

П.В.ИВАНОВ, аспирант, *pavel.vl.ivanov@gmail.com*
Московский государственный университет

P.V.IVANOV, post-graduate student, *pavel.vl.ivanov@gmail.com*
Moscow State University

СОВМЕСТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МЕТОДОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Рассматривается комплексирование методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в рамках одномерных моделей. Использование этими двумя методами разных составляющих электромагнитного поля (ЭМП) позволяет с одной стороны уменьшить область эквивалентных решений, с другой – получить более полную информацию о геологической среде.

Ключевые слова: комплексирование методов, метод вертикального электрического зондирования, метод зондирования становлением поля в ближней зоне, функционал невязки, макроанизотропия.

JOINT INTERPRETATION OF VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING AND TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD DATA

The integration of vertical electrical sounding (VES) with transient electromagnetic method (TEM) in the one-dimensional models discusses. Application of these two methods of the various components of the electromagnetic field (EMF) allows to reduce the area of equivalent solutions and to get more information on the geological environment.

Key words: integration of methods, vertical electrical sounding, transient electromagnetic method, misfit functional, macroanisotropy.

Основным недостатком метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) является проблема определения глубины границ из-за широкой области эквивалентных решений. Сузить эту область позволяет комплексирование с методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), который дает устойчивое положение границ до проводящих слоев. Но измерения ЗСБ на временах становления примерно до 10 мкс зачастую искажены собственными процессами в измерительной установке, и верхние несколько метров разреза недоступны для изучения. Эта проблема решается привлечением данных ВЭЗ.

Главным различием методов является использование каждым из них разной со-

ставляющей электромагнитного поля (ЭМП): ВЭЗ – гальванической, ЗСБ – индукционной. Здесь стоит вспомнить «принцип информационной дополнителности» из двумерной магнитотеллурики [1], который содержит выводы относительно чувствительности и точности 2D-аппроксимации ТЕ-моды (соответствует данным ЗСБ) и ТМ-моды (соответствует данным ВЭЗ).

Геологическая среда в одномерном представлении содержит большое количество слоев. Чтобы избежать неоднозначности решения обратной задачи, это количество сводят к минимальному. При этом замена нескольких слоев одним возможна только в том случае, если суммарный слой представить макроанизотропным с коэффициентом

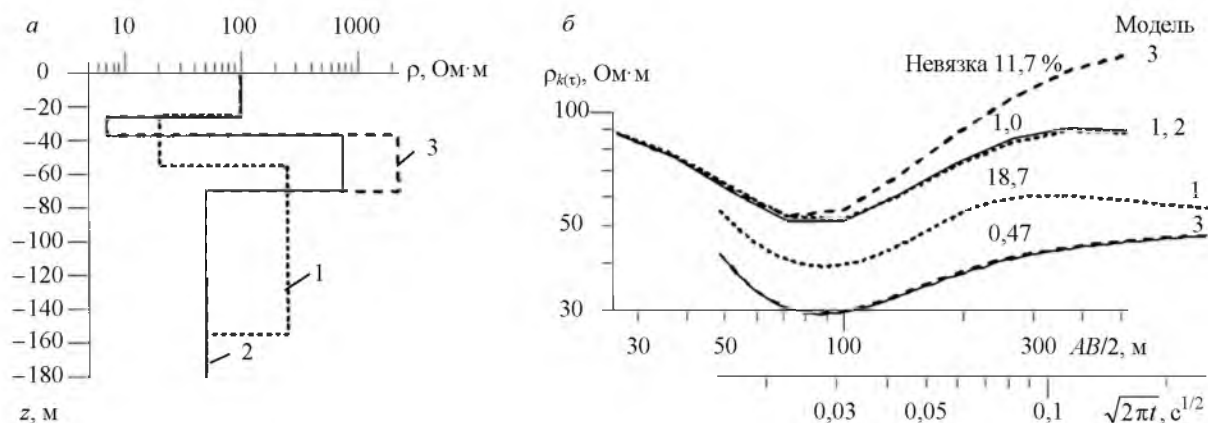


Рис. 1. Модели 1-3 (а) и кривые ВЭЗ и ЗСБ, полученные решением прямой задачи для этих моделей (б).
Указаны невязки между данными относительно модели 2

$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l}$, где ρ_n и ρ_l – сопротивление слоя вкрест и вдоль напластования [3]. Причем в методе ЗСБ мощность суммарного слоя h сохраняется, а сопротивление равняется ρ_l ; в методе ВЭЗ мощность суммарного слоя завышается в λ раз, а его сопротивление равно $\lambda \rho_l$. Таким образом, комбинируя эти два метода, можно получить больше информации о многослойной среде, а именно о макроанизотропии ее слоев.

Совместная интерпретация данных методов ВЭЗ и ЗСБ. На рис.1 и в таблице приведены результаты расчета прямой задачи ВЭЗ и ЗСБ для трех разных моделей. Видно, что модели 1 и 2 для метода ВЭЗ являются эквивалентными: расхождение между кривыми составило 1 %. Однако, для метода ЗСБ аналогичное расхождение равно 18,7 %. Подобно этому, кривые ЗСБ для моделей 2 и 3 практически совпали (расхождение 0,47 %), тогда как расхождение соответствующих кривых ВЭЗ более 10 %.

Результаты расчета для моделей 1-3

Номер слоя	Модель 1		Модель 2		Модель 3	
	ρ , Ом·м	h , м	ρ , Ом·м	h , м	ρ , Ом·м	h , м
1	100	25	100	26	100	26
2	20	30	7	11	7	11
3	250	100	750	33	2250	33
4	50	–	50	–	50	–

На этом примере видно, что эквивалентность разрезов в каждом методе оцени-

вается по разным параметрам: два разреза, эквивалентные по данным метода ВЭЗ, не будут эквивалентны по данным метода ЗСБ, и наоборот. Так появляется необходимость в создании общего функционала невязки для двух рассматриваемых методов:

$$F(\vec{p}) = \alpha \sum_{j=1}^{NR} \left(\ln \rho_{kj}^{obs} - \ln \rho_{kj}^t \right)^2 + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^{NT} \left(\ln \rho_{\tau j}^{obs} - \ln \rho_{\tau j}^t \right)^2,$$

$$\vec{p} = \{\ln h_1, \dots, \ln h_{N-1}, \ln \rho_1, \dots, \ln \rho_N\},$$

где \vec{p} – вектор параметров модели; N – количество слоев в модели; $\rho_{k(\tau)j}^{obs}$ и $\rho_{k(\tau)j}^t$ – наблюдаемые и теоретические значения кажущегося сопротивления на j -м разносе (индекс k) и на j -м времени задержки (индекс τ) соответственно; NR – количество разносов; NT – количество времен задержки; $0 \leq \alpha \leq 1$ – параметр, контролирующий соотношение вкладов данных ВЭЗ и ЗСБ в функционал.

Минимизация функционала такого вида реализована в программе IPI2win_tem для одномерных горизонтально-слоистых моделей [2]. В данной программе слои полагаются однородными, поэтому макроанизотропия может быть изучена путем объединения нескольких слоев и расчета коэффициента макроанизотропии [3] по формулам

$$h = \sum h_i; \quad \rho_l = \frac{h}{\sum h_i / \rho_i};$$

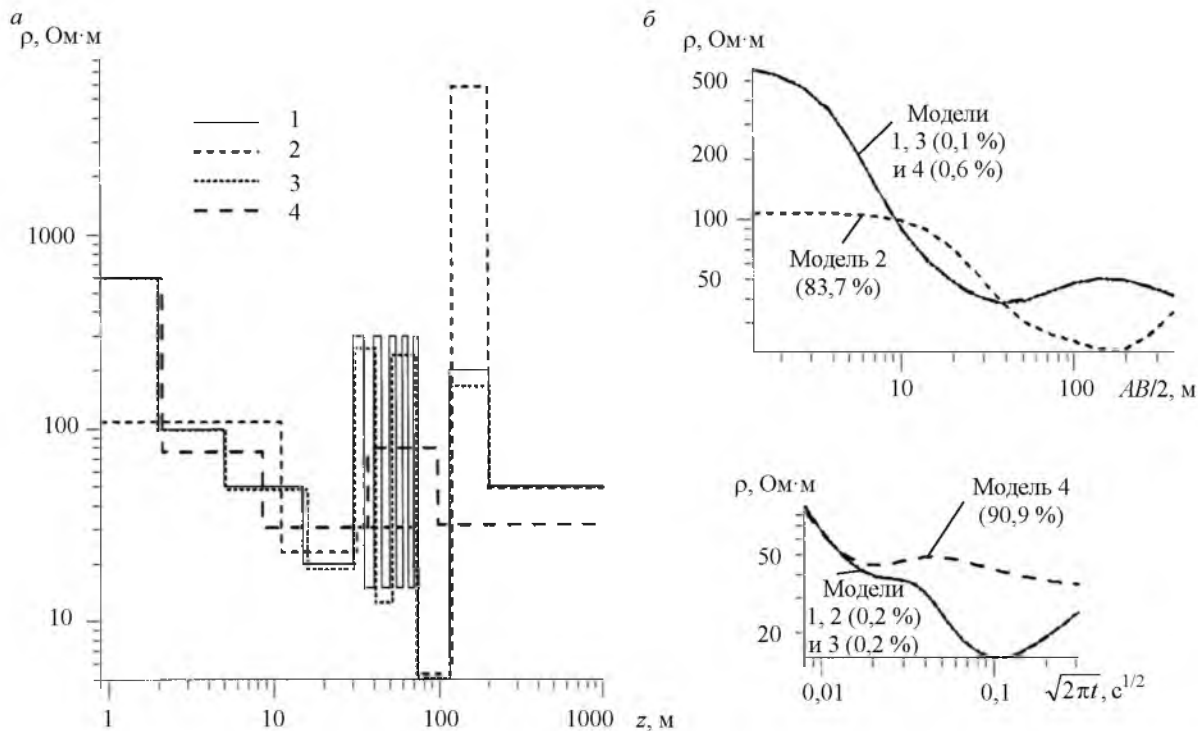


Рис.2. Модели 1-4, истинная и полученные по разным наборам данных методов ВЭЗ и ЗСБ (а) и результаты решения прямой задачи ВЭЗ и ЗСБ для каждой модели (б). На кривых указано расхождение с истинной кривой
1 – истинная модель; 2 – по данным ЗСБ; 3 – по данным ВЭЗ и ЗСБ; 4 – по данным ВЭЗ

$$\rho_n = \frac{\sum h_i \rho_i}{h}; \lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l},$$

где h и h_i – мощности соответственно макроанизотропного и i -го слоя; ρ_i – сопротивление i -го слоя.

Модельный пример. При комплексировании методов ВЭЗ и ЗСБ нужно разработать оптимальную стратегию интерпретации, аналогично последовательной частичной инверсии данных ТЕ- и ТМ-моды при магнитотеллурических исследованиях [1]. В начале интерпретации следует использовать только данные ЗСБ для устойчивого определения глубины до проводящих слоев. После этого, сделав дополнительное разбиение, нужно уточнять верхнюю часть разреза (ВЧР) и выявлять высокоомные составляющие в проводниках (при их наличии) по данным ВЭЗ.

Для модели (рис.2) была решена прямая задача ВЭЗ (симметричная установка Шлюмберже, разности $AB/2 = 1,39 \div 372,8$ м с геометрическим шагом $k = 1,39$) и ЗСБ (ус-

тановка «петля в петле» 50×50 м², времена измерения $t = 10,5$ мкс \div $15,3$ мс, $k = 1,19$). Модель содержит макроанизотропную толщину, представленную в виде чередования девяти тонких (по 5 м) слоев с сопротивлениями 15 и 300 Ом·м.

На первом этапе решения обратной задачи автоматической инверсии подвергаются данные только метода ЗСБ ($\alpha = 0$). Стартовая модель задается как однородное полупространство (ОПП): количество слоев в нем, их мощность и сопротивление ОПП устанавливаются исходя из вида кривой ЗСБ. В результате хорошо восстанавливаются границы глубинной части модели и ее сопротивление, за исключением высокоомного предпоследнего слоя, что объясняется плохой чувствительностью метода к изоляторам.

Понять, какие именно слои, помимо ВЧР, требуют дополнительного разбиения (т.е. выявить макроанизотропные толщи), можно с помощью фиксации всех глубин в модели ЗСБ и выполнения инверсии данных только метода ВЭЗ: для однородных слоев значения

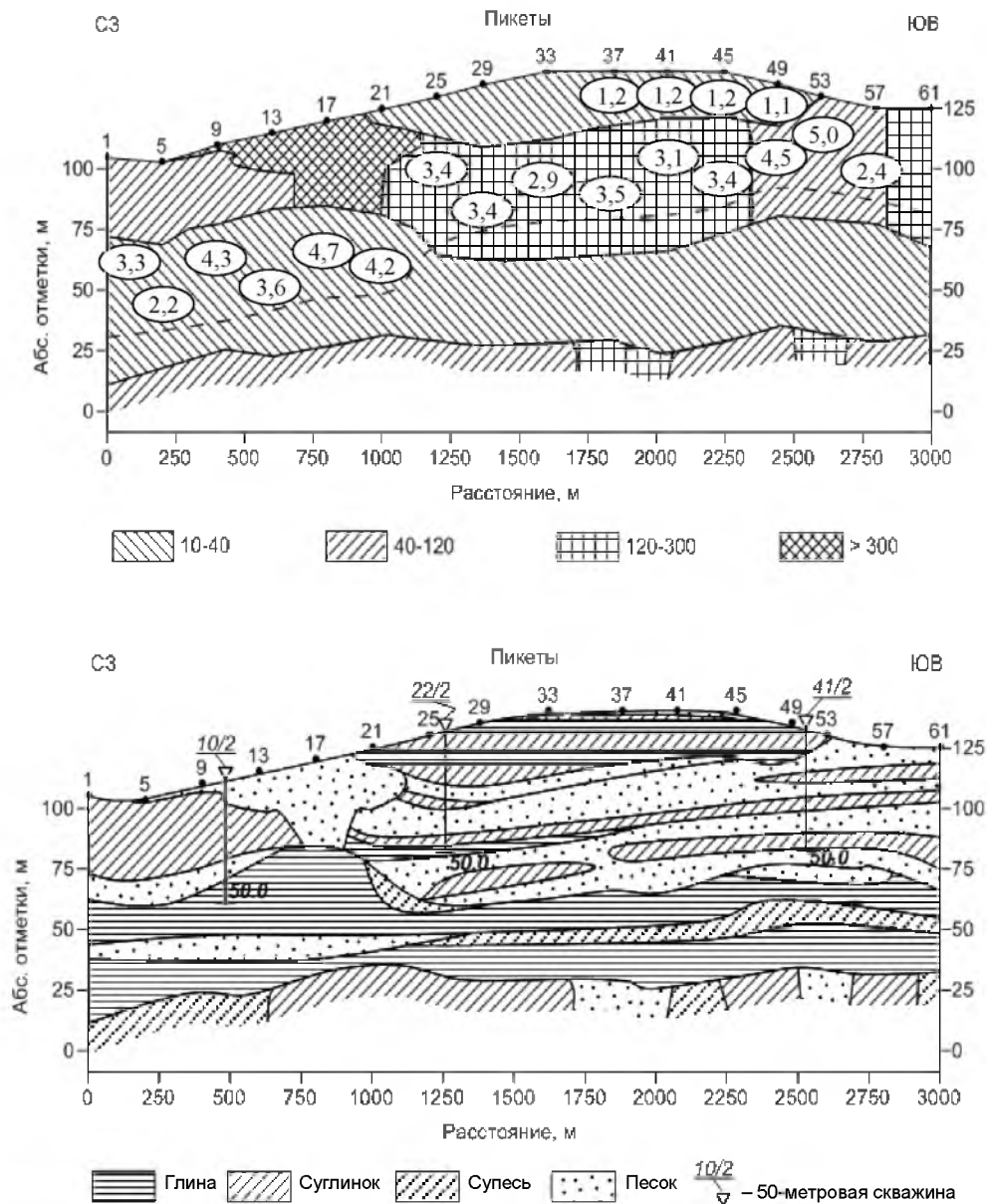


Рис.3. Геоэлектрический (а) и геологический (б) разрезы. На электрическом разрезе указаны значения коэффициента макроанизотропии слоя на данном пикете (числом в овале), продольные сопротивления, Ом·м (штриховкой) и условный уровень глубинности ВЭЗ (штриховой линией)

сопротивления практически не изменятся, тогда как для макроанизотропных увеличатся в несколько раз. Оптимальное количество слоев итоговой модели выбирается минимальным с маленькими невязками подбора кривых.

На рис.2 представлен результат второго этапа – совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ, в котором ВЧР и макроанизотропная толща представлены тремя слоями каждая. Причем при выполнении инверсии больший вес отдавался методу ВЭЗ. Полученные три

слоя, которые описывают макроанизотропную толщу, являются ее эквивалентным представлением. Поэтому, если рассмотреть разрез по профилю, вдоль которого макроанизотропная толща меняется плавно по мощности, количеству прослоев и (или) их сопротивлению, то эквивалентный набор слоев от точки к точке будет вести себя хаотично, а геоэлектрический разрез потеряет в наглядности. Таким образом, необходимо объединять эти слои в один. При этом суммарный слой пред-

лагается описывать тремя величинами, которые будут отражать все изменения макроанизотропной толщи в разрезе: мощностью, продольным сопротивлением и коэффициентом макроанизотропии. Для рассматриваемой модели значения этих параметров следующие: 42 м, 43 и 2,1 Ом·м. Для истинной модели соответственно 45 м, 32 и 2,3 Ом·м.

Кроме того, на рис.2 приведены результаты автоматической инверсии данных только метода ВЭЗ ($\alpha = 1$) от стартовой модели в виде ОПИ, параметры которого, как и в случае ЗСБ, определены исходя из кривой ВЭЗ.

Представленная стратегия совместной интерпретации данных ВЭЗ и ЗСБ была опробована на десяти различных моделях, в том числе не содержащих макроанизотропных толщ. Как и в приведенном примере, комплексирование методов ВЭЗ и ЗСБ везде продемонстрировало свою эффективность: верхнюю часть разреза удавалось восстановить благодаря методу ВЭЗ, нижнюю – благодаря ЗСБ, а в центральной части, где глубинность методов перекрывается, удается оценить макроанизотропию слоев.

Полевой пример. В 2008 г. в Томской области ООО «Северо-Запад» выполнило инженерные изыскания методами ВЭЗ (симметричная установка Шлюмберже, $AB/2 = 1,39 \div 77,2$ м, $k = 1,39$) и ЗСБ (установка «петля в петле» 50×50 м², $t = 12,6 \div 828$ мкс, $k = 1,19$). Рассмотрим профиль с шагом между пикетами около 200 м.

На рис.3, а показан результат совместной интерпретации двух методов. Отсутствие на некоторых пикетах информации о макроанизотропии означает, что слой удалось интерпретировать изотропным. Исключение составляет глубинная часть разреза, где нет данных метода ВЭЗ (область ниже штриховой линии). Невязки подбора кривых ВЭЗ и ЗСБ по профилю в большинстве точек не превышают 2 %.

Наличие вдоль профиля нескольких скважин позволило наполнить разрез геологической информацией (рис.3, б). Верхний проводящий слой представлен практически однородной «линзой» глин и суглинков (макроанизотропия не превышает 1,2). Под ним залегает толща, представленная песком и суг-

линком, неравномерно увлажненная и с множеством органических осадков. Ее коэффициент макроанизотропии меняется от 1 (на северо-западе) до 5. По априорным данным, ниже по разрезу располагается слой глин с включениями песков и супесей и прослоями лигнита. Макроанизотропия слоя изучена не полностью (на северо-западе коэффициент составляет в среднем 3,7), а профильные скважины не доходили до этой глубины, поэтому неоднородность данной толщи однозначно изобразить нельзя, и на рис.3 представлен один из возможных вариантов. В основании разреза залегает песчано-глинистая пачка.

В данной работе был поставлен вопрос о комплексном применении методов ВЭЗ и ЗСБ. Как следует из теории, эти два метода дают об изучаемой среде свою информацию, иногда сильно отличающуюся друг от друга. Поэтому необходимо уметь обобщать эти результаты, давая тем самым более полную информацию об изучаемом объекте. Безусловно, данный комплекс методов не является универсальным, а его успех в некоторых ситуациях будет зависеть от наличия априорной геологической и геофизической информации и опыта интерпретатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев. М., 2009.
2. Иванов П.В. Совместная интерпретация данных ВЭЗ и ЗСБ / П.В.Иванов, Д.А.Алексеев, А.А.Бобачев, А.А.Пушкарев, А.Г.Яковлев // Мат. 5-й Всерос. школы-семинара им. М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваняна по электромагнитным зондированиям Земли. Кн.2 / Под ред. А.К.Сараева. СПб, 2011.
3. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. В.К.Хмелевского, И.Н.Модина, А.Г.Яковлева. М., 2005.

REFERENCES

1. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotelluric. Moscow, 2009.
2. Ivanov P.V., Alekseev D.A., Bobachev A.A., Pushkarov P.Yu., Yakovlev A.G. Joint interpretation of VES and TEM // Proceedings of the Fifth All-Russia School-Seminar named M.N.Berdichevsky and L.L.Vanyan on electromagnetic sensing. Book 2 / Ed. by A.K.Saraev. Saint Petersburg, 2011.
3. Electric prospecting: benefit electroprospecting practice for students of geophysical disciplines // Ed. by V.K.Khmelevskoi, I.N.Modin, A.G.Yakovlev. Moscow, 2005.