

11. Родкин М. В., Строев П. А. Геоструктура тыловых спрединговых бассейнов западной части Тихого океана и ее отражение в аномалиях геофизических полей//Гравиметрические морские исследования. М., Национ. геофиз. комитет РАН, 1993. С. 93—110.
12. Родников А. Г. Островные дуги западной части Тихого океана. М.: Наука, 1979.
13. Родников А. Г., Гайнанов А. Г., Ермаков Б. В. и др. Геотраверс Сихотэ-Алинь — Японское море — о-в Хонсю — Тихий океан. М., МГК АН СССР, 1982.
14. Родников А. Г. Соотношение астеносферы и структур земной коры окраин Тихого океана//Тихоокеаническая геология. 1988. № 4. С. 15—22.
15. Строев П. А., Гайнанов А. Г., Гилод Д. А. Плотностная модель тектоносферы Восточно-Китайского и Филиппинского морей//Гравиметрические и магнитные исследования на море. М.: Наука, 1989. С. 111—129.
16. Туезов И. К. Карта теплового потока Тихого океана и прилегающих континентов (пояснительная записка). Хабаровск, Ин-т тектоники и геофизики ДВО АН СССР, 1988.
17. Chapman M. K., Talwani M. Geoid anomalies over deep sea trenches//Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1982. Vol. 68, N 2. P. 349—369.
18. Gainanov A. G., Stroeve P. A. The earth's gravity field and density models of the crust and lithosphere in the marginal basins of Eastern Asia//J. Phys. Earth. 1988. Vol. 36. P. 11—19.
19. Grow J. A. Evidence for high-density crust and mantle beneath the Chile trench due to the descending lithosphere//J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80, N 11. P. 1125—1136.
20. Liu L. Effects of H₂O on phase behaviour of forsterite-enstatite system at high pressures and temperatures and implications for the earth//Phys. Pl. Int. 1987. vol. 49, N 1—2. P. 142—167.
21. Seekins L. C., Teng Ta-liang. Lateral variations in the structure of the Philippine Sea plate//J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82, N 2. P. 317—324.
22. Shiono K., Sacks J. S., Linde A. T. Preliminary velocity structure of Japanese islands and Philippine Sea from surface wave dispersion//Carnegie Inst. Washington Year Book. 1980. Vol. 79. P. 498—505.
23. Tatsumi J. Formation of the volcanic front in subduction zones//Geophys. Res. Lett. 1986. Vol. 13, N 8. P. 717—720.
24. Turcotte D. L., Shubert G. Geodynamics, applications of continuum physics to geological problems//John Willey and Sons Inc. 1982. USA.
25. Wannamaker Ph. E., Booker J. R. et al. Magnetotelluric Observations Across the Juan de Fuca Subduction System in the EMSLAB Project//J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94, B 10. P. 14111—14125.
26. Wannamaker Ph. E., Booker J. R. et al. Resistivity Cross Section Through the Juan de Fuca Subduction System and its Tectonic implications//J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94, B 10. P. 14127—14144.

Поступила в редакцию
19.09.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 4, ГЕОЛОГИЯ. 1994. № 2

УДК 550.837.31

С. А. Березина, А. А. Бобачев, И. Н. Модин, В. К. Хмелевской,
В. А. Шевнин, А. Г. Яковлев

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Введение. Метод сопротивлений, в частности вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), на протяжении десятилетий используют для решения широкого круга геологических задач. В развитии метода ВЭЗ по ряду признаков сейчас можно выделить новый этап. Во-первых, появились новые компьютерные технологии для регистрации и обработки полевых данных, что значительно расширило возможности метода ВЭЗ. Во-вторых, изменился круг решаемых задач — значительно вырос объем геофизических работ в городских условиях, т. е. в ус-

ловиях высоких промышленных помех и сильной изменчивости верхней части геологического разреза. Появились новые задачи — геоэкологические, археологические, мониторинг крупных промышленных агломераций. В-третьих, достигнута высокая производительность ВЭЗ при достаточно простой технологии проведения работ. В результате требования практики и сложности геологических ситуаций потребовали развития новых подходов к решению обратной задачи не только в рамках модели слоистой (1D), но и горизонтально-неоднородной среды (2D и 3D).

Рассмотрим в обобщенном виде результаты исследований, проведенных в лаборатории электроразведки кафедры геофизики геологического факультета МГУ. Работа затрагивает проблемы решения прямых и обратных задач метода сопротивлений, а также алгоритмы и программы для компьютерного обеспечения этого метода. Основная задача, которую ставят перед собой авторы, — дать геофизикам-практикам методику и программное обеспечение, с помощью которых можно уже сейчас решать сложные геологические задачи. Главная особенность наших исследований — их комплексный характер. Мы рассматриваем основные проблемы, связанные с обработкой и интерпретацией электрических зондирований, а именно:

- разработку методики полевых наблюдений при изучении горизонтально-неоднородных сред;

- вопросы интерпретации в рамках модели горизонтально-слоистой среды с учетом априорной информации и действия принципа эквивалентности;

- графическое компьютерное представление результатов интерпретации;

- задачу разделения электрических полей от вмещающего слоистого разреза и горизонтальных неоднородностей;

- учет искажений кривых ВЭЗ от приповерхностных неоднородностей, расположенных вблизи MN и AB;

- создание модели начального приближения, соответствующей сложному геоэлектрическому разрезу;

- решение прямой задачи и подбор сложных геоэлектрических разрезов.

Подобные исследования мы провели на Чукотке при изучении подрусловых таликов, в Донбассе при картировании зон тектонических нарушений, на Куликовом поле и в Севастополе при поисках археологических объектов, а также при изучении верхней части геологического разреза для проектируемых трасс нефте- и газопроводов.

Горизонтально-слоистая среда

В результате исследований принципа линейной фильтрации усовершенствованы алгоритмы решения прямых задач [1], возросла точность используемых линейных фильтров для разных установок зондирования (Шлюмберже, Веннера, дипольной осевой, двухэлектродной потенциал-установки и установки с линейными электродами) [4]. Кроме того, разработан универсальный алгоритм расчета прямой задачи для произвольных установок зондирования при любом положении питающих и приемных электродов, использующий только линейный фильтр для установки Шлюмберже [3]. Все фильтры прошли тестирование на слоистых моделях с перепадами кажущихся сопротивлений на кривых ВЭЗ до 10 000 раз (как в сторону уменьшения с глубиной, так и в сторону повышения) и показали высокую точность (не хуже 1—3%). Тестирование проводилось с помощью прямой задачи для

двухслойного разреза, точное решение для которого может быть найдено в виде ряда.

Для обработки и интерпретации ВЭЗ в рамках горизонтально-слоистых моделей разработан комплекс программ IPI, позволяющий рассчитывать кажущиеся сопротивления по измеренным в поле значениям тока и напряжения, преобразовывать сегментированные кривые ВЭЗ (для разных MN) в непрерывные, убирать случайные и ураганные ошибки в данных, интерпретировать данные ВЭЗ по профилю в режиме диалога человека с компьютером, опираясь не только на точность совмещения теоретической и экспериментальной кривых, но и на общий вид геоэлектрического разреза [5]. После первого цикла интерпретации можно изучить эффективность решения обратной задачи, оценив доверительные пределы каждого из параметров, а также корреляционные связи между найденными оценками параметров и пределы действия принципа эквивалентности для любых пар параметров модели. Пакет программ IPI отличается надежностью и высокой производительностью при работе на персональных компьютерах различной конфигурации (среда MS-DOS), обладает наглядной графикой. Он используется более чем в 30 различных геофизических организациях в стране и за рубежом.

Горизонтально-неоднородная среда

Для моделирования электрических полей в неоднородных средах созданы программы и их комплексы для двумерных (IE2DL, IE2DP1, IE2DP2) и трехмерных (IE3D1, IE3D2) сред [5]. С их помощью изучены вопросы искажения электрического поля поверхностными и глубинными неоднородностями, разработана классификация типов искажений и предложены приемы их выявления, диагностики и подавления. Эти результаты являются наиболее значимыми достижениями лаборатории электроразведки за последние годы. В работе [5] широко использованы понятия и определения теории искажений магнитотеллурического поля [6], связанные в основном с так называемыми S-эффектом и глубинным S-эффектом. Вместе с тем метод сопротивлений имеет свои особенности с точки зрения структуры электрического поля в сложных средах. Прежде всего имеются в виду искажения от приповерхностных неоднородностей, расположенных вблизи питающих электродов (C-эффект).

Важной задачей ВЭЗ является разработка методики интерпретации в неоднородных средах. К настоящему времени имеется довольно четкое представление об этой проблеме и создан комплекс программ IPI-2D, позволяющий проводить обработку, визуализацию, анализ, трансформации, коррекцию и интерпретацию данных ВЭЗ в двумерно-неоднородных средах [2, 5].

Для такой интерпретации желательна следующая специальная методика полевых наблюдений.

1. На каждом пикете вдоль профиля наблюдений выполняются два трехэлектродных зондирования: AMN и MNB.

2. Точки ВЭЗ размещаются по профилю с постоянным шагом, в несколько раз меньшим, чем максимальный разнос АО.

3. Питающие электроды перемещаются по линии профиля с арифметическим шагом по оси разносов таким образом, чтобы шаг по разносам был равен шагу ВЭЗ по профилю, что позволяет многократно проходить одни и те же точки питающими электродами из разных центров зондирования и дает возможность накапливать полезную информацию, выявлять и учитывать C-эффект.

Полученные таким образом данные проходят специальную обработку по следующему алгоритму.

1. Сначала проводится совместный просмотр и анализ изображений двух разрезов ρ_k для установок AMN и MNB.

2. Затем осуществляется компонентный анализ матрицы кажущихся сопротивлений для всех разносов и точек зондирования. Метод главных компонент позволяет эффективно подавлять высокочастотные помехи от малых геологических объектов, уменьшить искажения кривых ВЭЗ от горизонтальных неоднородностей, локализовать эти неоднородности и выделить в электрическом поле составляющую, связанную со слоистым разрезом, что необходимо для последующей одномерной количественной интерпретации [2].

3. Две трехэлектродные кривые ВЭЗ преобразуются в кривую для симметричной установки AMNB. Производится одномерная интерпретация кривых AMNB по программе IPI.

4. Объединяются результаты одномерной интерпретации и двумерного анализа, строится стартовая двумерная модель разреза.

5. Проверяется правильность интерпретации для неоднородной двумерной среды путем расчета прямой задачи и последовательного уточнения параметров разреза, обеспечивающих наибольшее сходство экспериментальных и теоретических двумерных полей кажущихся сопротивлений.

6. Строится окончательный разрез с учетом результатов интерпретации и всей априорной информации.

Влияние приповерхностных неоднородностей

При практической интерпретации ВЭЗ по этой схеме приходится преодолевать ряд трудностей. Одна из них — разделение полей от глубоких и поверхностных неоднородностей. Казалось бы, метод ВЭЗ обладает замечательными возможностями разделения объектов: на малых разносах — малая глубинность исследования, на больших — большая. Однако приповерхностные неоднородности сильно усложняют эту внешне простую схему. Например, S-эффект (явление искажения кривых приповерхностными неоднородностями, расположенными вблизи измерительной линии) приводит к вертикальному сдвигу кривых ВЭЗ по оси сопротивлений без изменения их формы (рис. 1, А). При попытке истолковать подобную ситуацию по разрезу ρ_k (рис. 1, В) могут возникать предположения о наличии вертикальных проводящих и высокоомных зон, простирающихся от поверхности на значительную глубину. Истинная причина такого характера поля заключена в чередовании тонких, ограниченных по горизонтали приповерхностных проводящих и высокоомных линз. Для устранения влияния S-эффекта кривые ВЭЗ сдвигаются к одному уровню сопротивления (1, Б, Г) таким образом, чтобы сопротивление опорного (с известными свойствами) слоя в разрезе было относительно стабильным и геологически реальным по величине. Другое проявление S-эффекта наблюдается, когда зондирование выполняют с несколькими линиями MN. Если малые линии оказываются меньше размеров приповерхностной неоднородности, а большие выходят за ее пределы, то сегменты кривой ВЭЗ заметно сдвигаются по оси сопротивлений и разрыв между ними («ворота») может составлять 10 раз и более. Для устранения таких «ворот» рекомендуется все сегменты последовательно сдвигать к правой ветви.

Меньше изучен эффект искажения кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями, расположенными вблизи питающих электродов

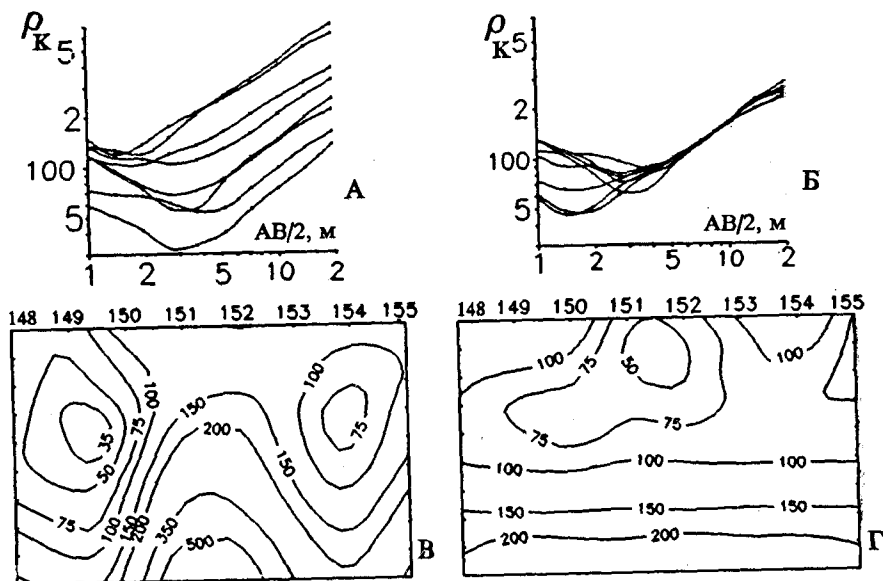
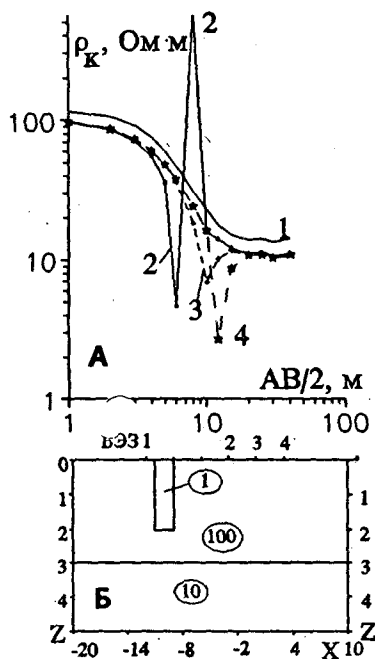


Рис. 1. Нормализация кривых ВЭЗ, искаженных S-эффектом (Тульская обл., с. Красное): А — полевые и Б — нормализованные кривые ВЭЗ; В — полевой и Г — нормализованный разрез ρ_k

(С-эффект). Он проявляется в искажении формы кривой ВЭЗ при падении питающего электрода на приповерхностную неоднородность (рис. 2, А). Когда такое искажение отмечается на одном разnose, то



его можно удалить, но присутствие нескольких приповерхностных объектов на профиле наблюдений приводит к значительному изменению формы всей кривой ВЭЗ. Чтобы обнаружить и оценить влияние этого эффекта мы вычисляем производные $d\rho_k/dr$. На рис. 3 показаны разрезы $d\rho_k/dr$ одного из участков в г. Донецке для комбинированных трехэлектродных установок. Линейные аномалии, наклоненные под углом 45° вправо для установки AMN и влево для установки MNB, — типичное проявление С-эффекта. На каждой кривой эти искажения кажутся хаотичными, но при анализе профильных данных видна четкая корреляция наклонных аномалий, связанная с тем, что одну приповерхностную неоднородность

Рис. 2. Проявление С-эффекта на модели: А — кривые ВЭЗ для установки AMN, искаженные С-эффектом; Б — модель разреза с приповерхностной неоднородностью; 1—4 — номера кривых ВЭЗ (А) и точек зондирования (Б)

родность из разных точек ВЭЗ пересекают разносы, соответствующие расстоянию от центра зондирования до центра неоднородности. Причина С-эффекта — фокусировка неоднородностью тока от питающего электрода, приводящая к резкому изменению электрического поля во всем разрезе (в том числе и вблизи MN).

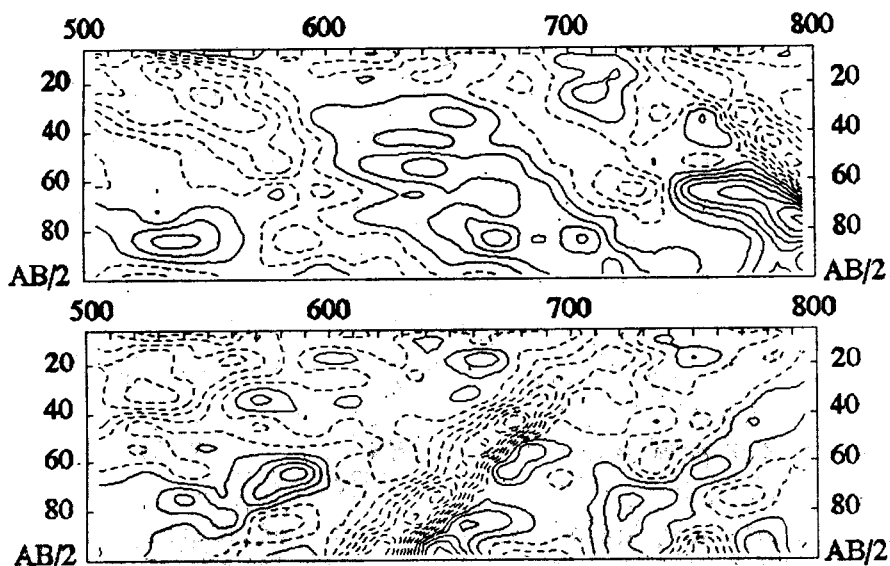


Рис. 3. Проявление С-эффекта на разрезах $\partial r_k / \partial r$ профиля ВЭЗ (Донецк, участок Холодная Балка): сверху — для установки AMN, внизу — для MNB

На рис. 2, А, Б показан случай, когда в двухслойном разрезе с $\rho_1 > \rho_2$ присутствует проводящая зона. При попадании электрода А в неоднородность на кривой ВЭЗ появляется сильная аномалия. Другой типичный случай — вертикальный контакт двух сред. Когда питающий электрод подходит близко к контакту со стороны проводящего блока, в котором находятся электроды MN, то возникает боковое отражение тока и заметно возрастает напряженность поля в проводящем блоке среды. На разрезе ρ_k возникает «ус» или аномальная полоса высокого сопротивления, идущая под углом 45° от выхода контакта на дневную поверхность. Практика дает примеры и более сложных ситуаций, в которых заметно проявляется С-эффект.

Пример. Продемонстрируем методику обработки ВЭЗ в неоднородных средах на примере материалов учебной практики студентов на Крымской базе геологического факультета МГУ. Участок профиля длиной около 300 м изучен двухсторонними 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 которой тело известняков, слагающих г. Придорожную, ограничено двумя субвертикальными разломами. Вмещающий разрез сложен мергелями.

Разрезы кажущихся сопротивлений (рис. 4) достаточно выразительно представляют эту структуру, причем хорошо заметна разница между разрезами AMN и MNB. На разрезах вертикальных производ-

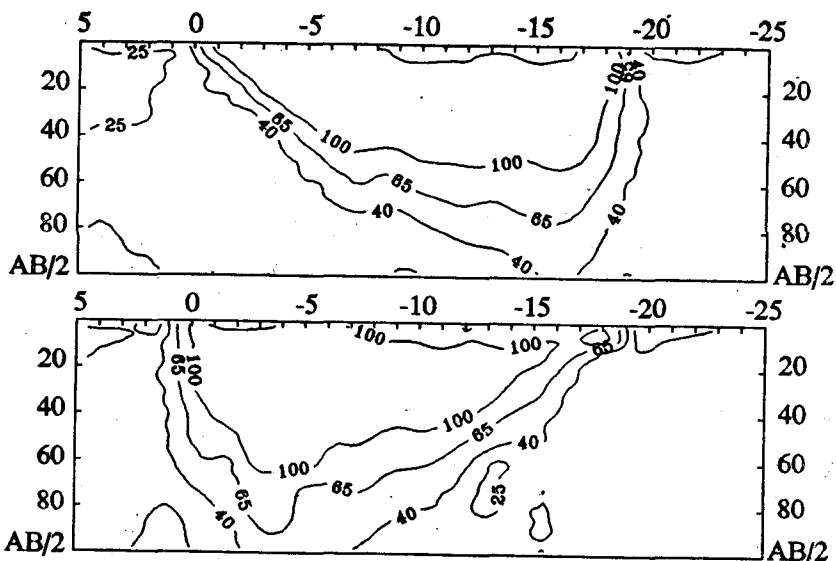


Рис. 4. Разрезы ρ_k для установок AMN (вверху) и MNB (внизу)
(Крым, г. Придорожная)

ных (рис. 5) видно, что основными источниками искажений являются два разлома на Пк0 и Пк-18, а наклон наиболее резких зон под углом 45° свидетельствует о наличии сильного С-эффекта. Наиболее яр-

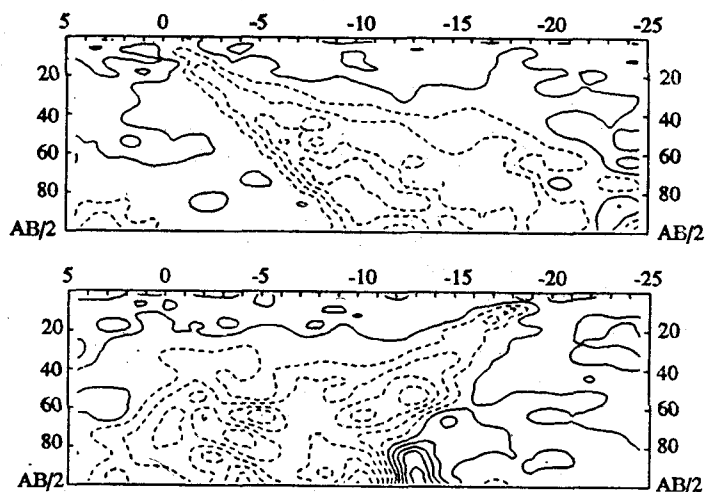


Рис. 5. Разрезы вертикальных производных $\partial\rho_k/\partial r$ (AMN — вверху, MNB — внизу)

ко С-эффект проявляется, когда питающий электрод переходит из высокоомного блока известняков в более проводящие мергели, поэтому для AMN он проявляется на Пк0 (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 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 [2]. 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 остаются лишь на 20-метровых участках вблизи краев структуры (Пк 0—1 и —16—18). После суммирования результатов компонентного анализа для AMN и MNB получается разрез ρ_k (рис. 6), наилучшим образом

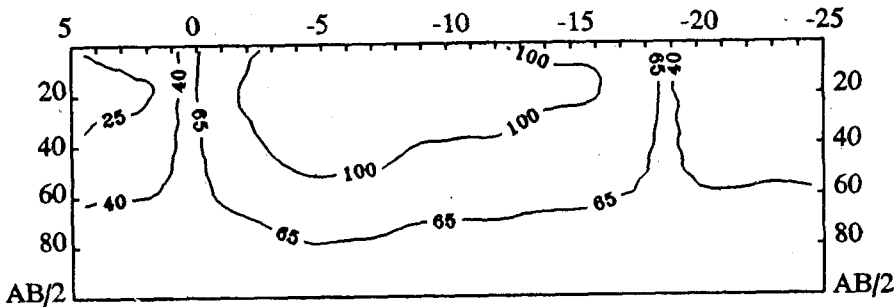


Рис. 6. Разрез ρ_k после MPC и суммирования AMN и MNB

соответствующий априорным данным по этой структуре. На рис. 7 приведены три кривые ВЭЗ для Пк-3 и разных стадий обработки: 1 — исходная полевая, 2 — для AMN после компонентного анализа и 3 — после MPC и суммирования AMN+MNB. Кривая 1 содержит высокочастотные помехи, которые подавляются MPC. Малая разница между кривыми 2 и 3 показывает, что именно MPC наиболее заметно исправляет кривую ВЭЗ. Косвенной оценкой работы алгоритма компонентного анализа может служить ошибка совмещения интерпретируемых кривых ВЭЗ с теоретическими. Для кривой 1 она равна 13,7%, а для кривых 2 и 3 — 1,8% и 1,4% соответственно. На рис. 8 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

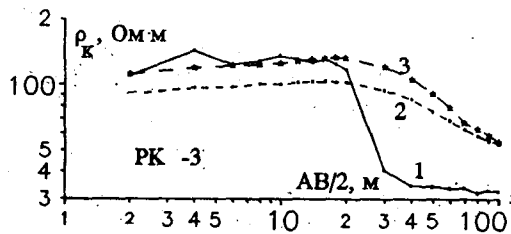


Рис. 7. Кривые ВЭЗ для разных стадий обработки (Пк —3)

Для кривой 1 она равна 13,7%, а для кривых 2 и 3 — 1,8% и 1,4% соответственно. На рис. 8 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

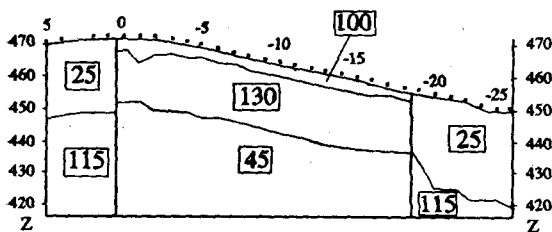


Рис. 8. Геоэлектрический разрез г. Придорожной

методику полевых измерений, анализ полевых данных и их трансформаций, позволяющий устранить искажения данных ВЭЗ при поверхностными неоднородностями, выявить и локализовать глубинные неоднородности

некоторой коррекции получен разрез ρ_k (рис. 9), весьма близкий к исходному (рис. 4, верхний).

Заключение. Наиболее важной проблемой метода ВЭЗ является разработка методики интерпретации в неоднородных средах. По мнению авторов, она должна включать специальную

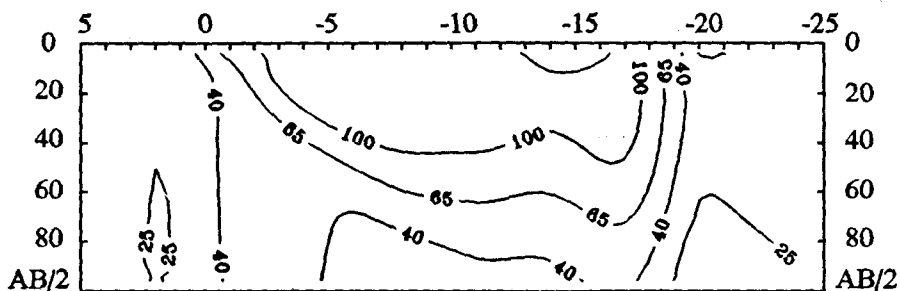


Рис. 9. Разрез ρ_k , подобранный с помощью программы IE2DL

родные объекты и выделить составляющую электрического поля от горизонтально-слоистой части разреза для раздельной интерпретации. Объединив затем эти данные, можно получить результирующий разрез, правильность которого проверяется расчетом прямой задачи ВЭЗ для неоднородной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. М.: Недра, 1984.
2. Модин И. Н., Бобачев А. А., Любчикова А. В. и др. Двумерные трансформации разрезов кажущегося сопротивления//Тез. докл. междунар. научн. конф. «Геофизика и современный мир», 9—13 авг. 1993 г. М., МГУ. С. 338—339.
3. Рогова С. А., Яковлев А. Г. Прямая задача электрического зондирования горизонтально-слоистого разреза для произвольной установки//Мат. XVIII научной конф. мол. ученых. Секц. «Геофизика». М., МГУ, 1992. Деп. в ВИНТИ, рег. № 588—В92.
4. Шевнин В. А., Ракутхани Ф. Система расчета и тестирования линейных фильтров для решения прямой задачи электрических зондирований//Мат. XVIII научной конф. мол. ученых. Секц. «Геофизика». М., МГУ, 1992. Деп. в ВИНТИ, рег. № 588—В92.
5. Электрическое зондирование геологической среды. М., Изд-во МГУ, 1988, 1992, Ч. 1, 2.
6. Berdichevsky M. N., Vanyan L. L., Dmitriev V. I. Methods used in the USSR to reduce near-surface inhomogeneity effects on deep magnetotelluric sounding//Phys. Earth Planet. Inter. 1989. Vol. 53. P. 194—206.

Поступила в редакцию
14.09.93