

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф., Кривицкий Г.Е. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений: Состояние, проблемы, перспективы. – М.: Недра. 2012. – 371 с.: ил.
2. Бычков С.Г., Долгал А.С., Костицын В.И., Мичурин А.В., Симанов А.А. Объемное моделирование геологических объектов по гравитационному полю на основе синтеза качественных и количественных методов интерпретации // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 47-54.
3. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Гравиметрический мониторинг рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 10-16.
4. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Интерпретация результатов гравиметрического мониторинга на аварийных участках рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. тр. Вып. 1 (46) / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2019. – С. 59-63.
5. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Бычков С.Г. Результаты гравиметрического мониторинга аварийных участков рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / Казан. фед. ун-т. – Казань, 2018. – С. 130-131.
6. Мичурин А.В. Обработка и комплексная интерпретация результатов гравиметрического мониторинга на одном из потенциально опасных участков в г.Березники // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 37-41. DOI: 10.7242/echo.2019.3.10.
7. Мичурин А.В., Пугин А.В., Симанов А.А. Возможности гарантированного подхода при решении трехмерных обратных задач гравиразведки // Геоинформатика. – 2014. – №1. – С. 42-50.
8. Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Щербинина Г.П., Простолупов Г.В., Яковлев С.И. Гравиметрические исследования изменений плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ // Горный журнал. – 2008. – №10. – С. 37-41.
9. Bychkov S.G., Dolgal A.S., Simanov A.A. Synthesis of qualitative and quantitative methods of extraction of geological information out of gravimetric data // Eurasian mining. – 2013. – № 2. – P. 12-15.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2020.2.13

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЭР
ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ**

А.А. Тайницкий

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В рамках данной статьи приведены результаты практического применения метода минимизации эмпирического риска (МЭР) на примере данных ВЭЗ вдоль профиля, выполненного в Красновишерском районе Пермского края. Данные измерений значительно осложнены помехами, обусловленными плохими условиями заземления. Полученная в результате количественной интерпретации модель геоэлектрического разреза хорошо согласуется с представлениями о разрезе по данным бурения.

Ключевые слова: электроразведка, вертикальное электрическое зондирование, интенсивные помехи, метод минимизации эмпирического риска.

Введение

Интерпретация геофизических данных, осложненных помехой, является сложной и трудоемкой задачей. Традиционные подходы к решению обратной задачи (ОЗ) в условиях интенсивных помех оказываются малоэффективными. В данном случае речь идет об алгоритмах подбора, суть которых заключается в последовательном уточнении начального приближения к вектору параметров разреза, который обеспечивает минимум среднеквадратического расхождения экспериментальных и теоретических значений поля [3, 5]. Отличительной особенностью метода минимизации эмпирического риска (МЭР) является способность к подавлению знакопеременных помех, закон распределения

которых может заметно отличается от нормального, а амплитуда в отдельных случаях может достигать значений, сопоставимых с амплитудой полезного сигнала.

Метод минимизации эмпирического риска

Идеология метода строится на предположении, что исходные данные осложнены помехой, закон распределения которой неизвестен. Единственным условием, накладываемым на свойства помехи, является равенство нулю ее медианного значения ($Me(\eta) = 0$). На этом принципе основано разбиение множества вариантов решения обратной задачи D как области определения случайного вектора параметров разреза w на систему взаимно непересекающихся подмножеств Ω_r , а так же построение функции плотности вероятности $P(w)$ вектора w на множестве D [1, 2].

Минимум эмпирического риска обеспечивается вектором w^* с компонентами:

$$w^* = \sum_{r=1}^l p_r \bar{w}_{r,i}, \quad l = 1, 2, \dots, m \tag{1}$$

$$\text{где } \bar{w}_{r,i} = \frac{1}{\mu(\Omega_r)} \int_{\Omega_r} w_i dw_1 dw_2 \dots dw_m \tag{2}$$

где μ – классическая мера Лебега.

Опробование данного метода на модельных примерах показало его высокую эффективность при инверсии кривых ВЭЗ, осложненных помехой [4].

Результаты практического применения метода

В рамках данной статьи приведены результаты количественной интерпретации данных ВЭЗ вдоль профиля, выполненного в Красновишерском районе Пермского края. Зондирования выполнены симметричной четырех электродной установкой Шлюмберже, максимальный разнос составил $AB/2 = 200$ м.

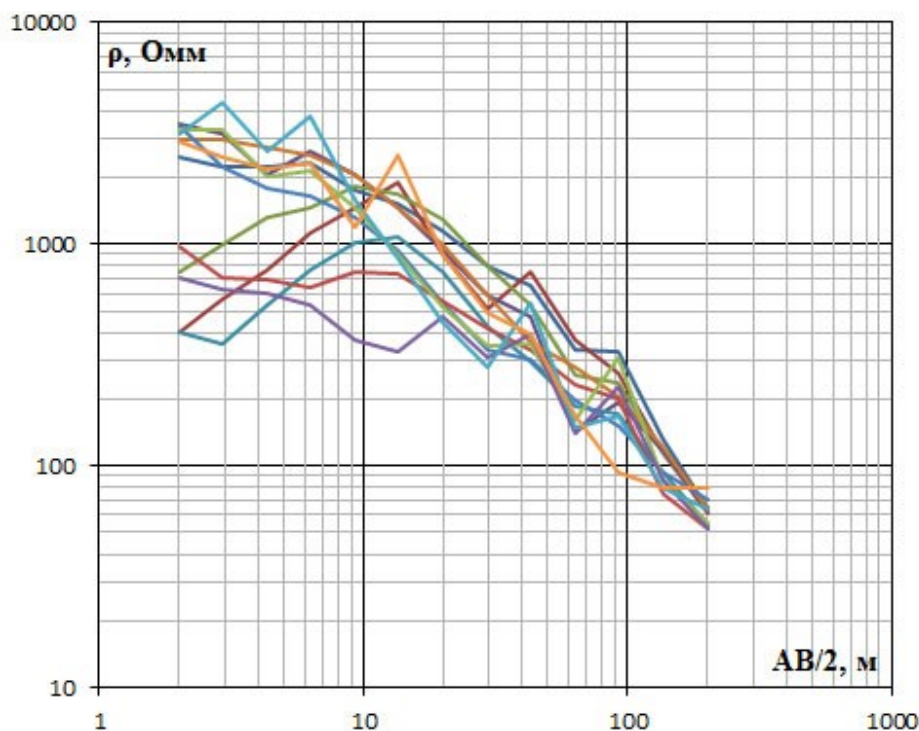


Рис. 1. Набор кривых ВЭЗ вдоль профиля

Кривые вертикального зондирования по внешнему виду отражают трёх-четырёхслойный разрез типа Q и KQ с низкоомным «опорным» горизонтом. На рисунке 1 приведены «полевые» кривые ВЭЗ вдоль профиля. Как видно из иллюстрации, данные измерений значительно осложнены помехами, обусловленными плохими условиями заземления, резкими переходами питающих электродов через границы «сухой песок – болото» и т.д.

По данным бурения гидрогеологических скважин, расположенных севернее участка исследований, разрез сложен мощными четвертичными отложениями до 60 м. Верхний слой, перекрытый почвенно-растительным слоем мощностью первые сантиметры, представлен песчаными водонасыщенными отложениями. Ниже по разрезу залегают суглинки тугопластичные с включениями щебня и мергеля до 30%. Четвертичные отложения подстилают водоносные породы шешминского терригенного комплекса (P_{1ss}).

Исходя из имеющейся информации о разрезе в таблицах 1 – 2, в колонке 1 приведены граничные значения параметров разреза $\{\rho_i^{min} < \rho_i < \rho_i^{max}, h_i^{min} < h_i < h_i^{max}\}$, в пределах которых выполнено решение обратной задачи.

При поиске решений в достаточно широком диапазоне возможных значений параметров разреза возникают определенные трудности, в частности во множества Ω_r с низкими индексами r «просачиваются» варианты решения ОЗ со значениями параметров разреза, существенно отличающимися от «оптимальных», что при окончательных расчетах по формулам (1, 2) приводит к неудовлетворительным результатам решения ОЗ в целом (рис. 2, кривая 2). Для повышения качества получаемых результатов, при их явном неудовлетворительном уровне, можно использовать следующие приемы регуляризации решения обратной задачи:

1) изменение граничных значений параметров области допустимых значений $\{\rho_i^{min} < \rho_i < \rho_i^{max}, h_i^{min} < h_i < h_i^{max}\}$ в случае, если искомые параметры расположены слишком близко к граничным значениям, либо лежат за пределами интервала допустимых значений (например, табл. 2 ПК 11 $\rho_I = 3000 - 10000$ Ом·м, и т.д.);

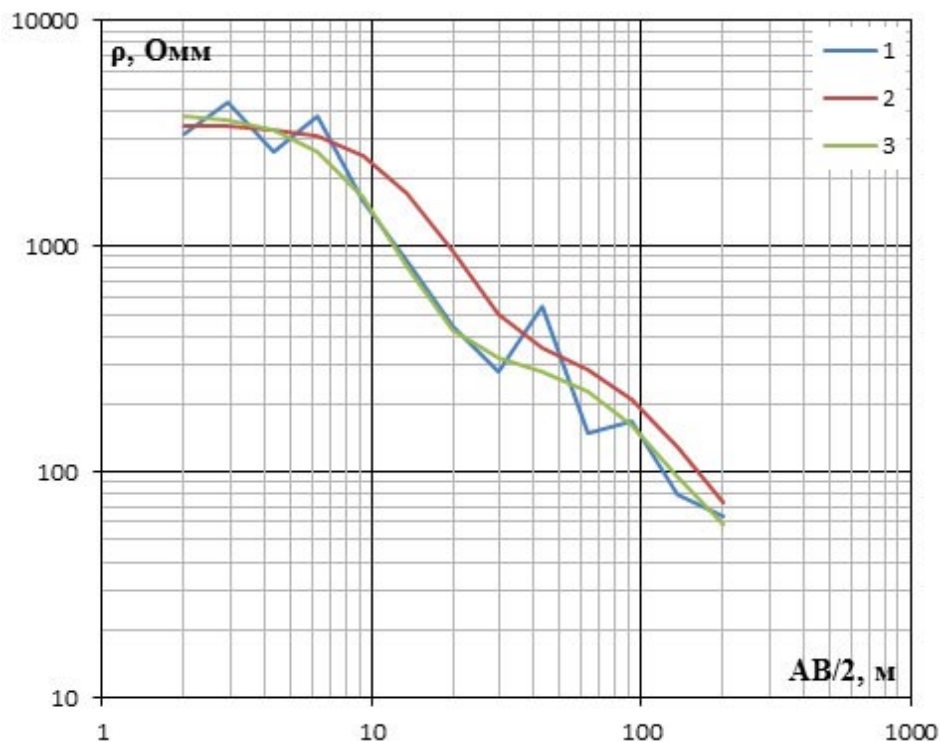


Рис. 2. Результаты решения обратной задачи для кривой ВЭЗ (ПК15):

1 – измеренная кривая; 2 – подобранная кривая при параметре СКО $\leq 50\%$ и $r = 1 - 12$;
3 – подобранная кривая при параметре СКО $\leq 30\%$ и $r \geq 3$

2) для уменьшения количества возможных комбинаций в заданном коридоре значений параметров в алгоритме используется дополнительный критерий, отсекающий варианты, заведомо «далекие» от искомого решения. В качестве такого критерия выступает относительное среднеквадратичное отклонение (СКО), обеспечивающее достаточную степень близости теоретического и экспериментального полей. Однако следует отметить, что уменьшение граничного значения СКО ведет к увеличению общего времени решения ОЗ, а слишком маленькое значение параметра (меньше возможного при данном уровне помех) вообще не даст решения. Наиболее оптимальные значения данного параметра расположены в диапазоне 15-50% (рис. 2);

Таблица 1

Результаты решения обратной задачи

	исх.модель	ПК 5	ПК 8	ПК 10	ПК 13	ПК 14	ПК 15	ПК 16
	1	2	3	4	5	6	7	8
ρ_1	500 – 4000	2315	2749	2705	3039	762	3880	2953
ρ_2	100 – 1000	594.6	377.1	378.4	310.6	304.7	304.2	317.2
ρ_3	20 – 70	40	46	48	41	42	42	45
h_1	1 – 10	7.3	7.3	6.5	4.2	3.2	4.2	5.0
h_2	20 – 70	42.3	43.0	39.3	46.9	43.1	43.7	35.5
$f, \%$	-	9.6	19.3	7.8	27.4	24.7	32.6	55.6
$J_0, \%$	-	7.1	14.1	8.8	11.6	13.7	12.2	17.1

3) в определенных ситуациях, когда уровень помех слишком высокий и не позволяет уменьшить значение параметра СКО, можно исключить из расчетов по формулам (1, 2) множества Ω_r с низкими индексами r (подразумеваются множества с индексами r менее 3 – 4). Другими словами, использовать для расчетов «оптимальные» параметры разреза большим числом пересечений теоретической и экспериментальной кривых (рис. 2).

Таблица 2

Результаты решения обратной задачи

	исх.модель	ПК 6	ПК 7	ПК 9	ПК 11	ПК 12
	1	2	3	4	5	6
ρ_1	500 – 3000	561	720	327	5486	744
ρ_2	500 – 5000	2997.8	3353.1	2483.3	1454.7	844.3
ρ_3	100 – 1000	474	381	214	279	321
ρ_4	20 – 70	42	46	45	49	36.9
h_1	0.1 – 3	1.8	1.7	1.6	1.1	1.0
h_2	1 – 10	5.4	5.9	4.6	6.9	6.7
h_3	20 – 70	46	43	43	40	40
$f, \%$	-	30.1	11.2	21.3	14.1	13.7
$J_0, \%$	-	11.7	6.6	10.8	5.9	7.9

Опираясь на вышеизложенные доводы, выполнена количественная интерпретация кривых ВЭЗ, приведенных на рис. 1. Результаты решения обратной задачи по каждой кривой сведены в таблицы 1 и 2 в виде модальных значений параметров разреза для $n = 30$ вариантов решения ОЗ. Параметр f характеризует СКО между кривой ВЭЗ рассчитанной для полученных параметров разреза и измеренной. Величина J_0 – математическое ожидание погрешности определения параметров разреза. Кроме того, полученные результаты представлены в виде геоэлектрического разреза (рис. 3) с использованием интерфейса программы IPI2Win (МГУ, 2006).

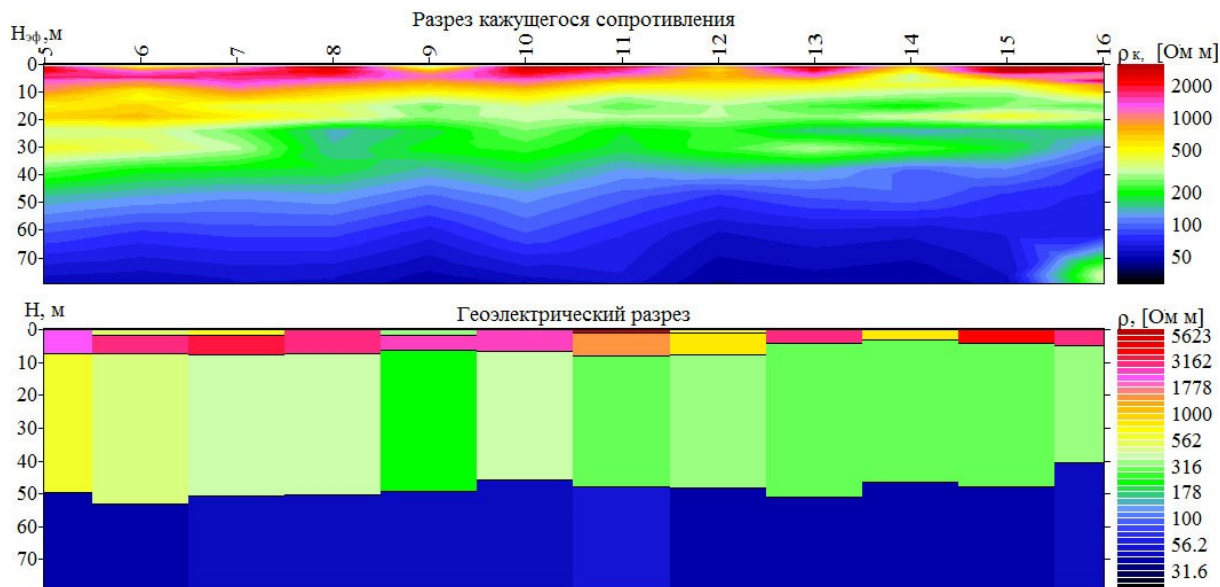


Рис. 3. Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, построенный по результатам решения обратной задачи методом МЭР (IPI2Win, МГУ, 2006)

На геоэлектрическом разрезе (рис. 3) первые 1 – 2 слоя, имеющие повышенные значения УЭС, отождествляются с песчаными отложениями. Данные слои характеризуются сильной неоднородностью, как по мощности (3 – 7 м), так и по сопротивлению (300 – 4000 Ом·м). Ниже по разрезу выделяется слой относительно более низких значений сопротивлений (200 – 600 Ом·м) мощностью 40 – 50 м, сложенный суглинками с включениями щебня и мергеля. В данном слое прослеживается снижение сопротивлений в восточном направлении, что вероятнее всего обусловлено уменьшением содержания щебня в суглинках. Нижний низкоомный (35 – 48 Ом·м) слой отождествляется с водоносными породами шешминского терригенного комплекса.

Выводы

Таким образом, выполнена количественная интерпретация данных осложненных интенсивными помехами методом МЭР. На практических данных продемонстрирована эффективность данного подхода при подавлении случайных знакопеременных помех с неизвестным законом распределения без предварительной их подготовки (сглаживание, нормализация и т.д.). Полученная модель геоэлектрического разреза характеризуется горизонтально слоистым строением, а параметры разреза хорошо согласуются с представлениями о разрезе по данным бурения.

Работа выполнена в рамках Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0147-С-02 (Регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690034-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки // Докл. Акад. наук. – 2011. – Т. 438, № 4. – С. 532-537.
2. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В., Тайницкий А.А., Христенко Л.А. Подавление знакопеременных помех при инверсии данных вертикального электрического зондирования // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2016. – Вып. 2 (31). – С. 55-63.
3. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
4. Тайницкий А.А., Кичигин А.В. Оценка метода МЭР и традиционного метода решения обратной задачи // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы конф. / Ин-т геофизики УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2019. – С. 243-246. – (Десятые науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича).
5. Электроразведка методом сопротивлений / под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. – М.; Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.

УДК 550.312

DOI:10.7242/echo.2020.2.14

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИРАЗВЕДКИ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ЗЕМЛЕ

В.В. Хохлова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Изучены существующие и создан новый метод решения прямой задачи гравиразведки для топографических масс с учетом сферичности Земли. Этот метод базируется на применении сферических параллелепипедов для более достоверного описания возмущающих масс; использовании сферы Каврайского для аппроксимации Земли; формировании аналитической модели рельефа для замены цифровой модели.

Проведена оценка искажений гравитационных аномалий, возникающих при игнорировании криволинейности земной поверхности. На модельных примерах показано, что возникающие при этом погрешности могут достигать 5% от максимальной амплитуды аномалии. В качестве оценки снизу предложено использовать разность радиальной и вертикальной составляющих силы тяжести в точках измерений, обусловленных одним и тем же пространственным распределением масс.

Создана программа для ЭВМ «Первичная обработка гравиметрических данных», в которой реализовано два глобальных способа вычисления аномалии силы тяжести: по стандартному графу обработки (описан в Инструкции по Гравиразведке) и по новым стандартам (Hinze W.J. et al., 2005 "New standards for reducing gravity data").

Ключевые слова: гравиразведка, сферический параллелепипед, радиальная составляющая, обработка полевых данных.

С целью совершенствования теории обработки и интерпретации геофизических полей созданы современные технологии, которые реализуют принципиально новый подход к получению исходной информации для решения широкого круга геологических задач. Основной задачей исследований в рамках данной проблемы является научное обоснование и разработка методов учета сферичности Земли при решении прямой задачи гравиметрии.

Об актуальности задачи учета криволинейной поверхности Земли говорят ранее проведенные исследования по изучению ошибок, вызванных идеализацией формы Земли на стадии ввода поправок при редуцировании полевых гравиметрических данных. Ряд ученых (Takin M., Talwani M., 1966; Karl J.H., 1971; Vanicek P. et al., 2001; Гордин В.М., 1974; Лукавченко П.И., 1961, Ремпель Г.Г., 1980; Каленицкий А.И., Смирнов В.П., 1981) указывали на важность учета сферичности. Также следует учесть, что гравиметрическое и топогеодезическое оборудование постоянно совершенствуется, появляются всё более точные данные о рельефе земной поверхности, увеличиваются