

ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 550.837.31

Подавление знакопеременных помех при инверсии данных вертикального электрического зондирования

П.И. Балк^a, А.С. Долгаль^{b,c}, А.В. Мичурин^b, А.А. Тайницкий^b,
Л.А. Христенко^{b,c}

^aBerlin, BRD /Germany/

^bГорный институт УрО РАН, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а

E-mail: dolgal@mi-perm.ru

^cПермский государственный национальный исследовательский универси-
тет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

(Статья поступила в редакцию 7 апреля 2016 г.)

При инверсии данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) предлагается реализация концепции минимизации эмпирического риска. Предполагается равная вероятность наличия положительных и отрицательных помех в измерениях сигнала. Закон распределения помех может существенно отличаться от нормального. Достоинством рассматриваемого метода является возможность приближенной оценки точности определения параметров модели геоэлектрического разреза. Обоснована целесообразность применения при вычислениях процедуры случайного поиска. Результаты вычислительных экспериментов подтверждают более высокое качество решения обратной задачи ВЭЗ с помощью предлагаемого метода по сравнению с традиционным подходом.

Ключевые слова: *электроразведка, зондирование, инверсия, сигнал, помеха, минимизация эмпирического риска, геоэлектрический разрез.*

DOI: 10.17072/psu.geol.31.55

Введение

Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), впервые предложенное Конрадтом Шлюмберже в 1912 г., до сих пор является одним из наиболее часто используемых методов электроразведки [6]. Это обусловлено простотой полевых измерений, высокой производительностью работ и их относительно небольшой стоимостью. Метод ВЭЗ позволяет решать широкий круг задач, связанных как с поисками

и разведкой полезных ископаемых, так и с инженерно-геологическими, экологическими и другими видами изысканий [8].

Суть метода достаточно проста: увеличение длины питающей линии AB , через которую подается электрический ток в землю, ведет к увеличению глубины его проникновения, а соответственно и глубины исследования геологического разреза. Разность потенциалов ΔU , измеренная в приемной линии MN , отнесенная к силе тока J в питающей линии с учетом гео-

метрического параметра (коэффициента K) установки, дает информацию об электрическом сопротивлении горных пород: $\rho_k = K \times \Delta U / J$.

Методика полевых работ ВЭЗ осталась практически неизменной на протяжении многих лет, но бурное развитие вычислительной техники позволило выйти теории интерпретации электрических зондирований на качественно новый уровень. В настоящее время успешно реализованы численные методы решения прямых и обратных задач электрических зондирований для весьма сложных моделей геоэлектрических сред [4]. Однако, несмотря на достигнутые успехи в создании новых компьютерных технологий, на этапе количественной интерпретации ВЭЗ отсутствуют достаточно строгие количественные оценки информативности исходных данных, обеспечивающей требуемую детальность расчленения разреза при заданном уровне помех. Необходимы новые эффективные алгоритмы доопределения задачи в условиях ее некорректности и неоднозначности модельного представления объекта исследований [6].

Одной из наиболее важных составляющих технологий интерпретации данных ВЭЗ является 1D инверсия [10]. 1D инверсия – это процедура «точечного» определения геоэлектрических параметров (удельного электрического сопротивления ρ и мощности слоев h) горизонтально-слоистой среды по отдельной кривой ВЭЗ. Далее выполняется согласование результатов интерпретации по профилю (серии кривых ВЭЗ), удовлетворяющее априорной геологической информации. 1D инверсия заключается в последовательном уточнении начального приближения к вектору параметров

$$\mathbf{q} = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N, h_1, h_2, \dots, h_{N-1}\}$$

геоэлектрического разреза, минимизирующему целевую функцию. В качестве целевой функции f обычно используют среднеквадратическое расхождение экспериментальных $\rho_k^{\text{э}}$ и теоретических ρ_k^T значений кажущихся электрических со-

противлений для всех M разносов линии

$$\text{AB: } f = \sum_{i=1}^M \left[(p_k^{\text{э}}(i) - p_{ki}^T(i)) / p_{ki}^T(i) \right]^2 \quad [9]. \text{ При}$$

этом подразумевается, что помехи η подчинены нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием, что является совершенно неоправданным с физической точки зрения для реальных условий проведения электроразведочных работ.

В статье предлагается новый метод 1D инверсии данных ВЭЗ, позволяющий успешно подавлять интенсивные знакопеременные помехи с произвольным законом распределения, а также проводить приближенную оценку качества выполненной интерпретации. Приводятся модельные и практические примеры использования метода.

Метод минимизации эмпирического риска

Ранее был разработан метод решения линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки, основанный на достаточно информативном предположении о равенстве нулю медианного значения помехи $Me[\eta] = 0$ [1]. Этот метод был назван методом минимизации эмпирического риска (МЭР), подробное описание используемого в нем математического аппарата приведено в работах [1-3]. Суть метода МЭР в данном случае состоит в рассмотрении множества D допустимых решений обратной задачи ВЭЗ, как области определения случайного вектора \mathbf{W} , описывающего возможные значения неизвестных параметров геоэлектрического разреза, что позволяет по имеющейся информации о свойствах помехи η построить функцию $P(\mathbf{W})$ плотности вероятностей вектора \mathbf{W} на этом множестве. Функция $P(\mathbf{W})$ позволяет понизить уровень неопределенности за счет ранжирования допустимых решений, \mathbf{W} – решения, отвечающие маловероятным вариантам помехи η , будут учитываться с меньшими ве-

сами, а то и вовсе могут быть исключены из рассмотрения. Таким образом, обеспечивается минимизация невязки теоретических и точных (по нашим представлениям) значений ρ_k , тогда как традиционный подход решает эту задачу опосредованно, путем минимизации теоретических и экспериментальных (зашумленных) величин ρ_k , что неэффективно при асимметричных распределениях помех. Математическое ожидание ошибки приближенного решения обратной задачи ВЭЗ методом МЭР является минимальным. Следует отметить, что именно для электроразведки, где уровень помех может быть сопоставим с амплитудой полезного сигнала, дальнейшее применение метода МЭР с целью регуляризации исходной информации представляется наиболее перспективным.

Методика вычислительных экспериментов

Статистическое оценивание эффективности метода МЭР по результатам вычислительного эксперимента предполагает, помимо знания истинного решения обратной задачи, еще и работу с различными выборками помех. В процессе получения, обработки и интерпретации данных ВЭЗ возникают аппаратные, методические, геологические, техногенные, модельные помехи [6]. Главную роль в искажении аномалий ρ_k от целевых горизонтов на практике играют три последних типа помех, нередко проявляющихся совместно. Геологические помехи обусловлены элементами разреза, не представляющими интерес при решении поставленной геологической задачи (например, мелкими приповерхностными неоднородностями при изучении свойств глубинных горизонтов). Техногенные помехи создаются поземными техническими сооружениями (например, скважинами, трубопроводами, коммуникациями). Модельные помехи возникают за счет различий реальной геологической среды и используемой интер-

претационной модели [6]. Вполне очевидно, что закон распределения суммарной помехи η может существенно отличаться от нормального.

Для объективной оценки возможности метода МЭР требуется выполнение серийных модельных расчетов, а не решение практических задач (в которых истинный геоэлектрический разрез неизвестен). Тенденции, отслеживаемые по результатам серийных расчетов, в меньшей степени подвержены случайности, чем решения единичных примеров. Расчеты выполнены для $N = 100$ вариантов имитации помех в "наблюденных" кривых ВЭЗ, в каждом из которых использовалась своя генерация $\{\eta_i\}$ случайных чисел, имитирующих помеху.

Результаты вычислительных экспериментов

Проведем сопоставление результатов определения сопротивлений слоев на основе МЭР и минимизации среднеквадратического отклонения (МСО) на примере кривой ВЭЗ типа НК, характеризующей геоэлектрический разрез с параметрами: $\rho_1=1500$ Ом·м, $\rho_2=100$ Ом·м, $\rho_3=900$ Ом·м, $\rho_4=50$ Ом·м; $h_1=10$ м, $h_2=50$ м, $h_3=160$ м.

Использованный авторами численный метод решения прямой задачи ВЭЗ базируется на преобразованиях Ханкеля [6; 7]. При решении обратной задачи мощности слоев были фиксированными и отвечали истинным значениям, оценивались только сопротивления слоев ρ_i^* . Данная ситуация отвечает инверсии параметрической кривой ВЭЗ на буровой скважине. Разносы линии АВ изменялись от 3 до 3000 м, число разносов $M=18$. Точность приближенных решений обратной задачи оценивается по значению функционала

$$F = \left(0.25 \sum_{i=1}^4 (\rho_i^* - \rho_i)^2 \right)^{1/2} .$$

Далее будут использованы обозначения $F_{МСО}$ и $F_{МЭР}$ для результатов, полученных традиционным методом минимизации среднеквадра-

тического отклонения (МСО) и методом МЭР соответственно.

Ниже рассмотрены три серии вычислительных экспериментов, в каждой из которых генерировались разные типы случайных помех (рис. 1).

Помеха типа 1: η является нормально распределенной случайной величиной с нулевым матожиданием; ее амплитуда по модулю не превышает 50% амплитуды полезного сигнала на каждом разносе АВ установки зондирования. Генерация помехи осуществлялась с помощью алгоритма Бокса–Мюллера. Для $F_{МСО}$: среднее значение – 114.6, среднеквадратическое отклонение – 60.8, диапазон изменения 9–271 Ом·м. Для $F_{МЭР}$: среднее значение – 73.7, среднеквадратическое отклонение – 48.0, диапазон изменения 6–230 Ом·м.

Помеха типа 2: η является нормально распределенной случайной величиной с нулевым матожиданием; ее амплитуда по модулю не превышает 20% амплитуды полезного сигнала на разносах АВ от 3 до 30 м включительно, не превышает 50% от амплитуды полезного сигнала на разносах АВ от 30 до 300 м включительно и может достигать величины полезного сигнала (100%) на разносах АВ, превышающих 300 м. Это отражает процесс уменьшения разности измеряемых потенциалов ΔU в линии MN с увеличением коэффициента K установки ВЭЗ. Для $F_{МСО}$: среднее значение – 155.1, среднеквадратическое отклонение – 97.1, диапазон изменения 3–318 Ом·м, отклонение – 44.8. Для $F_{МЭР}$: среднее значение – 70.6, среднеквадратическое отклонение – 44.8, диапазон изменения 4–195 Ом·м.

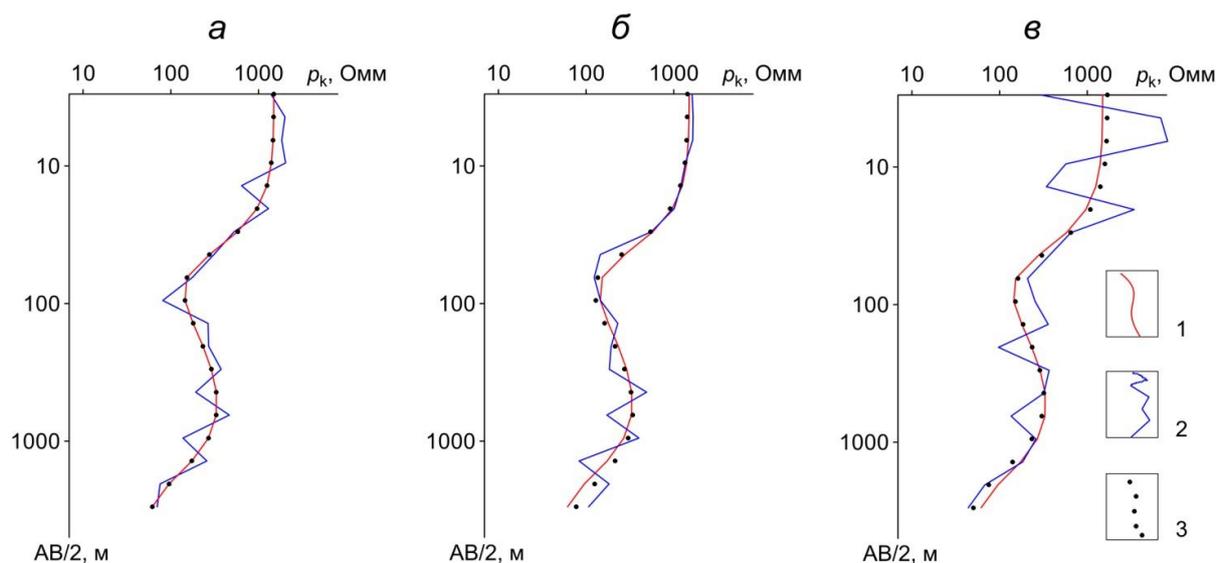


Рис. 1. Кривые ВЭЗ с помехами разного типа и результаты их инверсии: помеха типа 1 (а), помеха типа (б), помеха типа 3 (в); кривые ВЭЗ: 1 – исходная, 2 – осложненная помехой; 3 – модельная (результат инверсии)

Помеха типа 3: η получена путем увеличения в 5 раз 30% значений наиболее интенсивных случайных положительных помех, использованных в серии 1, поэтому обладает асимметричным законом распределения. Для $F_{МСО}$: среднее значение – 297.2, среднеквадратическое отклонение – 114.2, диапазон изменения 5–583 Ом·м. Для $F_{МЭР}$: среднее значение – 97.0, среднеквадратическое отклонение – 65.2, диа-

пазон изменения 8–375 Ом·м (рис. 2). Полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что МЭР обладает несомненными преимуществами перед традиционно используемым методом минимизации среднеквадратического отклонения и может повысить точность оценки удельных электрических сопротивлений изучаемого разреза в 2–3 раза и более.

Несомненным достоинством метода МЭР является его способность оценивать точность собственных результатов, что не представляется возможным при использовании стандартных детерминистских технологий интерпретации ВЭЗ. В методе МЭР анализ функции плотности вероятности $P(W)$ позволяет охарактеризовать прогнозируемую точность J решения об-

ратной задачи [2; 3]. Установлено, что зависимость между истинной и прогнозируемой точностью 1D инверсии данных ВЭЗ носит практически линейный характер, что дает право использовать этот факт для приближенной оценки качества интерпретационных построений на практике при неизвестных параметрах геоэлектрического разреза (рис. 3).

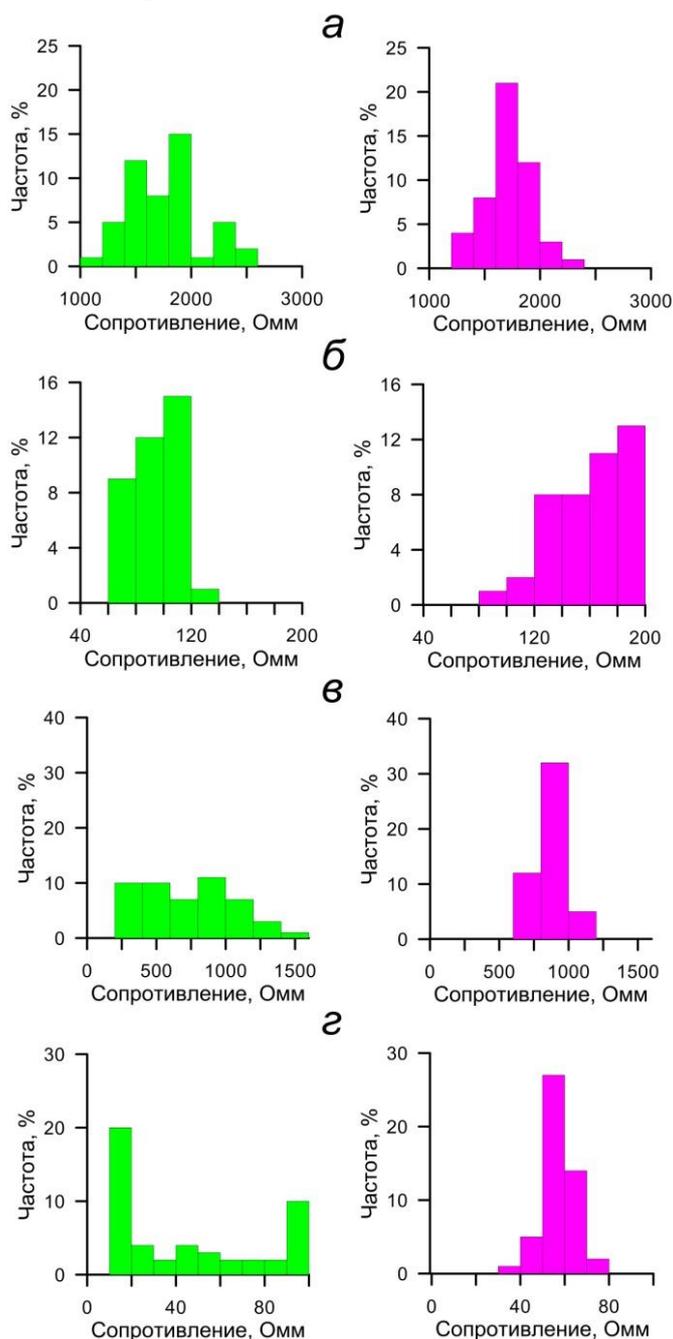


Рис. 2. Гистограммы электрического сопротивления, полученного методами МСО (зеленый цвет) и МЭР (фиолетовый цвет) для первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (г) слоев разреза при помехе типа 3

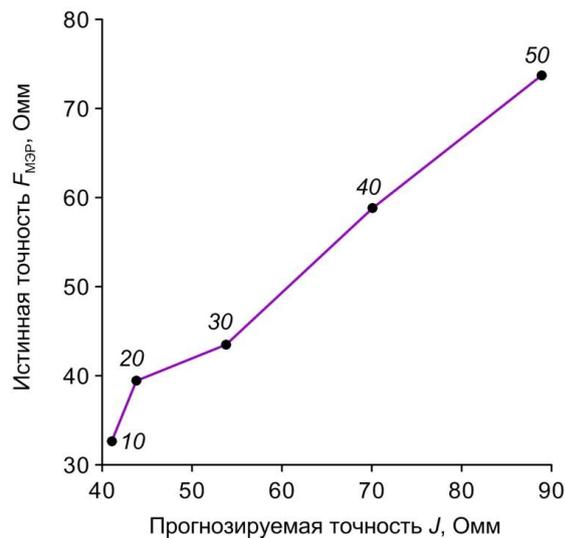


Рис. 3. Зависимость между истинной $F_{MЭР}$ и прогнозируемой J точностью инверсии данных ВЭЗ (цифрами указан максимальный уровень помех типа I в процентах от амплитуды полезного сигнала)

Интерпретация практических материалов

Применение метода МЭР для интерпретации нескольких параметрических кривых ВЭЗ, опирающихся на скважины, в сложных геоэлектрических условиях Игарского района позволило получить хорошие результаты (рис. 4). В результате интерпретации кривой типа Н получены следующие параметры геоэлектрического разреза: $\rho_1 = 707 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_2 = 159 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_3 = 2143 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $h_1 = 10 \text{ м}$, $h_2 = 180 \text{ м}$. Прогнозируемая точность инверсии $J=130 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Как очевидно, выявленные геоэлектрические границы не совпадают с геологическими, т.к. обусловлены мерзлотно-гидрологическими факторами. Это вносит определенные ограничения в использование метода ВЭЗ для литологического расчленения разреза. Нужно добавить, что данные ВЭЗ и электрокаротажа КС хорошо согласуются между собой.

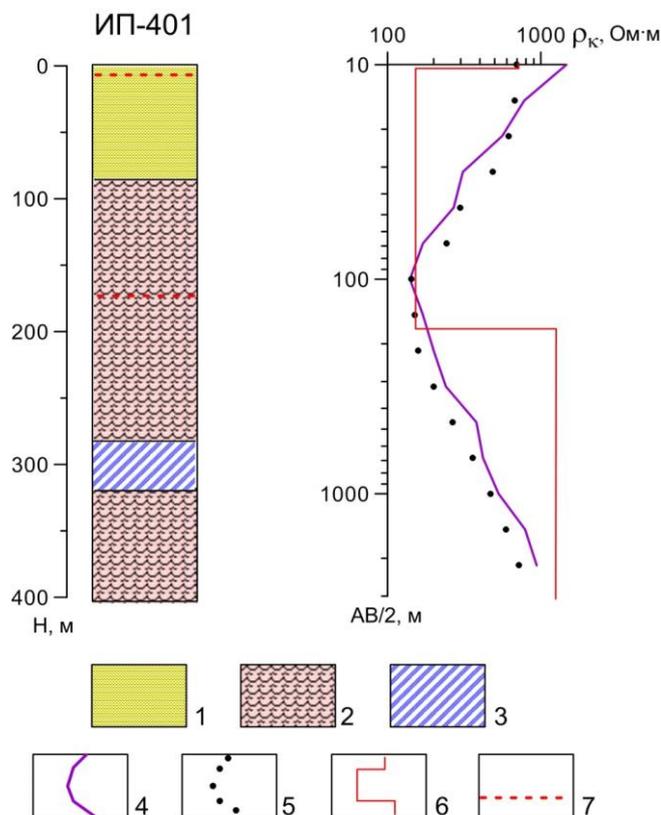


Рис. 4. Интерпретация параметрической кривой ВЭЗ на скв. ИП-401 (Игарский район): 1 – рыхлые отложения; 2 – глинистые сланцы; 3 – кварциты; кривые ВЭЗ: 4 – наблюдаемая, 5 – модельная (результат инверсии); 6 – результат интерпретации ВЭЗ; 7 – геоэлектрические границы

Оптимизация процесса вычислений

Следует отметить, что при числе оцениваемых параметров m порядка 4-6 метод успешно реализуется на современных компьютерах путем простого перебора их допустимых значений с равномерным шагом. По сравнению с линейными обратными задачами гравirazведки и магниторазведки количественная интерпретация данных ВЭЗ требует существенно больших вычислительных затрат. При большем числе оцениваемых параметров m целесообразно использовать дискретные аналоги метода МЭР, в которых построения ведутся на случайной последовательности векторов параметров W , генерируемой процедурами типа Монте-Карло. Сопоставим возможности равномерного и случайного поиска на примере решения обратной задачи электроразведки ВЭЗ для

ранее использованной теоретической кривой типа НК. Уровень помех на каждом разное составлял до 10% от полезного сигнала. Задача сводилась к определению сопротивления всех геоэлектрических горизонтов при их фиксированной мощности. При равномерном поиске использовались сетки, содержащие $N = 10^4, 10^8, 10^{12}, 10^{16}$ узлов в пределах области D ; а при случайном поиске генерировались последовательности, включающие в себя $M = 10, 10^2, 10^3, 10^4$ векторов W вида $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4\}$. Результаты, представленные на рис. 5 и в табл. 1, свидетельствуют о неоспоримых преимуществах случайного поиска: происходит увеличение скорости счета примерно в 200 раз при сохранении достаточно высокой точности получаемых результатов.

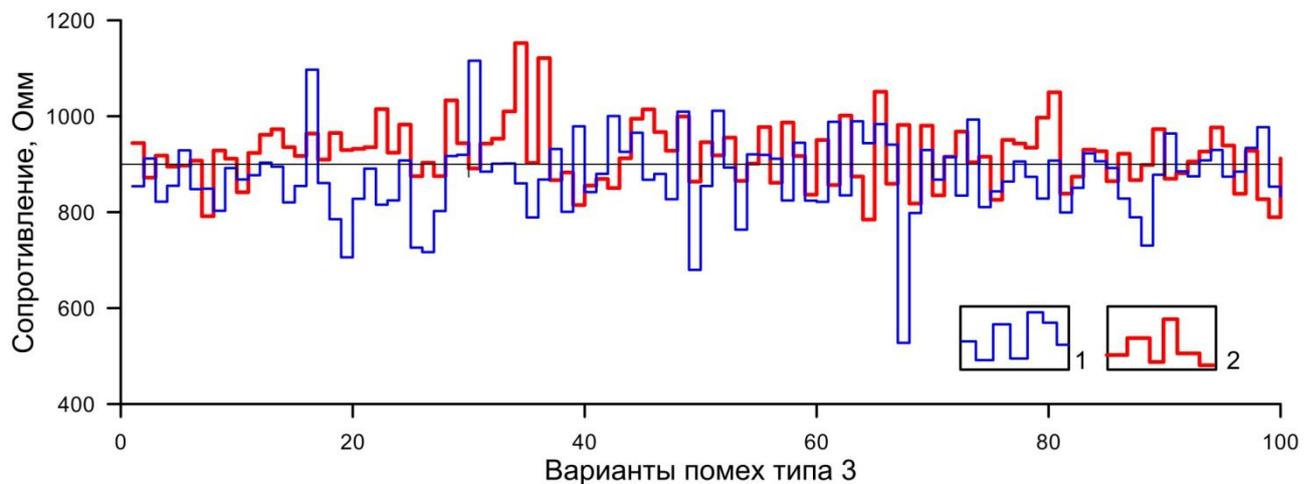


Рис. 5. Результаты определения сопротивления третьего слоя ($\rho_3=900$ Ом·м) разреза разными алгоритмами при помехе типа 3: 1 – поиск по равномерной сетке; 2 – случайный поиск

Характеристики решения обратной задачи ВЭЗ разными алгоритмами

Равномерный поиск			Случайный поиск		
Число узлов сетки N	$F_{МЭР}$, Ом	t , мин	Число векторов M	$F_{МЭР}$, Ом	t , мин
10^4	19.88	0.83	10	37.16	0.008
10^8	42.40	5.88	10^2	40.34	0.03
10^{12}	32.39	55.72	10^3	44.94	0.3
10^{16}	33.29	570	10^4	46.39	3.3

Заключение

В предлагаемом алгоритме 1D инверсии ВЭЗ с использованием метода МЭР аналогично сопротивлению слоев p_i могут определяться их мощности h_i либо обе группы этих параметров совместно. Алгоритм может быть модифицирован для работы не только с отдельной кривой зондирования, но и с серией кривых (профилем наблюдений). Авторы полностью разделяют мнение о целесообразности построения возможных решений обратной задачи и необходимости формализации опыта человека-исследователя при создании полностью автоматизированной многоэтапной компьютерной технологии интерпретации площадных наблюдений методом ВЭЗ [5]. Выполнение 1D инверсии данных ВЭЗ методом МЭР, обеспечивающее подавление интенсивных знакопеременных геоэлектрических помех, в будущем может стать одним из элементов такой технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-05-01823А и № 16-45-590046.

Библиографический список

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Балк Т.В., Христенко Л.А. Согласование конкурирующих вариантов интерпретации гравитационных аномалий методом минимизации эмпирического риска // Геоинформатика. 2015. №4. С. 24–35.
2. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанные вероятностно-детерминистские методы решения линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Геофизика. 2011. № 2. С. 20–29.
3. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки // Докл. Академии наук. Т. 438. № 4. 2011. С. 532-537.
4. Кауфман А.А., Андерсон Б.И. Принципы методов наземной и скважинной электроразведки / пер. с англ. Д.А. Алексеева. Тверь: Международная ассоциация "АИС", 2013. 488 с.
5. Колесников В.П. О повышении однозначности интерпретации электрических зондирований // Вестник Пермского университета. Геология. 2011. 2 (11). С. 45–51.
6. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М.: Научный мир, 2007. 248 с.
7. Куфут О. Зондирование методом сопротивлений. М.: Недра, 1984. 270 с.
8. Матвеев Б.К. Электроразведка. М.: Недра, 1990. 368 с.
9. Электроразведка: справочник геофизика / под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Кн. первая. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 438 с.
10. Basokur A.T. Automated 1D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct end iterative methods // Geophys. Prospect. 1999. Vol.47, № 2. P. 149-177.

Alternating Noise Suppression in the Vertical Electrical Sounding Data Inversion

P.I. Balk^a, A.S. Dolgal^{b,c}, A.V. Michurin^b, A.A. Taynitskiy^b, L.A. Hristenko^{b,c}

^aBerlin, BRD, Germany

^bMining Institute of the Ural Branch of RAS, 78A Sibirskaya Str., Perm 614007, Russia. E-mail: dolgal@mi-perm.ru

^cPerm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia

The authors suggest using a concept of minimizing the empirical risk during the inversion of the vertical electrical sounding (VES) data. The assumption of equal probability of positive and negative noise in measuring signal is made. The noise distribution may significantly differ from normal distribution. The advantage of method is the ability of

an approximate estimation of the accuracy of determining the geoelectric parameters of the section model. The appropriateness of using random search procedure in the calculation of the inverse problem is validated. The results of computational experiments confirmed the higher quality of the VES inverse problem solution using the proposed method in comparison with the traditional approach.

Key words: *electrical survey, sounding, inversion, signal, noise, minimizing the empirical risk, geoelectric section.*

References

1. *Balk P.I., Dolgal A.S., Hristenko L.A.* 2015. Soglasovanie konkuriruyushchikh variantov interpretatsii gravitatsionnykh anomalii metodom minimizatsii empiricheskogo riska [Coordination of competitive techniques of gravity anomalies interpretation using method of an empirical risk minimization]. *Geoinformatika*. 4: 24–35. (in Russian)
2. *Balk P.I., Dolgal A.S., Muchurin A.V.* 2011. Smeshannye veroyatnostno-deterministskie metody resheniya lineynykh obratnykh zadach gravimetrii i magnitometrii [Combined probabilistic and deterministic methods of solution in the linear inversion of gravity and magnetic data]. *Geofizika*. 2: 20–29. (in Russian)
3. *Balk P.I., Dolgal A.S., Michurin A.V.* 2011. Smeshanny veroyatnostno-deterministskiy podkhod k interpretatsii dannykh gravirazvedki, magnitorazvedki i elektrorazvedki [Combined probabilistic and deterministic approach to the interpretation of gravity, magnetic and resistivity data]. *Doklady Akademii nauk*. 438(4): 532–537. (in Russian)
4. *Kufman A.A., Anderson B.I.* 2010. Principles of electric methods in surface and borehole geophysics. Elsevier Science, p. 456.
5. *Kolesnikov V.P.* 2011. O povyshenii odnoznachnosti interpretatsii elektricheskikh zondirovaniy [About uniqueness of electrical sounding interpretation]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 2(11): 45–51. (in Russian)
6. *Kolesnikov V.P.* 2007. Osnovy interpretatsii elektricheskikh zondirovaniy [Basics of electrical sounding interpretation]. Nauchnyy mir, Moskva, p. 248. (in Russian)
7. *Koefoed O.* 1979. Geosounding Principles: Resistivity sounding measurements. Elsevier Scientific Publishing Company, p. 276.
8. *Matveev B.K.* 1990. Elektrorazvedka [Resistivity survey]. Nedra, Moskva, p. 368. (in Russian)
9. *Elektrorazvedka: Spravochnik geofizika* [Resistivity survey: Guide book for geophysicist]. Khmelevskoy V.K., Bondarenko V.M. (Eds.), Nedra, Moskva, 1989, p. 438. (in Russian)