

**ИВАНОВ П.В.**

Аспирант геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, pavel.vl.ivanov@gmail.com

**АЛЕКСЕЕВ Д.А.**

Геофизик ООО «Северо-Запад», г. Москва

**БОБАЧЕВ А.А.**

Доцент геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва

**ПУШКАРЕВ П.Ю.**

Доцент геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва

**ЯКОВЛЕВ А.Г.**

Доцент и доцент кафедры факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
ООО «Северо-Запад», г. Москва

**IVANOV P.V.**

A postgraduate student of the geological faculty of Lomonosov  
Moscow State University, Moscow, pavel.vl.ivanov@gmail.com

**ALEKSEEV D.A.**

A geophysicist of the «Severo-Zapad» Ltd., Moscow

**BOBACHEV A.A.**

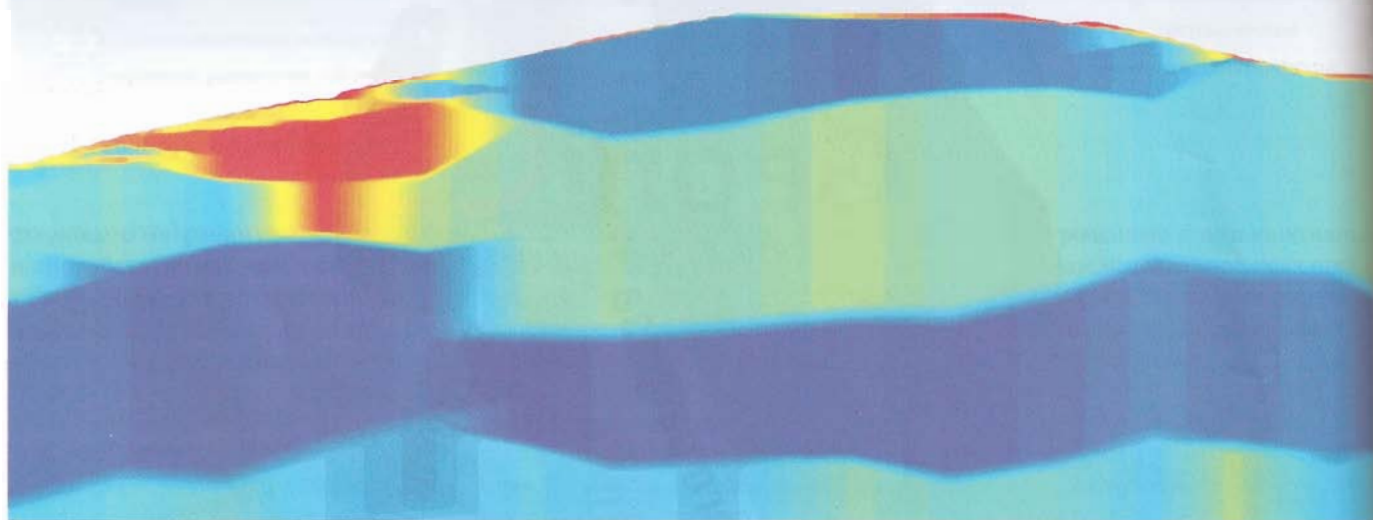
An associate professor of the geological faculty  
of Lomonosov Moscow State University, Moscow

**PUSHKAREV P.YU.**

An associate professor of the geological faculty  
of Lomonosov Moscow State University, Moscow

**YAKOVLEV A.G.**

An associate professor of the geological faculty of Lomonosov  
Moscow State University, the «Severo-Zapad» Ltd., Moscow



# О КОМПЛЕКСИРОВАНИИ МЕТОДОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

## ON INTEGRATED APPLICATION OF THE VES AND TEM GEOPHYSICAL METHODS

**Ключевые слова:** инженерная геофизика; комплексирование методов; вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ); зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ); электромагнитное поле (ЭМП); гальваническая составляющая ЭМП; индукционная составляющая ЭМП; макроанизотропия; функционал невязки.

**Аннотация:** в статье анализируются результаты комплексного применения методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) для получения более полной информации о многослойной геологической среде. В данной работе развивается подход П.О. Барсукова, Э.Б. Файнберга и Е.О. Хабенского, предложенный в 2004 году, и проводится его реализация в новой версии программы IPI2win для одномерных макроанизотропных моделей геологической среды, разработанной А.А. Бобачевым, которая позволяет работать одновременно с данными обоих методов. Первые попытки использования данной версии оказались успешными, что дает основание для продолжения начатых исследований в рассматриваемой области.

**Key words:** engineering geophysics; integrated application of methods; vertical electrical-sounding (VES); transient electromagnetic sounding in near-zone field (TEM); electromagnetic field (EMF); galvanic EMF component; induction EMF component; macroanisotropy, misfit functional.

**Abstract:** the article analyzes the integrated application results of the methods of vertical electrical-sounding (VES) and transient electromagnetic sounding in near-zone field (TEM) to obtain more information on multilayer geological environment. This paper develops the approach proposed by P.O. Barsukov, E.B. Fainberg and E.O. Khabensky in 2004 and carries out its implementation in the new version of the IPI2win program for one-dimensional macroanisotropic geological environment models developed by A.A. Bobachev that permits to work simultaneously with the VES and TEM data. The first attempts using this version have proved to be successful. The authors believe that it gives reason to continue the investigations in this area.



## Введение

При решении задач инженерной геологии, гидрогеологии и мерзлотоведения, как правило, изучаются глубины до первых сотен метров. В комплексе геофизических методов при этом широко используются различные модификации метода сопротивлений (электроразведки постоянным током). Это прежде всего вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), в том числе его современная модификация — электромография [3, 4, 8].

За последние десятилетия к методу сопротивлений добавился еще один метод электроразведки, имеющий другую физическую основу, — зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) [1, 5].

До конца прошлого века фактически доминирующим был метод ВЭЗ, с помощью которого разрез изучался до первых сотен метров. У этого метода несложная схема установки, для измерений с его помощью используется простая аппаратура. Он позволяет получать значения удельного электрического сопротивления (УЭС), являющегося чрезвычайно информативным параметром как в плане литологии, так и в отношении гидрогеологических и мерзлотных параметров горных пород. К недостаткам метода ВЭЗ относится резкое повышение трудоемкости измерений при увеличении глубины исследования и сложности определения глубин границ при интерпретации, что обусловлено широкой областью эквивалентных решений.

В методе ЗСБ используются импульсные поля в квазистационарной модели классической электродинамики. Так же как ВЭЗ, ЗСБ позволяет изучать УЭС горных пород. К преимуществам метода ЗСБ относятся простота установки и высокая производительность при изучении глубин до первых сотен метров. Но, поскольку результаты измерений с его помощью при очень маленьких величинах времени становления поля (примерно до 10 мкс) зачастую искажаются собственными процессами в измерительной установке, верхние несколько метров разреза получаются недоступными для изучения. Тем не менее два указанных метода имеют значительный общий интервал глубины исследования, причем с ее увеличением становится ощутимей преимущество ЗСБ при полевых измерениях.

Таким образом, комплексирование этих двух методов может помочь преодолеть недостатки каждого из них. Так, ЗСБ даст возможность решить

проблему эквивалентности решений при использовании ВЭЗ, а результаты измерений с помощью ВЭЗ дополнят «сверху» геоэлектрический разрез, полученный путем ЗСБ.

Целью данного исследования является создание методики совместной интерпретации данных обоих методов, позволяющей извлекать большее количество информации об изучаемой среде. Для этого были поставлены и решены следующие задачи: (1) реализация программного обеспечения, позволяющего минимизировать общий функционал невязки; (2) создание оптимальной стратегии совместной интерпретации данных двух методов; (3) опробование выработанной методики совместной интерпретации на модельных и полевых данных.

### Гальваническая и индукционная составляющие электромагнитного поля. Замена пачки слоев на макроанизотропный слой

При рассмотрении вопроса комплексирования методов ВЭЗ и ЗСБ первое, с чем приходится сталкиваться, — это то, что уровни кривых кажущегося сопротивления по их данным могут различаться между собой в несколько раз. Такие большие различия невозможно объяснить частотной дисперсией УЭС. В действительности они обусловлены использованием разных составляющих электромагнитного поля (ЭМП) — гальванической при ВЭЗ и индукционной при ЗСБ. Более того, можно вспомнить «принцип информационной дополненности» из области двумерной магнитотеллурики [2]. Естественно предположить, что выводы, касающиеся чувствительности и точности 2D аппроксимации ТЕ (поперечно-электрических) и ТМ (поперечно-магнитных) мод электромагнитного поля, имеют гораздо более широкий круг влияния и их можно распространить в том числе на два метода, рассматриваемые в данной работе. А именно ТЕ мода связана с токами, текущими вдоль границ между областями с различными УЭС, и отвечает за индукционные эффекты, что в нашем случае соответствует данным метода ЗСБ. ТМ мода связана с токами, текущими поперек этих границ, и отвечает за гальванические эффекты, поэтому она ставится в соответствие с данными метода ВЭЗ.

Как известно, геологическая среда, представленная в виде одномерной горизонтально-слоистой модели, состоит из большого числа слоев. При решении обратных задач геофизики, чтобы избежать неоднозначности решения, их ко-

личество в модели сводят к минимальному. При этом при замене нескольких геологических слоев одним слоем интерпретационной модели должны сохраняться *устойчивые параметры разреза*. Для группы «гальванических» методов такими параметрами являются *продольная проводимость проводящих слоев*  $S^z = \sum (h_i / \rho_i)$  (где  $h_i$ ,  $\rho_i$  — соответственно мощность и сопротивление  $i$ -го слоя) и *поперечное сопротивление высокоомных слоев*  $T^z = \sum (h_i \times \rho_i)$ . Для «индукционной» группы — это *суммарная продольная проводимость низкоомных слоев*  $S^x$  и *глубина подошвы высокоомных слоев*  $H^x$ .

Выполнение указанного условия возможно только в том случае, если суммарный слой представить как макроанизотропный, с коэффициентом макроанизотропии:

$$\lambda = \sqrt{\rho_n^z / \rho_l^z}, \quad (1)$$

где  $\rho_n^z$  и  $\rho_l^z$  — удельные сопротивления данного слоя поперек и вдоль напластования соответственно (рис. 1) [6].

Для гальванической составляющей сопротивление ( $\rho^l$ ) и мощность ( $h^l$ ) суммарного слоя находятся из уравнений:

$$T^z = h^l \times \rho^l, \text{ откуда } h^l = \sqrt{T^z \times S^z} = \sqrt{(h^z \times \rho_n^z) \times \left(\frac{h^z}{\rho_l^z}\right)} = h^z \times \lambda; \quad (2)$$

$$S^z = \frac{h^l}{\rho^l}, \text{ откуда } \rho^l = \sqrt{\frac{T^z}{S^z}} = \sqrt{\frac{(h^z \times \rho_n^z)}{\left(\frac{h^z}{\rho_l^z}\right)}} = \sqrt{\rho_n^z \times \rho_l^z} = \rho_m, \quad (3)$$

где  $\rho_m$  — среднегеометрическое сопротивление между  $\rho_n^z$  и  $\rho_l^z$ ,  $h^z$  — мощность суммарного слоя (макроанизотропной толщи).

В этом случае мощность суммарного слоя завышается в  $\lambda$  раз, а его сопротивление равно среднему геометрическому сопротивлению вдоль и поперек напластования.

Для индукционной составляющей сопротивление ( $\rho^H$ ) и мощность ( $h^H$ ) эквивалентного слоя определяются следующим образом:

$$h^H = h^z; \quad S^z = \frac{h^H}{\rho^H}, \quad (4)$$

$$\text{отсюда } \rho^H = \frac{h^H}{S^z} = \frac{h^z}{\left(\frac{h^z}{\rho_l^z}\right)} = \rho_l^z.$$

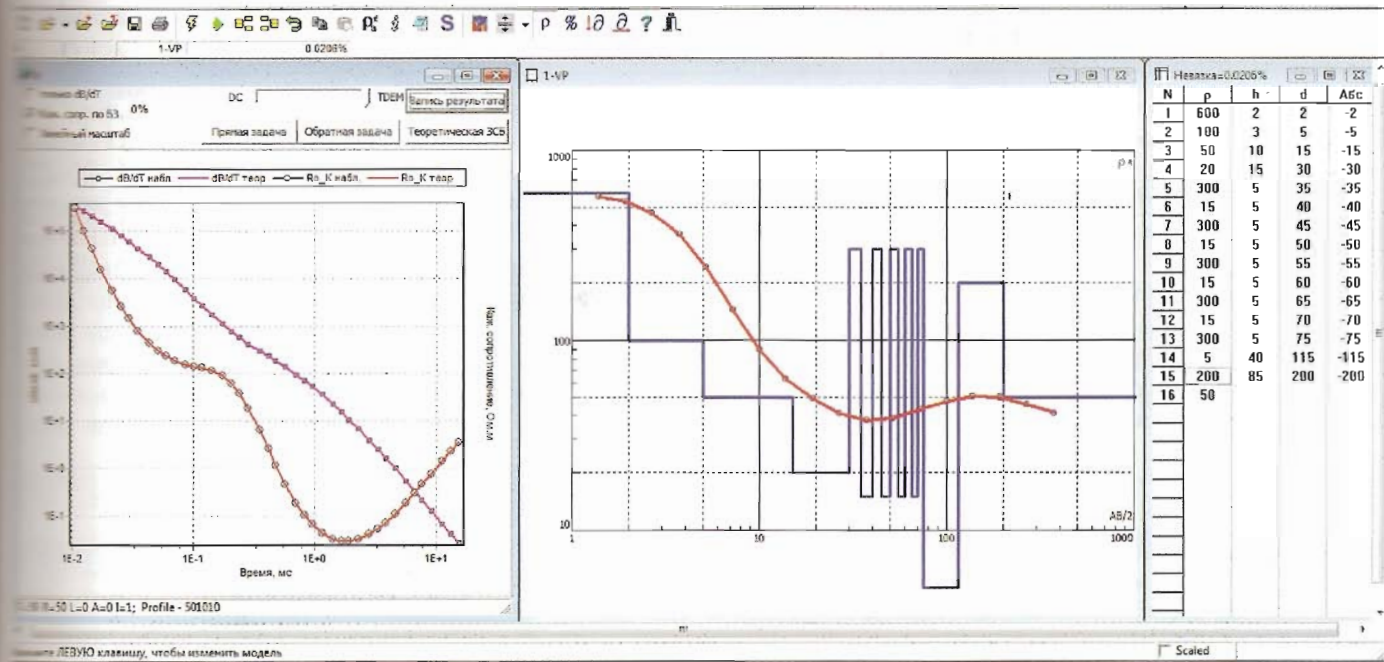


Рис. 3. Результаты решения прямой задачи ВЭЗ и ЗСБ в программе IPI2win для модели, представленной в виде ломаной линии и набора значений в таблице

наблюдаемые и рассчитанные кажущиеся сопротивления для метода ЗСБ (для  $i$ -го измерения);  $N$  — число измерений.

Такой подход несколько странен, поскольку в нем применяется сразу и разность логарифмов сопротивлений, и их нормировка.

Авторами настоящей статьи предлагается искать минимум следующего функционала (на основе работы [7], в которой рассматривается совместная инверсия данных методов ВЭЗ и ЗСБ в классе одномерных слоистых разрезов):

$$F(\vec{p}) = \alpha \sum_{j=1}^{N_R} (\ln \rho_{k,j}^o - \ln \rho_{k,j}^c)^2 + (1-\alpha) \sum_{j=1}^{N_T} (\ln \rho_{\tau,j}^o - \ln \rho_{\tau,j}^c)^2 \quad (6)$$

где  $\vec{p}$  — вектор параметров модели,  $\vec{p} = \{\ln h_1, \dots, \ln h_{N_L-1}, \ln \rho_1, \dots, \ln \rho_{N_L}\}$ ;  $h_1, \dots, h_{N_L-1}$  — мощности слоев;  $\rho_1, \dots, \rho_{N_L}$  — сопротивления слоев;  $N_L$  — количество слоев в модели;  $\rho_{k,j}^o, \rho_{k,j}^c$  — соответственно наблюдаемые и теоретические значения кажущегося сопротивления на  $j$ -м разное в методе ВЭЗ;  $\rho_{\tau,j}^o, \rho_{\tau,j}^c$  — со-

ответственно наблюдаемые и теоретические значения кажущегося сопротивления на  $j$ -м времени задержки в методе ЗСБ;  $N_R$  — количество разносов;  $N_T$  — количество времен задержки;  $\alpha$  — параметр, контролирующий соотношение вкладов данных ВЭЗ и ЗСБ в функционал,  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

А.А. Бобачевым была создана версия программы IPI2win, в которую помимо данных ВЭЗ для каждой точки измерения можно загружать данные ЗСБ и выполнять совместную интерпретацию. Рабочее окно данной версии

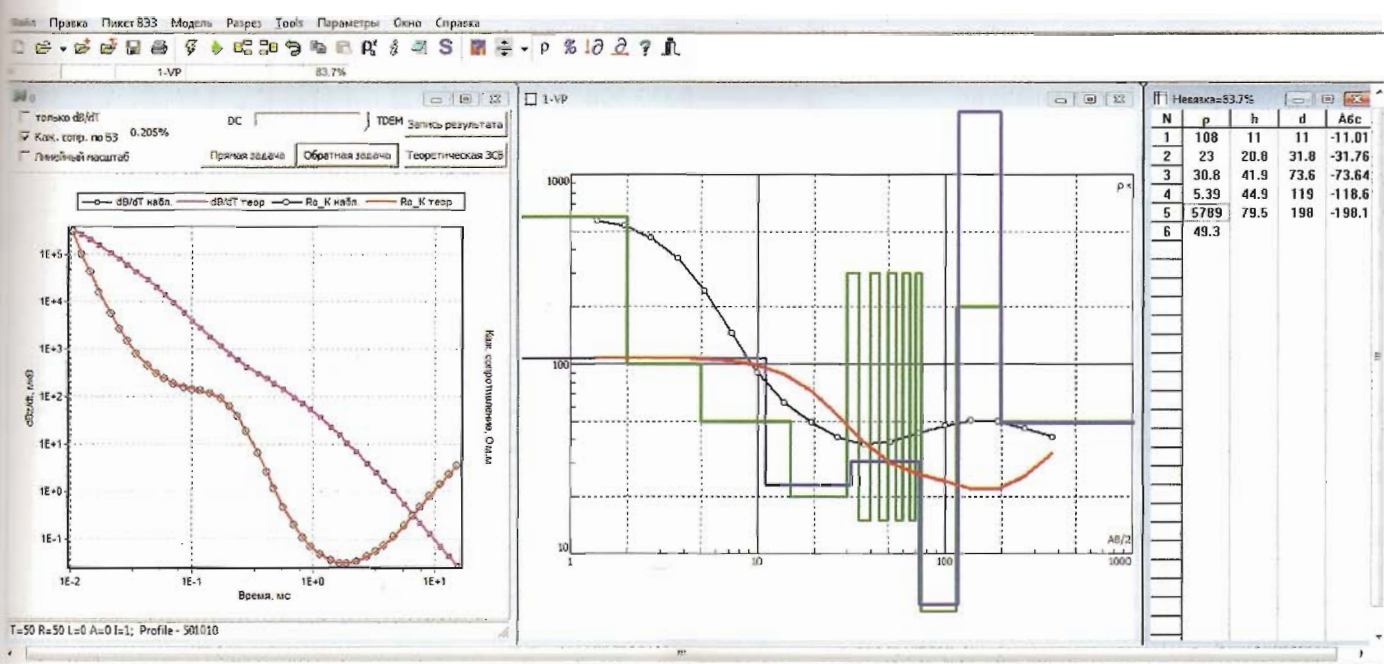


Рис. 4. Результат инверсии данных только ЗСБ — модель, представленная в виде ломаной линии синего цвета и набора значений в таблице (линия зеленого цвета соответствует «истинной» модели)

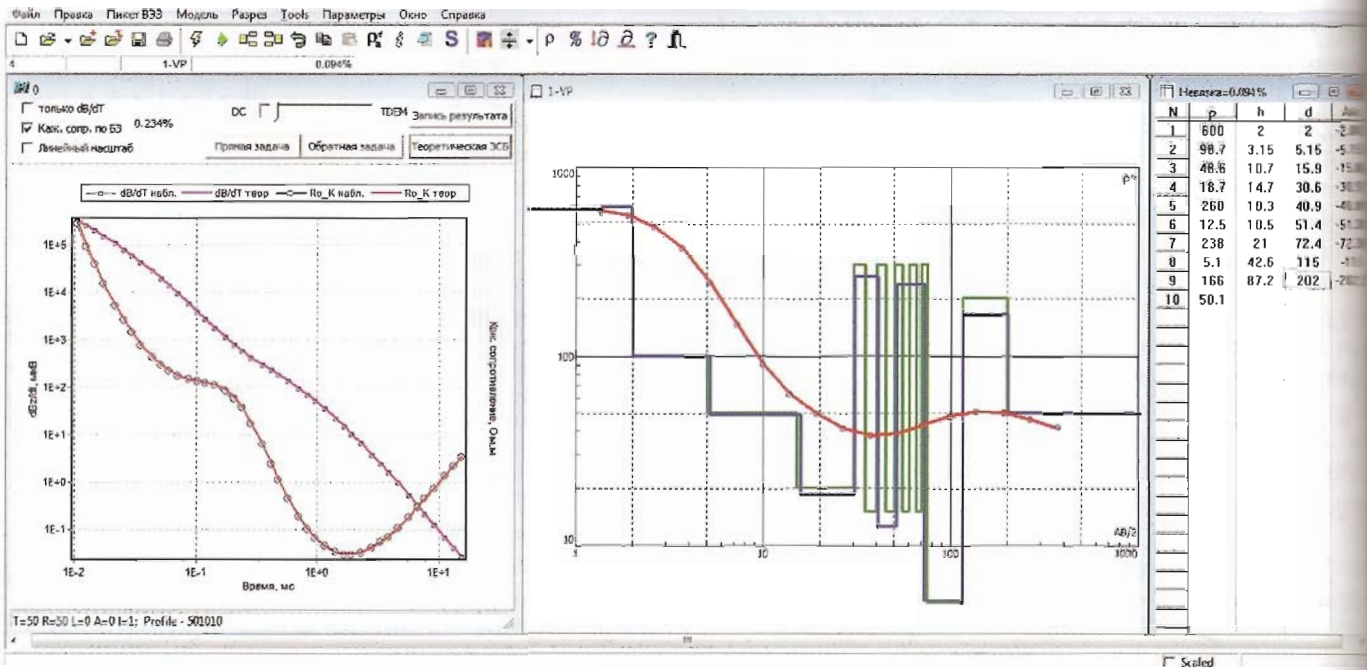


Рис. 5. Результат совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ — модель, представленная в виде ломаной линии синего цвета и набора значений в таблице (линия зеленого цвета соответствует «истинной» модели)

(рис. 3) для одной точки зондирования состоит из трех основных частей: (1) данных ЗСБ в виде кривых ЭДС (электродвижущей силы) и  $\rho_r$ , ползунок для задания «весового» параметра  $\alpha$  (слева на рис. 3); (2) кривой ВЭЗ и текущей модели в виде ломаной (в центре на рис. 3); (3) значений параметров текущей модели (справа на рис. 3). Для автоматического решения обратной задачи используется вариант метода Ньютона для минимизации невязки с использованием Тихоновского подхода к регуляризации решения некорректных задач. При регуляризации может использоваться априорная информация о глубинах границ и сопротивлениях слоев. Пока в функционале невязки не участвует третий параметр слоя (коэффициент  $\lambda$ ), макроанизотропные толщи могут быть изучены путем объединения нескольких однородных слоев, имеющих разные сопротивления, и расчета коэффициента макроанизотропии по вышеприведенным формулам.

**Стратегия комплексной интерпретации данных ВЭЗ и ЗСБ на модельных примерах**

При комплексировании методов ВЭЗ и ЗСБ нужно разработать оптимальную стратегию интерпретации, аналогичную последовательной частичной инверсии данных ТЕ и ТМ мод при магнитотеллурических исследованиях [2]. В начале интерпретации следует использовать только данные ЗСБ для устойчивого определения глу-

бин до проводящих слоев. После этого, сделав дополнительное разбиение, нужно уточнить данные по верхней части разреза и выявить высокоомные составляющие в проводящих слоях (при их наличии) по данным ВЭЗ.

Для модели, представленной на рис. 3, была решена прямая задача ВЭЗ и ЗСБ: для ВЭЗ использовалась симметричная установка Шлюмберже с разносами  $AB/2 = 1,39 \div 372,80$  м (где  $AB$  — расстояние между питающими

электродами), выполненных в геометрической прогрессии с коэффициентом 1,39; для ЗСБ — установка «петля в петле» размером  $50 \times 50$  м<sup>2</sup> и время измерения от 10,5 мкс до 15,3 мс при геометрическом шаге 1,19. Модель содержит макроанизотропную толщину, представленную в виде девяти чередующихся тонких (по 5 м) слоев с сопротивлениями 15 и 300 Ом·м.

На первом этапе решения обратной задачи автоматической инверсии под-

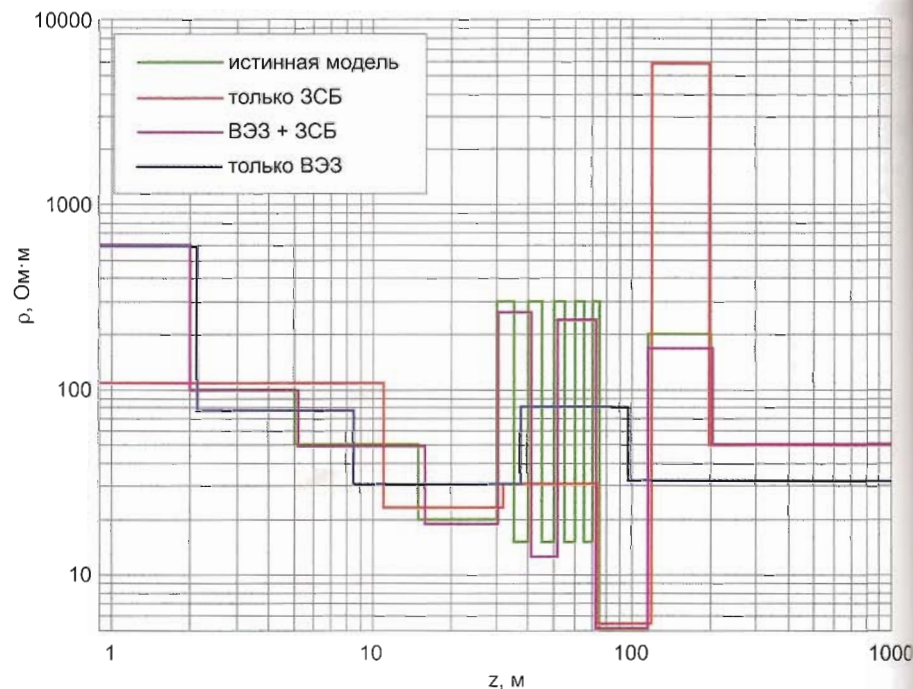


Рис. 6. Сравнение результатов совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ и полученных каждым из этих методов в отдельности



вергаются данные только метода ЗСБ толзунок в программе устанавливается на значение 100, что соответствует  $\alpha = 0$ ). При этом стартовая модель задается как однородное полупространство (ОПП), количество слоев в котором, их мощности и сопротивление ОПП устанавливаются исходя из вида кривой ЗСБ. Из рисунка 4 видна принципиальная невозможность извлечь верхнюю часть модели и получить информацию о макроанизотропии слоев. Тем не менее довольно хорошо восстанавливаются границы и

сопротивления глубинной части модели, за исключением предпоследнего слоя, что объясняется плохой чувствительностью метода ЗСБ к высокоомным слоям. Полученная модель является стартовой для дальнейшей интерпретации.

Понять, какие именно слои, помимо верхней части разреза, требуют дополнительного разбиения (то есть выявить макроанизотропные толщи), можно с помощью фиксации всех глубин в модели ЗСБ и выполнения инверсии данных только метода ВЭЗ. В этом случае

для однородных слоев значения сопротивления практически не изменятся, тогда как для макроанизотропных — увеличатся в несколько раз. Количество слоев, которое следует получить в результате дробления, выбирается оптимальным для их минимального числа в модели и низких невязок подбора кривых.

На рисунке 5 представлен результат совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ на базе стартовой модели, полученной только по методу ЗСБ, с дополнительным разбиением на 3 слоя как

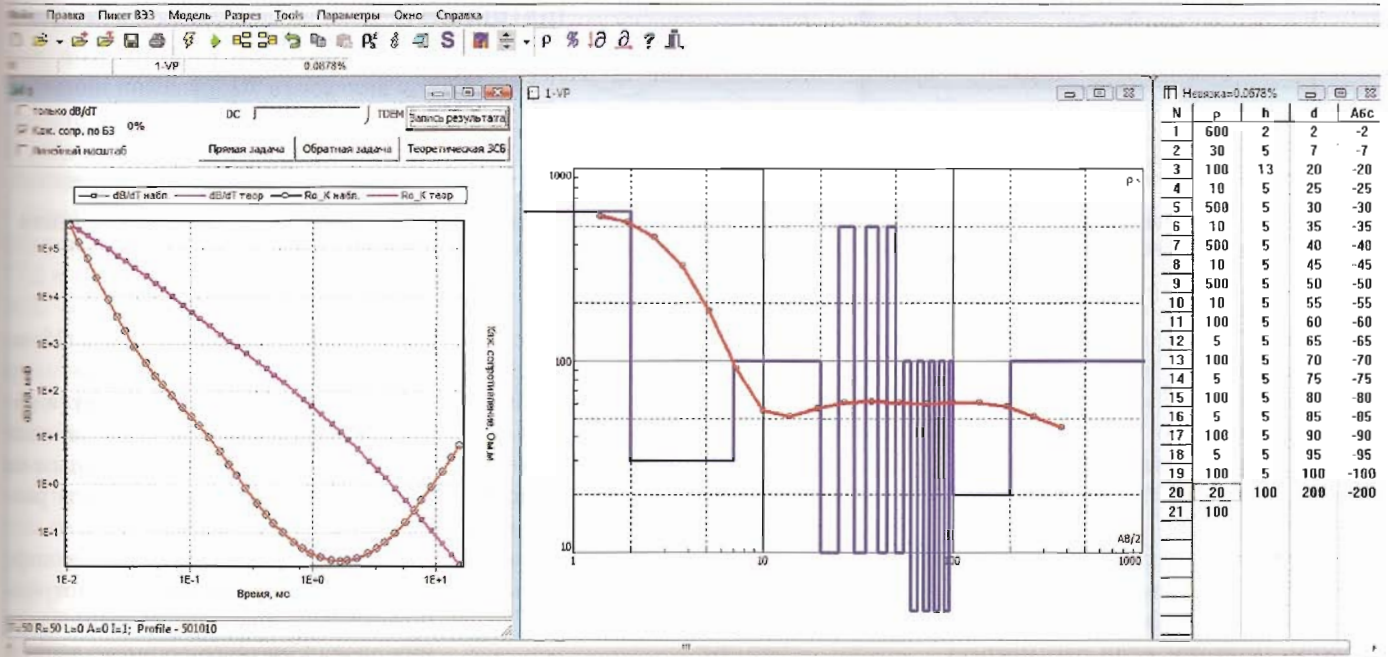


Рис. 7. Результаты решения прямой задачи ВЭЗ и ЗСБ в программе IPI2win для модели, представленной в виде ломаной линии и набора значений в таблице

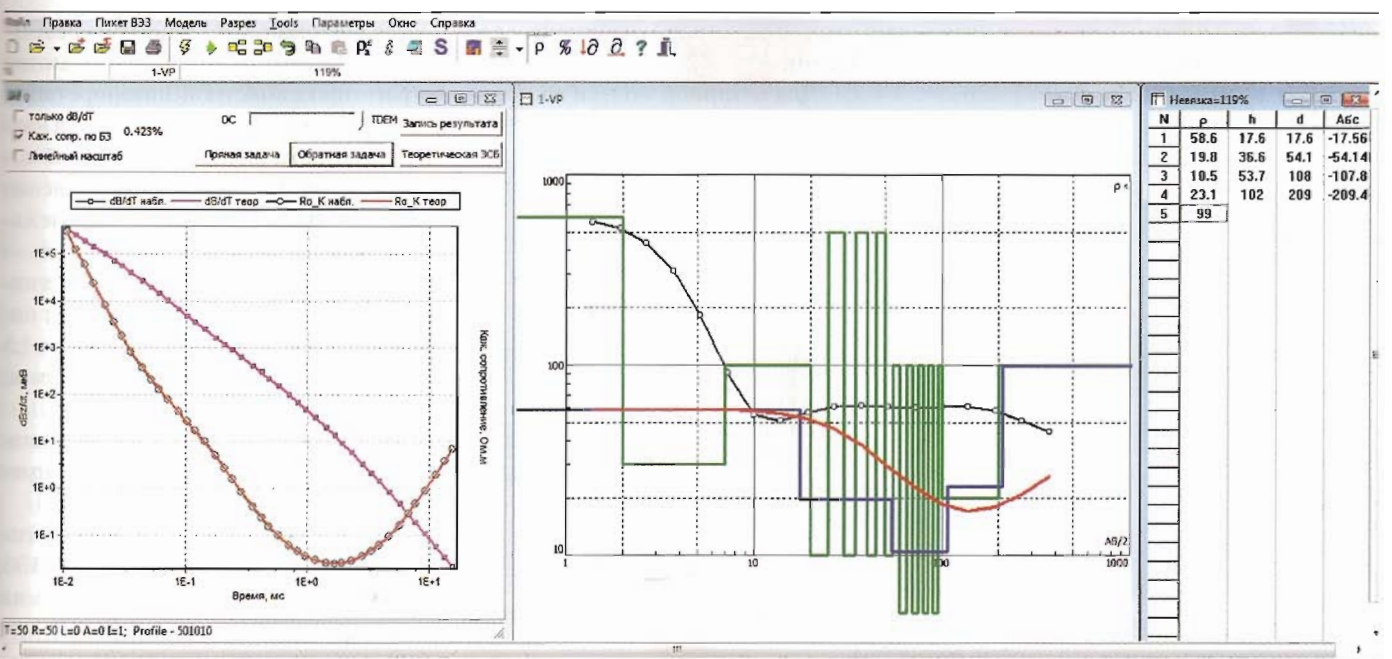


Рис. 8. Результат инверсии данных только ЗСБ — модель, представленная в виде ломаной линии синего цвета и набора значений в таблице (линия зеленого цвета соответствует «истинной» модели)

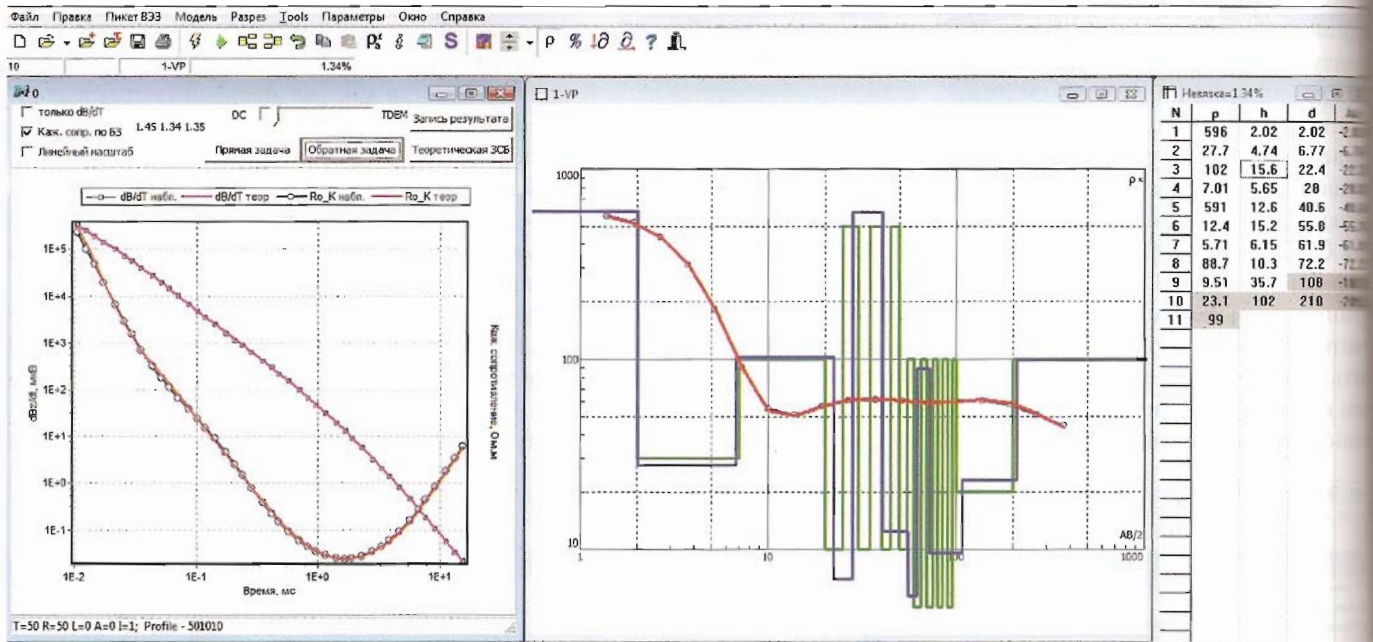


Рис. 9. Результат совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ — модель, представленная в виде ломаной линии синего цвета и набора значений в таблице (линия зеленого цвета соответствует «истинной» модели)

верхней части разреза, так и макроанизотропной толщи. Причем на этом этапе при выполнении инверсии бóльший вес уже «отдается» методу ВЭЗ. Невязки подбора кривых получились равными 0,09% и 0,23% для ВЭЗ и ЗСБ соответственно.

Полученные три слоя, которые описывают макроанизотропную толщу, являются ее эквивалентным представлением. Поэтому, если рассмотреть разрез по профилю, вдоль которого эта 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 обра-

зом, необходимо объединить эти слои в один. При этом суммарный слой предлагается описывать тремя величинами, в которых будут отражаться все изменения макроанизотропной толщи в разрезе, — мощностью  $h^z$ , продольным сопротивлением  $\rho_l^z$  и коэффициентом макроанизотропии  $\lambda$ . Получить эти величины несложно, используя формулы (1–4):

$$h^z = \sum h_i; \rho_l^z = \frac{h^z}{\sum (h_i/\rho_i)}; \lambda = \sqrt{\rho_n^z/\rho_l^z}$$

Для рассматриваемой модели значения этих параметров получились следующими:  $h^z = 42$  м;  $\rho_l^z = 43$  Ом·м;  $\lambda = 2,1$ . Для истинной модели соответ-

ствующие величины равны: 45 м, 32 Ом·м; 2,3.

На рисунке 6 сопоставляются результаты совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ и полученные каждым из этих методов в отдельности для рассматриваемой модели.

Рассмотрим другую модель, содержащую подряд две макроанизотропные толщи в виде переслаиваний тонких слоев с разным сопротивлением (рис. 7). Параметры установок и измерений по методам ВЭЗ и ЗСБ сохранились такими же, как в предыдущей модели.

На рисунках 8, 9 приведены результаты каждого этапа выработанной стратегии совместной интерпретации данных. Невязки подбора кривых ввиду сложности модели возросли и составили для ВЭЗ и ЗСБ соответственно 1,34% и 1,45%. Параметры вышележащей макроанизотропной толщи —  $h^z = 33$  м,  $\rho_l^z = 16$  Ом·м,  $\lambda = 3,8$  (в истинной модели — 35 м, 17 Ом·м, 3,6); нижележащей — 52 м, 11 Ом·м, 1,5 (в истинной модели — 45 м, 11 Ом·м, 2,3) соответственно.

На рисунке 10 приведены результаты совместного и раздельного применения методов.

Рассматриваемая стратегия совместной интерпретации данных ВЭЗ и ЗСБ была опробована примерно на десяти различных моделях, в том числе не содержащих макроанизотропных толщ. Так же как и на двух моделях, рассмотренных выше, комплексирование методов ВЭЗ и ЗСБ везде про-

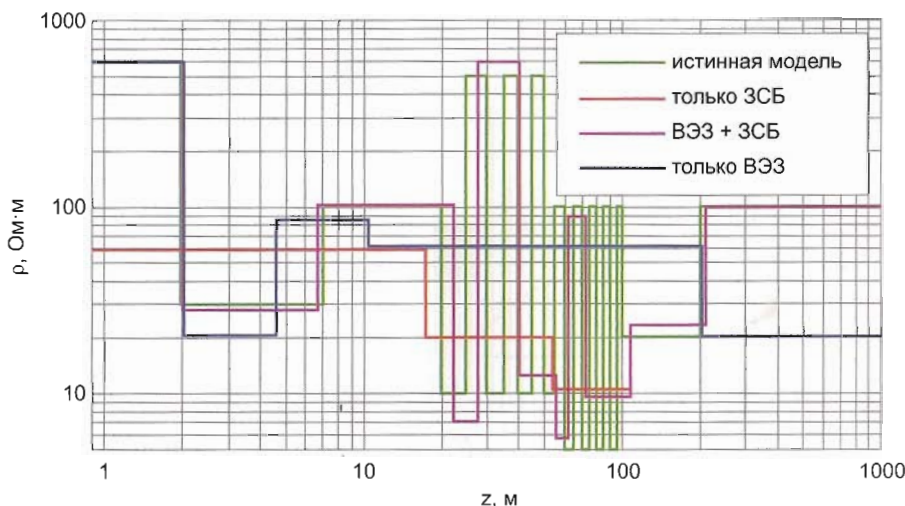


Рис. 10. Сравнение результатов совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ и полученных каждым из этих методов в отдельности

демонстрировало свою эффективность: верхнюю часть разреза удавалось восстановить благодаря методу ВЭЗ, нижнюю — благодаря ЗСБ, а в центральной части, где глубины исследования для этих двух методов пересекаются, можно было оценить макроанизотропию слоев довольно близко к истинной.

### Полевой пример комплексной интерпретации данных ВЭЗ и ЗСБ

Представленная методика совместной интерпретации результатов ВЭЗ и ЗСБ была опробована на полевых данных, полученных в 2008 году при выполнении инженерных изысканий под строительство АЭС в Томской области. В районе этих работ были проведены площадные измерения методами ВЭЗ с помощью симметричной установки Шлюмберже (разносы  $AB/2 = 1,39 \div 77,2$  м с геометрическим шагом 1,39) и ЗСБ (с использованием установки «петля в петле» размером  $50 \times 50$  м<sup>2</sup> и временами измерения  $12,6 \div 828$  мкс с геометрическим шагом 1,19) по сети  $400 \times 200$  м<sup>2</sup>. Параметры установок и измерений были выбраны таким образом, чтобы методом ВЭЗ была изучена только верхняя часть разреза, а не весь диапазон глубин, исследуемый при ЗСБ. При работе по методу ВЭЗ в качестве генератора и измерителя использовались соответственно приборы «Астра-100» и «МЭРИ-24» (ООО «Северо-Запад»); ЗСБ выполнялось с помощью аппаратуры TEM-Fast 48 (AEMR Ltd.) [6].

На рисунке 11 представлены полученные данные по одному из профилей — кривые ВЭЗ и ЗСБ для нескольких пикетов и псевдоразрезы, построенные по результатам каждого из этих методов.

Рисунок 12 демонстрирует пример подбора кривых для обоих методов, причем геоэлектрический разрез (второе цветное изображение сверху) содержит на каждом пикете большое количество слоев, которые по методике, описанной на модельных примерах, должны быть объединены в макроанизотропные толщи.

На рисунке 13 показан окончательный результат совместной интерпретации двух методов, причем отсутствие в некоторых местах разреза информации о коэффициенте макроанизотропии означает, что слой на соответствующем пикете удалось интерпретировать как изотропный. Исключение составляют толщи, не изученные мето-

дом ВЭЗ (для них невозможно определить коэффициент макроанизотропии, а мощность и сопротивление получены с помощью только метода ЗСБ). На разрезе пунктирная линия проходит по последним слоям, изученным обоими методами, показывая тем самым услов-

ный уровень глубинности метода ВЭЗ. Невязки подбора кривых ВЭЗ и ЗСБ по профилю в большинстве точек не превышают 2%.

Вдоль профиля было пробурено несколько скважин, что позволило «наполнить» геоэлектрический разрез

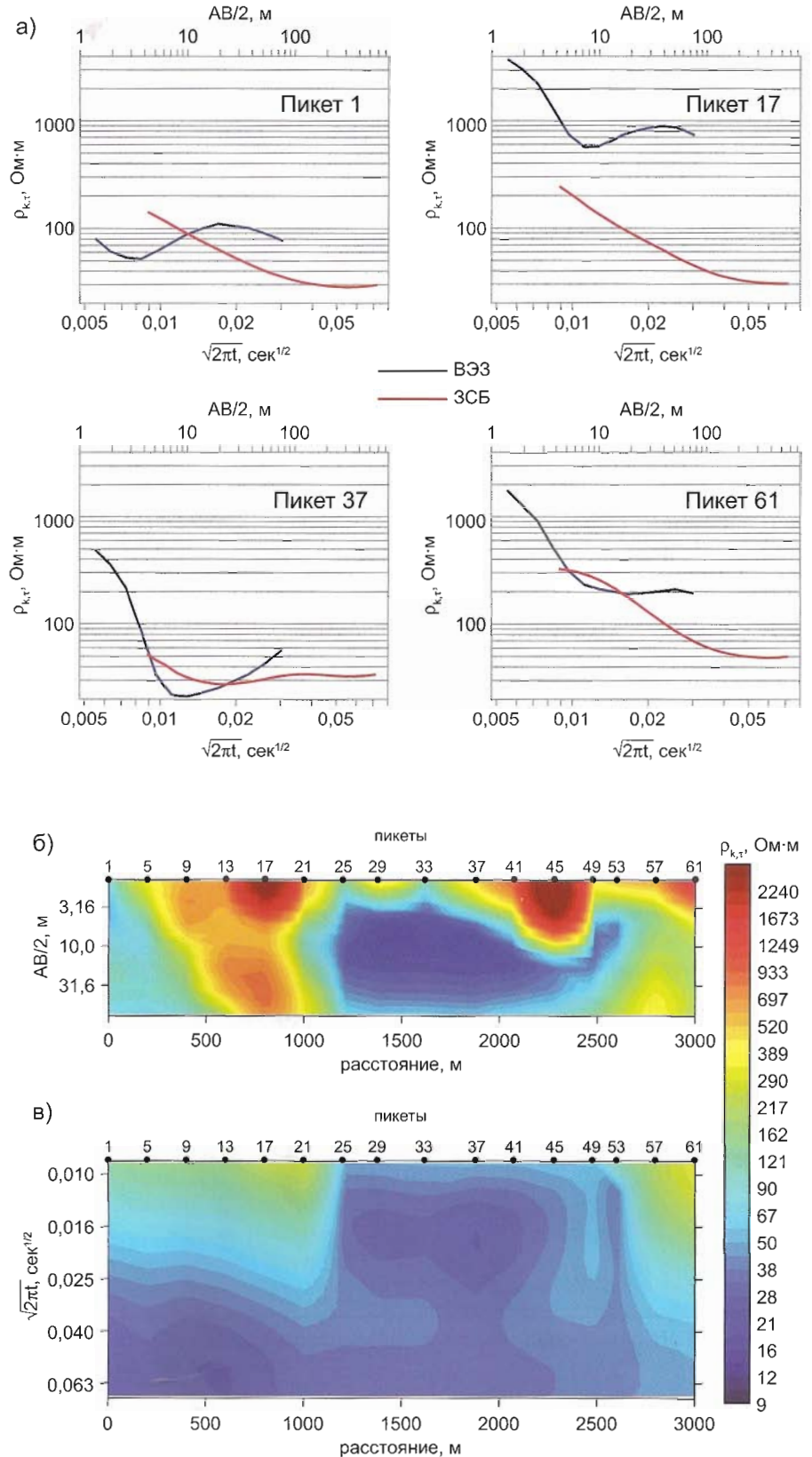


Рис. 11. Типичные кривые ВЭЗ и ЗСБ (а) и разрез кажущегося сопротивления, полученные методами ВЭЗ (б) и ЗСБ (в)

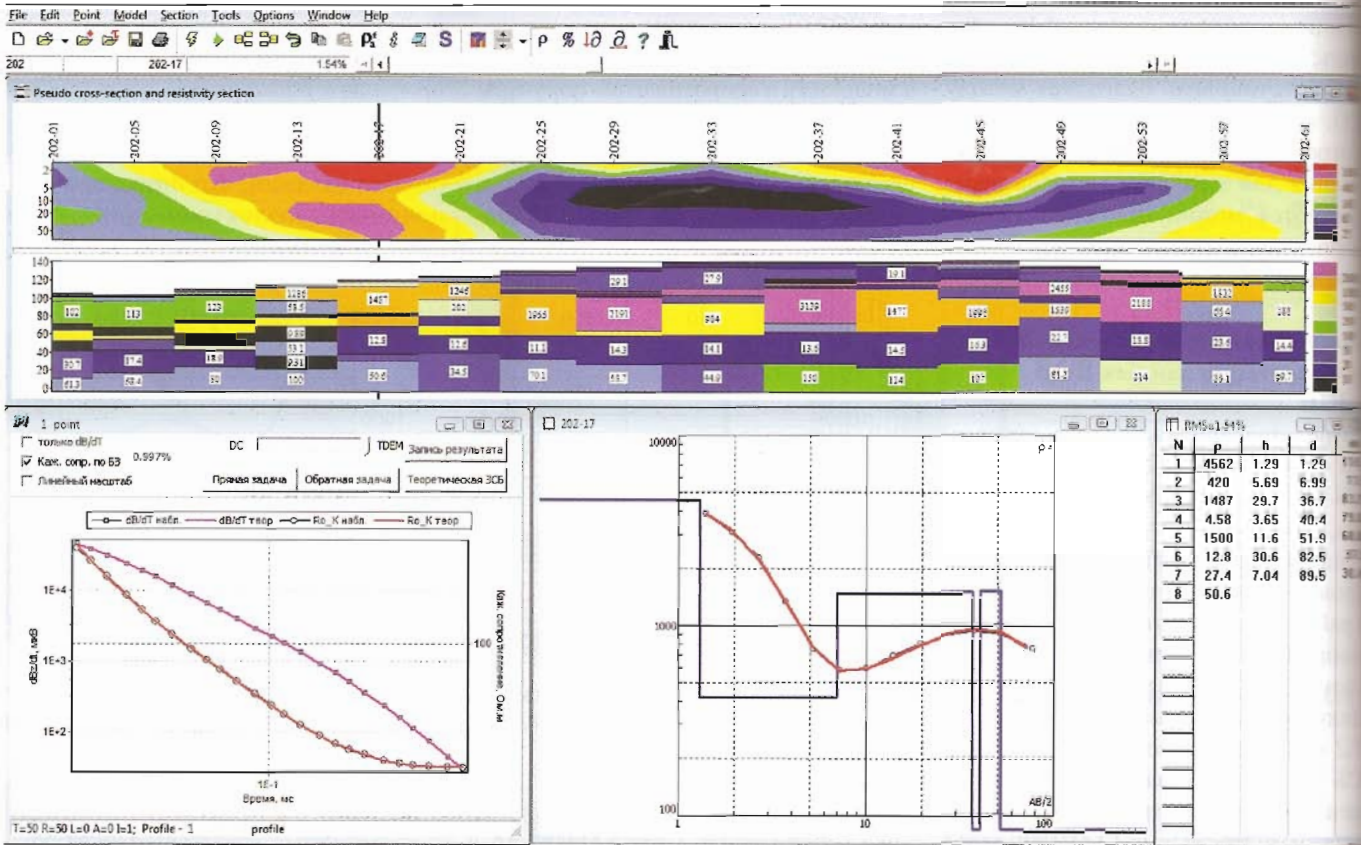


Рис. 12. Пример подбора кривых ВЭЗ и ЗСБ на пикете 17 в программе IPI2win. Первый сверху — псевдоразрез по методу ВЭЗ, второй сверху — геоэлектрический разрез по обоим методам до объединения слоев в макроанизотропные толщи

геологической информацией (рис. 14). Верхний проводящий слой представлен «линзой» глин и суглинков. Он является практически однородным (лишь на юго-востоке проявляется его незначительная макроанизотропия, однако ее коэффициент не пре-

вышает значения 1,2). Под ним залегают мощная толща, представленная в основном песком и суглинком, неравномерно увлажненная, с множеством органических остатков. Ее коэффициент макроанизотропии меняется вдоль профиля и в среднем состав-

ляет 3,5. Причем к северо-западу толща сменяется сначала на преимущественно песчаную, затем на суглинистую (что подтверждено не только данными по скважине 10/2, но и коэффициентом макроанизотропии, который в этой части разреза становится

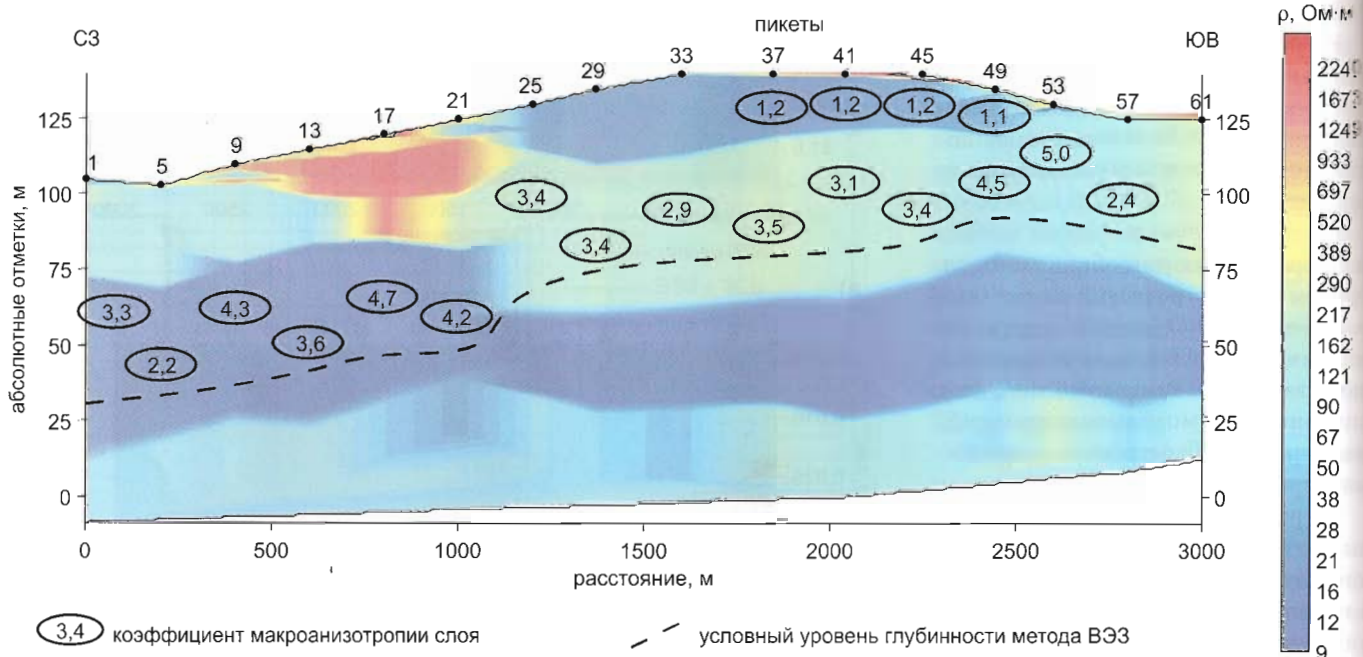


Рис. 13. Геоэлектрический разрез по профилю (Томская обл.). На разрезе числами в овалах обозначены значения коэффициента макроанизотропии в соответствующих точках. Цветом отображаются величины сопротивления вдоль напластования (продольного сопротивления)



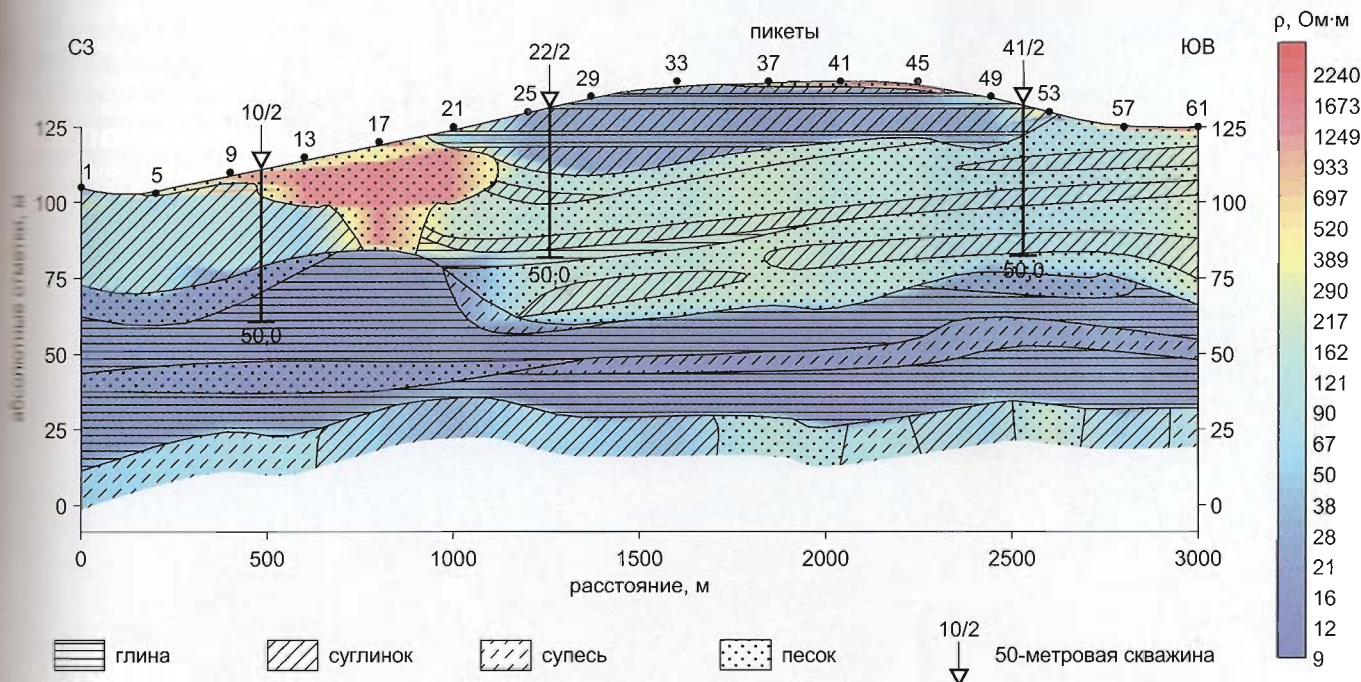


Рис. 14. Геологический разрез по профилю, представленному на рис. 13

равным 1,0). Ниже по разрезу располагается слой глин с включениями песков и супесей и прослоями лигнита и других растительных остатков, что известно по данным другой, более глубокой, скважины в районе работ. Для большей части профиля глубина исследования методом ВЭЗ не достигала этого уровня (отмеченного пунктирной линией на рис. 13), что не позволило изучить макроанизотропию этого слоя полностью. Его коэффициент макроанизотропии в исследованной обоими методами части в среднем составляет 3,7. Поскольку профильные скважины не доходили до этих глубин, то неоднородность данного слоя однозначно показать нельзя, поэтому на рисунке представлен лишь один из возможных вариантов. В основании разреза залегают песчано-глинистая пачка.

### Заключение

В данной работе был поднят вопрос о комплексном применении геофизических методов ВЭЗ и ЗСБ. Как следует из теории, каждый из этих двух методов дает об изучаемой среде свою информацию. Поэтому необходимо уметь обобщить эти результаты, получая тем самым более полные сведения 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.

Для решения такого рода задач имеется новая версия программы IPI2win для одномерных макроанизотропных моделей геологической среды, разработанная А.А. Бобачевым, которая позволяет работать одновременно с данными обоих методов как в интерактивном, так и в автоматическом режиме. Первые попытки использования данной версии оказались успешными, что является предпосылкой для продолжения

начатых исследований в этой области, которое авторы настоящей статьи видят, во-первых, в программной реализации общего функционала невязки, в котором предусмотрена возможность задавать три параметра слоя (мощность, сопротивление и коэффициент макроанизотропии), а во-вторых, в переходе к 2D интерпретации данных и использованию электротомографии вместо метода ВЭЗ. ☞

### Список литературы

1. Барсуков П.О., Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О. Применение метода переходных процессов (технология TEM-Fast) для решения задач малоглубинной геоэлектрики и исследований окружающей среды // Электромагнитные исследования земных недр / под ред. В.В. Спичака. М.: Научный мир, 2005. 245 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
3. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н. и др. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. № 12. С. 79–90.
4. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 43–47.
5. Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл». Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981. 98 с.
6. Электроразведка: Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. проф. В.К. Хмелевского, доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 59–62.
7. Barsukov P.O., Fainberg E.B., Khabensky E.O. Joint inversion of TEM and DC soundings. Near surface 2004 / Abstracts of the 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, the Netherlands, September 6–9, 2004. Utrecht, The Netherlands: EAGE, 2004. P. 1–4.
8. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology // Journal of Applied Geophysics. 1993. V. 29. P. 211–226.
9. Israil M., Sudha, Tezkan B. et al. Joint inversion of TEM and DC resistivity data for mapping the groundwater contamination around Roorkee area, India / Abstracts of the 20th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Giza, Egypt, September 18–24, 2010. Giza, Egypt: IAGA, 2010. P. 1–4.