучения неоднородных сред. Многоэлектродные системы наблюдений наиболее пригодны для изучения глубин до 100 м при решении задач инженерной геологии, гидрогеологии, экологии и археологии, а также при подземных исследованиях в горных выработках. Новая методика стимулировала переход метода электрических зондирований на качественно новый уровень.¹

¹ © АОЗТ «Геоинформмарк», 1996