

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ ИСКАЖЕННЫХ КРИВЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (численный эксперимент)

В.В. Плоткин

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Представлены результаты совместной инверсии кривых МТЗ, взятых из нескольких пунктов без какого-либо их предварительного отбора и нормализации, и искаженных присутствием латеральных неоднородностей электропроводности в среде. В расчетах используются синтетические данные МТЗ для трехмерной среды. Подготовка и интерпретация данных проводится с применением численной модели поля и искажений кривых МТЗ по методу Треффца. Для решения обратной задачи и оптимизации модели среды выбран нелинейный метод наименьших квадратов и итерационный процесс с вычислениями матрицы чувствительности и ее сингулярного разложения. Целевой функционал определяется невязками модельных и синтетических «экспериментальных» кривых кажущихся сопротивлений, соответствующих элементам тензоров импеданса на боковой диагонали. Достоверность восстановленной модели среды характеризуется дисперсией отклонений ее параметров от параметров известной модели, взятой для подготовки синтетических «экспериментальных» данных. Совместный учет искаженных кривых кажущихся сопротивлений на нескольких пунктах повышает степень достоверности результатов интерпретации. Полученное решение обратной задачи является приближенным и может быть использовано в качестве стартовой модели для других более сложных алгоритмов и программ.

Магнитотеллурическое зондирование, искажения и интерпретация кривых МТЗ, электропроводность, геоэлектрический разрез, метод Треффца.

RESULTS OF INVERSION OF DISTORTED MAGNETOTELLURIC SOUNDING CURVES (numerical experiment)

V.V. Plotkin

The paper presents the results of a joint inversion of magnetotelluric sounding (MTS) curves taken at several stations without preliminary selection and normalization and distorted by the presence of lateral electrical-conductivity inhomogeneities in the medium. In the calculations, we used synthetic MTS data for a three-dimensional model. Preparation and interpretation of data are carried out by the Trefftz method using a numerical model of the field and MTS curve distortions. To solve the inverse problem and optimize the subsurface model, we used a nonlinear least-squares method and an iterative process with calculation of the sensitivity matrix and its singular decomposition. The target functional is determined by the discrepancies between the model and synthetic experimental apparent-resistivity curves corresponding to the elements of the impedance tensors on the lateral diagonal. The reliability of the reconstructed subsurface model is characterized by the dispersion of the deviations of its parameters from the parameters of the known model used for the preparation of synthetic experimental data. The joint consideration of distorted apparent-resistivity curves at several stations increases the reliability of interpretation results. The obtained solution to the inverse problem is approximate and can be used as a starting model for more complex algorithms and programs.

Magnetotelluric sounding, distortion and interpretation of MTS curves, electrical conductivity, geoelectric section, Trefftz method

ВВЕДЕНИЕ

Базовой моделью магнитотеллурического зондирования (МТЗ) является горизонтально-слоистая среда, возбуждаемая вертикально падающей плоской волной. Используя инверсию зависимостей кажущегося сопротивления и фаз импеданса от частоты зондирования (кривых МТЗ), можно оценить параметры глубинного геоэлектрического разреза.

В реальной ситуации кривые МТЗ часто являются искаженными из-за наличия латеральных неоднородностей среды. Под искажениями кривых МТЗ понимают их отличия от кривой, соответствующей горизонтально-слоистому разрезу с зависимостью электропроводности от глубины в среде под пунктом зондирования. Искажения затрудняют интерпретацию экспериментальных данных. Если не учитывать возможные искажения кривых, вполне вероятно недостоверная интерпретация данных МТЗ о глубинном строении среды.

© В.В. Плоткин, 2018

✉ e-mail: PlotkinVV@ipgg.sbras.ru

DOI: 10.15372/GiG20180310

Магнитотеллурическое зондирование обычно проводится на основе профильных измерений. При выборе профилей на местности исходят из возможности использовать для последующей обработки полученных данных двумерное и одномерное приближения, хорошо разработанные к настоящему времени. Представление о трехмерных структурах среды дает согласование результатов, полученных на нескольких профилях.

Такой подход в большинстве случаев характеризуется, на наш взгляд, как громоздкостью обработки данных (отбором подходящих кривых МТЗ — продольных или поперечных, минимальных или максимальных, искаженных, неискаженных, способами их нормализации), так и сложностью анализа полученных результатов — проверкой всевозможных условий выполнения двухмерности геоэлектрических структур. В качестве подтверждения можно указать на некоторые из последних работ [Неведрова и др., 2011; Мороз, Мороз, 2012; Белявский, 2015; Мороз и др., 2016; Белявский, Яковлев, 2016]. Отмечено, что все трудности вызваны неопределенностями в изменениях среды вкрест профиля.

Несомненно, устранению указанных недостатков способствовал бы переход к решению обратной задачи МТЗ для трехмерной среды с учетом всех зарегистрированных кривых в пунктах на земной поверхности. Однако на практике из-за больших вычислительных затрат решение обратной задачи МТЗ для трехмерной среды пока не получило широкого распространения. Чем детальнее используемая модель среды, тем большими оказываются вычислительные затраты [Персова и др., 2011]. По существу, для практики МТЗ важно найти баланс между вычислительными затратами и степенью приближения реальной среды и достоверностью результатов интерпретации.

Существенно, что вклад в добавки к импедансам в точке зондирования от удаленных как по глубине, так и по латерали трехмерно возмущенных областей среды ослабевает. Размеры зоны влияния по теории возмущений и результатам численных оценок порядка первых толщин скин-слоя [Плоткин, 2012, 2013]. Для учета искажений кривых МТЗ в пункте зондирования, вызванных прилегающим объемом неоднородной среды, нами была разработана численная модель поля [Плоткин, Губин, 2015] на основе метода Треффца [Егоров, 2011]. Она позволяет заметно сокращать вычислительные ресурсы при переходе к более грубой модели исследуемой среды. Изменяя детальность отображения среды, можно на практике попытаться найти компромисс между качеством интерпретации экспериментальных данных и вычислительными затратами. В данной работе представлены результаты применения модели поля [Плоткин, Губин, 2015] для решения обратной задачи МТЗ. В качестве входных данных предполагается использование кривых МТЗ, взятых из нескольких пунктов без какого-либо отбора и манипуляций с ними.

Для надежности интерпретации результатов МТЗ желательно выбирать расположение пунктов адекватно строению среды. Расстояние между пунктами должно обеспечивать достоверную регистрацию возникающих из-за латеральных неоднородностей среды пространственных гармоник поля (с учетом известных эффектов наложения в соответствии с теоремой Котельникова). По аналогии с временными отсчетами, предпочтительнее располагать пункты (если позволяют условия местности) на равномерной сетке, размеры которой определяют наименьшие масштабы, с которыми определяются детали строения среды по результатам зондирования. На практике более реален иной, близкий к этому вариант с пропусками, рассматриваемый ниже.

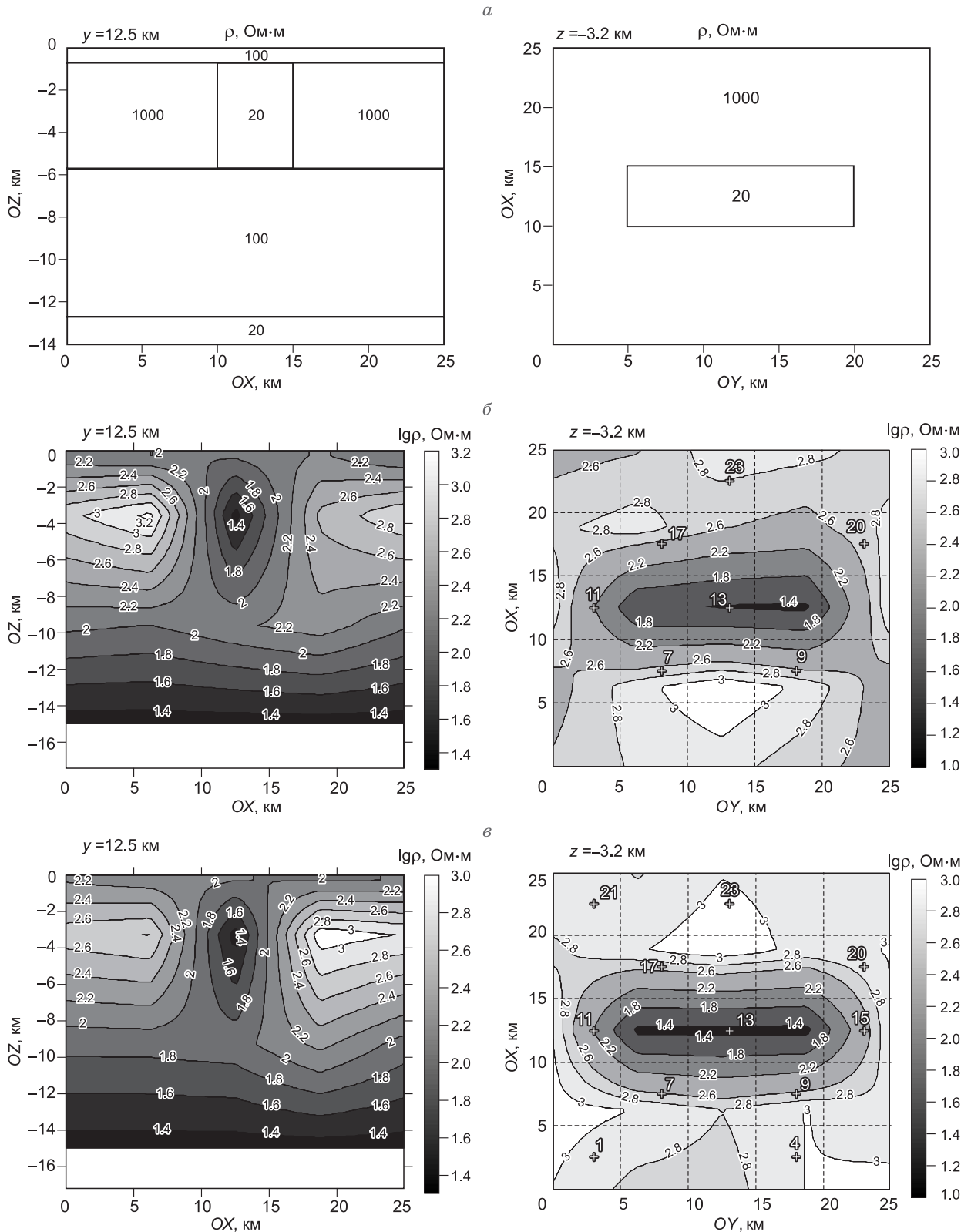
ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯ И МЕТОД ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Использовались синтетические данные МТЗ для трехмерной среды. Подготовка и интерпретация данных проводилась с помощью численной модели влияния приповерхностных и глубинных неоднородностей над одномерным слоистым геоэлектрическим разрезом [Плоткин, Губин, 2015]. Каждый из нескольких латерально неоднородных слоев в ней представляется совокупностью параллелепипедов с однородной электропроводностью. Граничные условия учитывают возбуждение ТМ-моды и пространственных гармоник полей внутри латерально неоднородных слоев. Нижние граничные условия на границе с горизонтально-слоистой средой учитывают затухание возникших пространственных гармоник полей в глубь нее. Верхние граничные условия на земной поверхности учитывают затухание указанных пространственных гармоник поля в глубь атмосферы и поле вертикально падающей на среду первичной волны. На боковых гранях вычислительного объема, содержащего латеральные неоднородности, используются периодические граничные условия. Размеры полигона выбирают настолько большими, чтобы влияние боковых границ слабо сказывалось на результатах расчетов [Плоткин, Губин, 2015].

Решение обратной задачи находилось по данным нескольких пунктов МТЗ с помощью минимизации следующего целевого функционала:

$$\Phi = \frac{1}{2KJ} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left(\left| \frac{\rho_{xy}^t - \rho_{xy}^{\text{Э}}}{\rho_{xy}^{\text{Э}}} \right|^2 + \left| \frac{\rho_{yx}^t - \rho_{yx}^{\text{Э}}}{\rho_{yx}^{\text{Э}}} \right|^2 \right)_{k,j} + \lambda \sum_i m_i^2,$$

где $\rho_{xy}^t, \rho_{xy}^{\mathcal{E}}, \rho_{yx}^t, \rho_{yx}^{\mathcal{E}}$ — кажущиеся сопротивления (нижние индексы xy и yx обозначают различные поляризации поля, верхние индексы t и \mathcal{E} относятся к расчетным для текущей модели и «экспериментальным» значениям величин соответственно) в разных пунктах (суммирование по k) и на разных периодах (суммирование по j). Здесь учтены только кривые кажущихся сопротивлений, вычисляемые по элементам тензора импеданса на боковой диагонали. Ввод членов, связанных с кривыми, определяемы



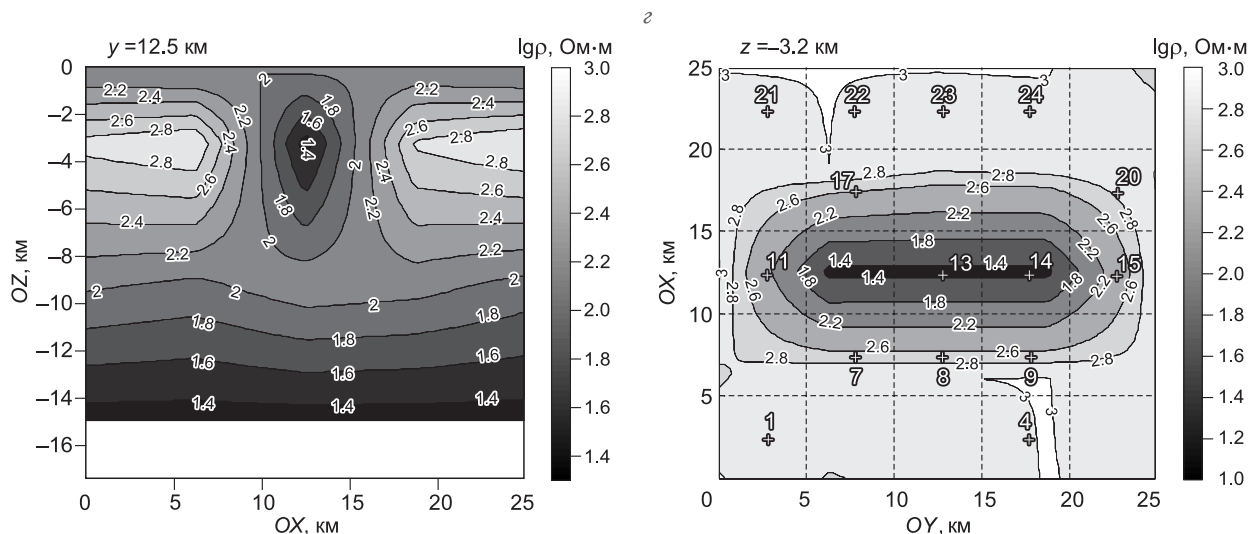


Рис. 1. Модель среды (а) и результаты инверсии после 20 итераций по данным 7 (б), 11 (в) и 15 (г) пунктов МТЗ при достигнутых значениях функционала — $9.7 \cdot 10^{-5}$, $9.2 \cdot 10^{-6}$ и $7.2 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

Слева — глубинные разрезы, справа — карты УЭС с горизонтальным сечением проводящего канала во втором слое (крестиками с номерами отмечено положение учтенных пунктов МТЗ).

ми по дополнительным импедансам, а также с фазовыми кривыми, в приведенных ниже примерах никаких преимуществ не выявил.

Для оптимизации модели среды нами использовался нелинейный метод наименьших квадратов и итерационный процесс с вычислениями матрицы чувствительности и ее сингулярного *SVD*-разложения [Senkaya, Karsh, 2016]. Для устойчивости и регуляризации процесса в целевой функционал добавлен член $\lambda \sum_i m_i^2$, где m_i — искомые параметры модели среды, λ — параметр, от величины которого зависит устойчивость процесса. Он подбирается по минимальности невязки для следующей итерации. Найденный минимум целевого функционала невязок кривых кажущихся сопротивлений в нескольких пунктах определяет оптимальную модель среды и ее параметры m_i (электропроводности в латерально неоднородных слоях и мощности этих слоев, подробнее см. ниже).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время вызывает интерес строение активных глубинных флюидонасыщенных разломов. Они образуют в высокоомной литосфере проводящие каналы, доступные для исследования методом МТЗ. Эти каналы могут иметь сложное строение и не описываться двумерными структурами [Плоткин и др., 2017]. Поэтому для анализа возможностей предлагаемого подхода была выбрана модель среды с различными проводящими каналами.

Рассмотрим результаты расчетов на модели среды, представленной тремя слоями с УЭС 100, 1000 и 100 Ом·м (сверху вниз) и мощностями соответственно 0.7, 5 и 7 км и подстилающей средой 20 Ом·м. Весь второй слой пронизывает вертикально проводящий канал с УЭС 20 Ом·м и горизонтальным сечением с размерами 5×15 км, вытянутым вдоль оси *OY* (рис. 1). Предполагалось, что МТЗ проводится на полигоне с размерами 25×25 км, в центре которого и находился проводящий канал. При расчете входных синтетических данных с помощью нашей численной модели каждый из трех слоев представлялся 25 параллелепипедами, по высоте равными мощности слоя, и горизонтальными сечениями с размерами 5×5 км. Пункты МТЗ находились на поверхности среды над центрами горизонтальных сечений некоторых из параллелепипедов.

При решении обратной задачи оптимизировались электропроводности во всех 75 параллелепипедах, мощности трех слоев и электропроводность подстилающей среды (всего $I = 75 + 3 + 1 = 79$ переменных параметров, пронумерованных в указанной последовательности). Чтобы все эти величины оставались положительными, они задавались в экспоненциальном виде $m_i = \exp(\xi_i)$, $i = 1, \dots, I$. Оптимизация модели среды проводилась по рассчитанным для разных наборов пунктов МТЗ входным синтетическим данным.

В качестве стартовой использовалась модель однородной среды с УЭС 400 Ом·м. Стартовые мощности слоев задавались равными 1 км (при расчетах в программах все величины задаются в единицах СИ). Исходная модель трехмерной среды, а также результаты инверсии данных для различных наборов пунктов МТЗ после 20 итераций отражены на рис. 1. Слева приведены глубинные разрезы УЭС и справа — горизонтальные сечения УЭС проводящего канала во втором слое, полученные интерполяцией найденных параметров m_i модели среды. Расположение пунктов на поверхности относительно границ канала показано крестиками с номерами пунктов. Отметим, что мощности слоев и УЭС проводящего канала восстанавливались уже после нескольких первых итераций. Для случая, показанного на рис. 1, б, полученные мощности слоев (сверху вниз) — 0.7, 5.6 и 6.5 км, УЭС в центре канала 20.7 Ом·м, а для рис. 1, в, г — 0.7, 5.1 и 6.9 км и УЭС 20.1 Ом·м.

Поскольку в нашем случае искомый результат известен (параметры ξ_0 среды, взятой для подготовки синтетических «экспериментальных» данных), для характеристики итерационного процесса можно использовать дисперсию отклонений ($k_m = \|\xi - \xi_0\|^2 / I$) параметров текущих моделей среды, а также оптимальной, соответствующей минимуму целевого функционала, от точных значений этих параметров. Чем меньше k_m , тем больше степень достоверности взятой модели среды.

На рис. 2 для сведения представлены графики изменений в ходе оптимизации модели среды целевого функционала $\Phi(a)$, дисперсий k_m (б) и параметры ξ (в), полученные после 20 итераций по данным 7, 11, 15 и 25 пунктов МТЗ (для 25 пунктов $\xi = \xi_0$ уже после 13 итераций). Кривые с индексом 11₂ получены по данным для 11 пунктов, но с другой стартовой 1D-моделью, взятой в виде исходной слоистой среды без проводящего канала. Можно видеть, что для выбранной модели среды количество итераций, необходимое для ее восстановления по данным МТЗ, зависит от количества пунктов наблюдений. Чем больше этих пунктов и, соответственно, данных, тем за меньшее количество итераций и при более высоких значениях минимума целевого функционала результат ближе к исходной модели среды (при одной и той же дисперсии k_m).

Из сравнения графиков изменений функционала Φ для пунктов 11 и 11₂ (см. рис. 2, а, б) видно, что даже при наличии априори глобального нулевого минимума Φ , результат и процесс оптимизации могут зависеть от стартовой модели. Это связано с особенностями выбранного способа регуляризации процесса. При поиске минимума Φ всегда проявляется конкуренция членов, связанных с невязками данных наблюдений, и члена $\lambda \sum_i m_i^2$, введенного для устойчивости процесса. При наличии вычислительных погрешностей и помех измерений (см. далее) способ выбора λ может оказать существенное влияние на степень отклонения получаемого результата от точного решения. Введение других способов выбора λ (например, для решения по максимуму члена $\lambda \sum_i m_i^2$) или дополнительной регуляризации (ограничение коридора возможных значений искомых параметров) также сказывается на результате.

На рис. 3 приведены аналогичные (но после 30 итераций) графики величин, полученные по данным только 11 пунктов МТЗ, но при различных уровнях случайных нормально распределенных помех, добавленных к данным наблюдений. Как видно, наличие помех сказывается только в виде появления порога наименьших достижимых значений Φ и k_m , но в качественном отношении найденные решения мало отличаются друг от друга.

Действительно, как видно из графиков на рис. 2, в и 3, в, характерная особенность найденных характеристик модели ξ заключается в их изменчивости между параллелепипедами внутри слоев. Этот эффект усиливается с возрастанием помех, добавляемых к данным наблюдений, или присутствующих вычислительных погрешностей. Он не дает возможности найти точное решение, соответствующее нулевому минимуму функционала Φ . Процесс поиска заканчивается в локальных минимумах функционала, возникающих вследствие неустойчивости обратной задачи и проявляющихся во взаимной компенсации вкладов в данные наблюдений от изменчивости среды между параллелепипедами. Это видно, в частности, по поведению кривых на рис. 3, б при уровне шумов $\varepsilon \sim 3\text{—}5\%$. В конце процесса, несмотря на дальнейшее уменьшение Φ , дисперсия k_m начинает возрастать, решение становится все более изменчивым. В итоге дальнейший поиск меньших значений и глобального минимума Φ прекращается (см. рис. 3, а).

Можно предположить, что устранения взаимной компенсации вкладов в данные наблюдений от изменчивости среды между параллелепипедами можно добиться за счет уменьшения количества варьируемых параметров модели. Если рассматривать достигнутый минимум как промежуточный, дальнейший поиск более глубокого минимума Φ можно проводить за счет объединения нескольких соседних параллелепипедов в один блок с одной и той же электропроводностью. При этом общее количество искомых параметров модели сократится. В качестве стартового значения нового вводимого параметра берем среднее от значений, полученных для объединяемых параллелепипедов на предыдущем этапе.

Это предположение было проверено на более близкой к реальности ситуации. Дело в том, что горизонтальное сечение проводящего канала на практике может иметь очень сложное строение, вклю-

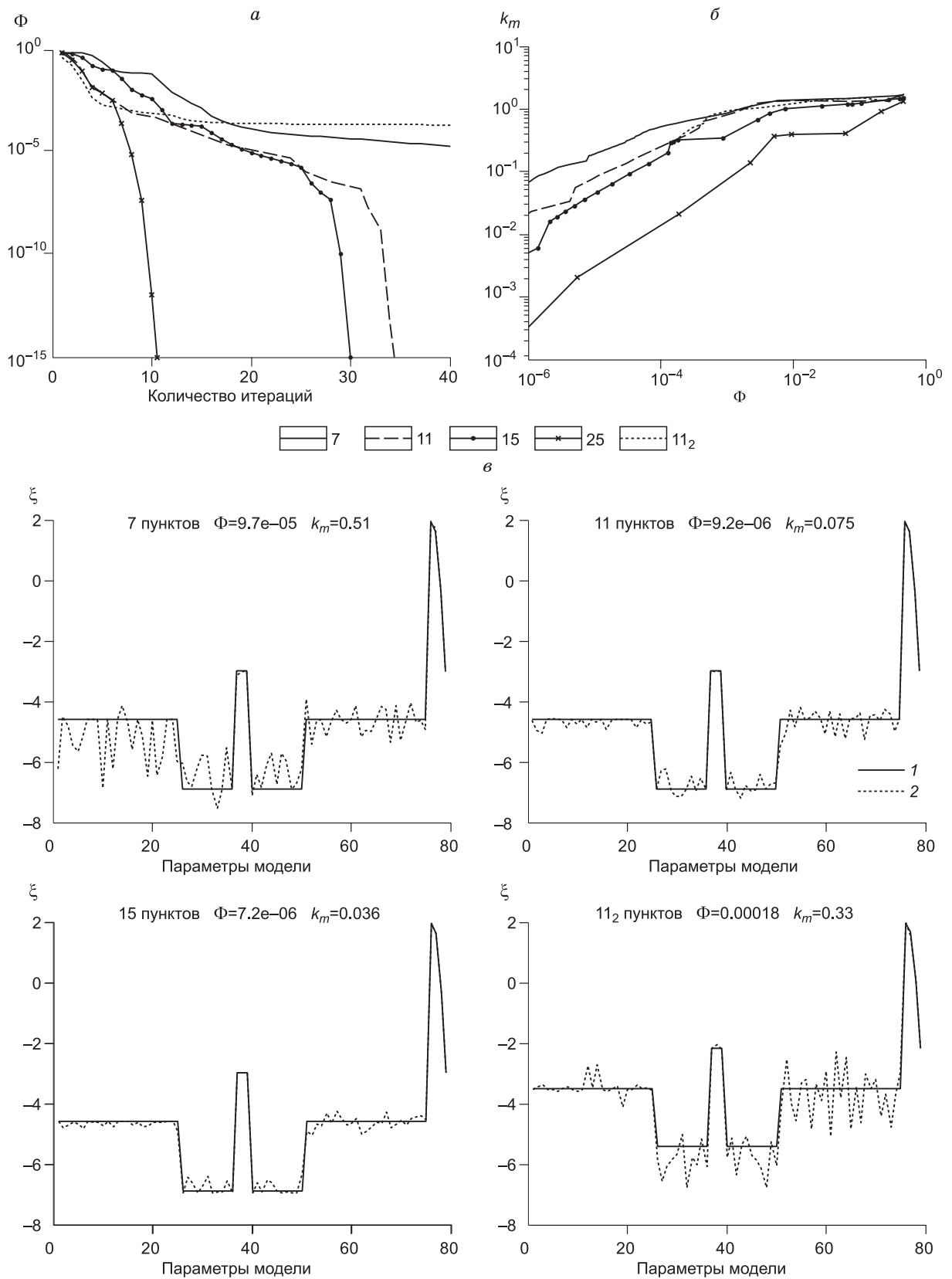


Рис. 2. Графики изменений в ходе оптимизации модели среды целевого функционала Φ (*a*), дисперсий отклонений текущего решения k_m (*b*), а также параметры модели среды ξ (*c*), полученные после 20 итераций для разных наборов пунктов МТЗ.

1 — исходная модель, 2 — подгонка.

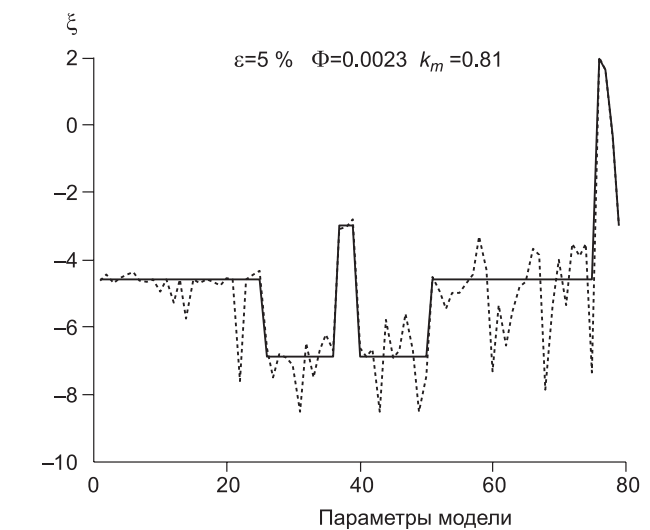
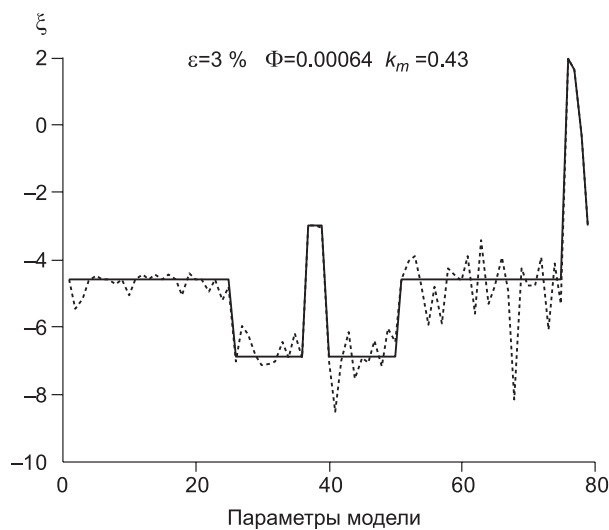
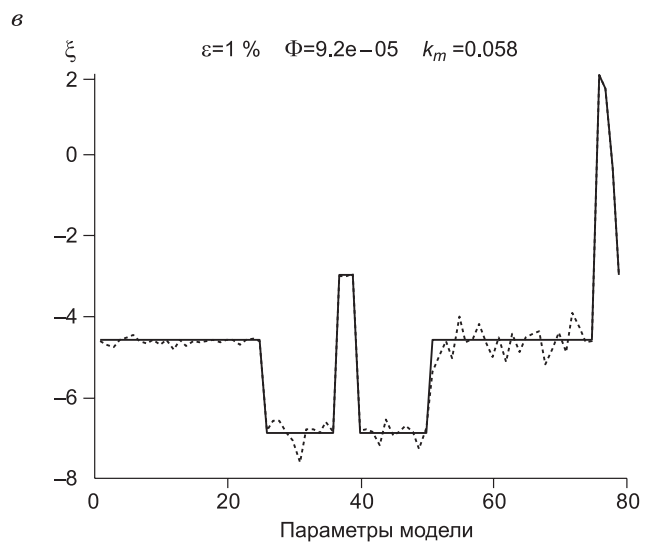
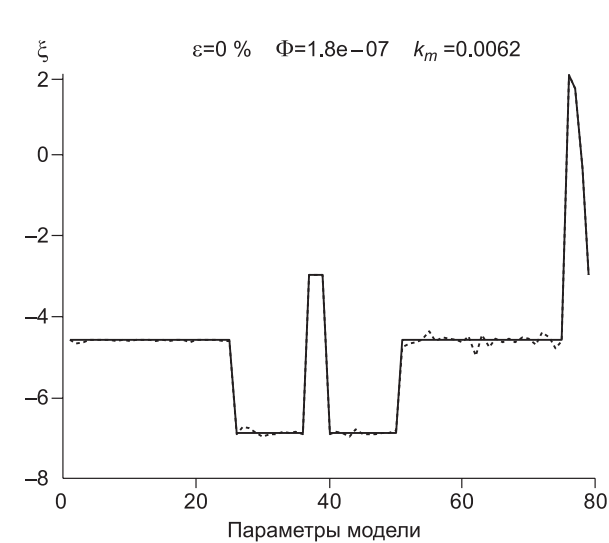
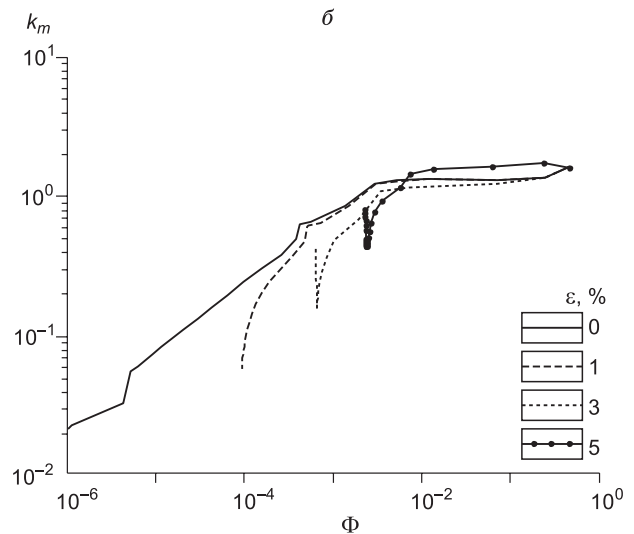
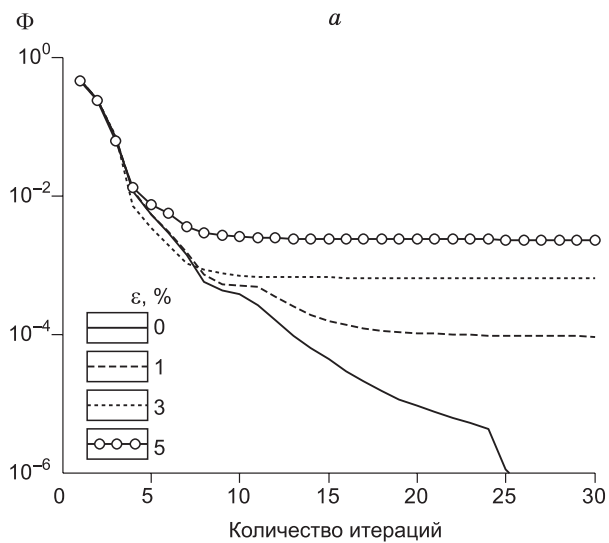


Рис. 3. Графики изменений в ходе оптимизации модели среды целевого функционала Φ (а), дисперсий отклонений текущего решения k_m (б), а также параметры модели среды ξ (в), полученные после 30 итераций по данным 11 пунктов МТЗ при различных уровнях ε добавленной к данным наблюдений нормально распределенной помехи.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

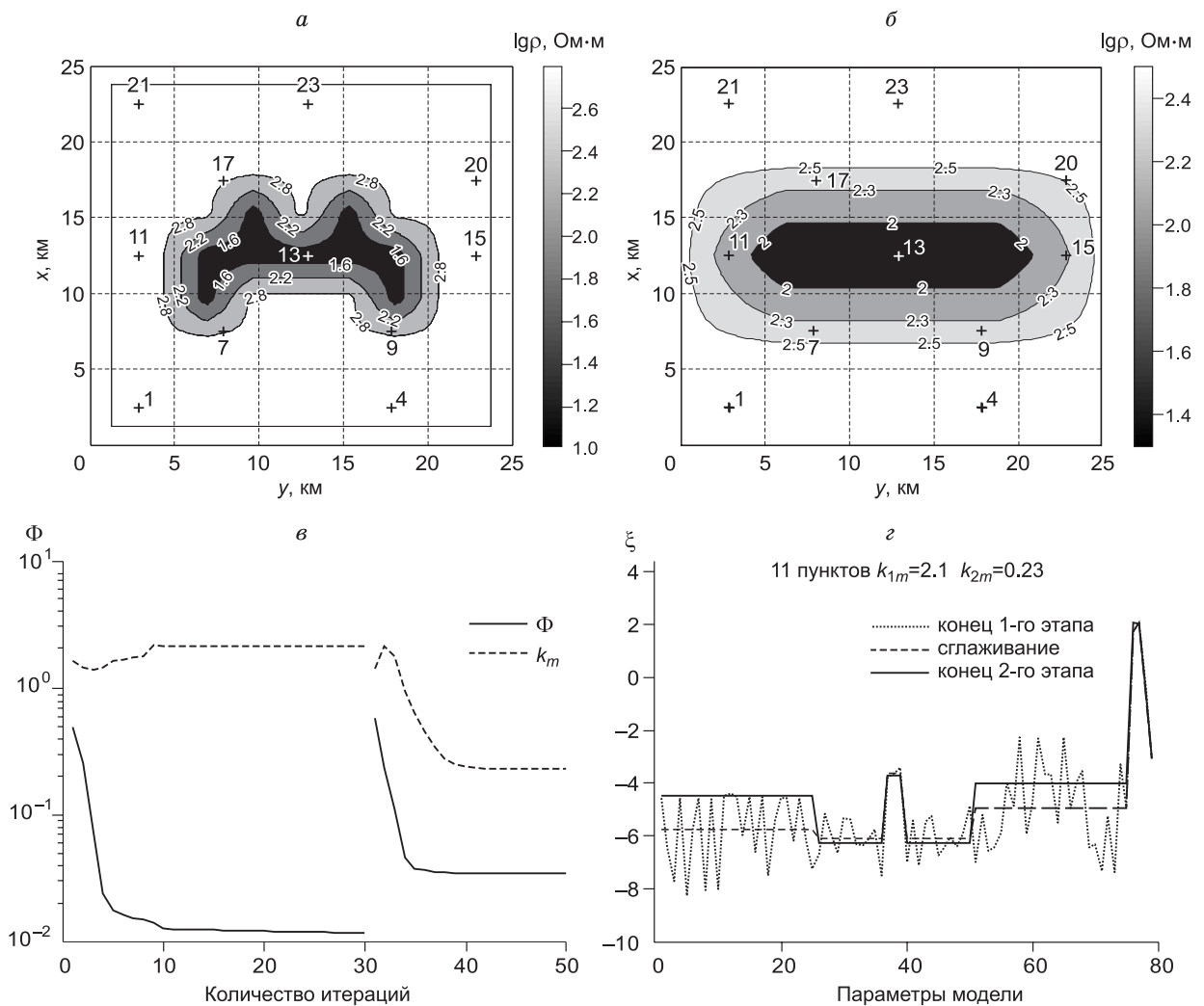


Рис. 4. Исходное сечение вертикально проводящего канала (а), результат его восстановления (б) по данным 11 пунктов МТЗ (крестики с номерами), двухэтапный процесс оптимизации (в) и восстановленные параметры модели среды ξ (г).

чающее более мелкие детали. Каков в этом случае результат восстановления модели среды на более грубой сетке параллелепипедов, исследовалось на следующем примере. Входные данные для пунктов МТЗ на рассматриваемом полигоне 25×25 км были рассчитаны с помощью численной модели с увеличенным количеством параллелепипедов в каждом слое и с меньшим их горизонтальным сечением. В частности, было взято по 9 параллелепипедов вдоль горизонтальных осей с их общим количеством 81 в каждом слое. Это позволяет изучать варианты усложненных горизонтальных сечений как вертикально, так и наклонно проводящих каналов.

На рис 4, а приведено выбранное для расчетов исходное сечение вертикально проводящего канала, а на рис. 4, б — результат восстановления этого сечения по данным 11 пунктов МТЗ. Расположение пунктов на поверхности относительно границ канала показано крестиками с номерами пунктов. Мощности слоев восстановленной и исходной моделей среды хорошо совпадают.

Весь двухэтапный процесс оптимизации отражен на рис. 4, в. После первого этапа (см. рис. 4, в, первые 30 итераций) относительные параметры ξ модели, как указывалось, характеризуются изменчивостью электропроводности между параллелепипедами внутри слоев (см. рис. 4, г, пунктир, дисперсия k_{1m} вычислена относительно точного решения ξ_0 предыдущих расчетов). Анализ изменчивости указывает на возможность объединения под одним искомым параметром электропроводностей всех блоков первого верхнего слоя, под другим — всех блоков нижнего третьего слоя. Для промежуточного слоя можно ввести два искомых параметра: для блоков внутри проводящего канала и вне его (номера блоков можно определить по пунктирной кривой, рис. 4, г). Мощности слоев и электропроводность подстила-

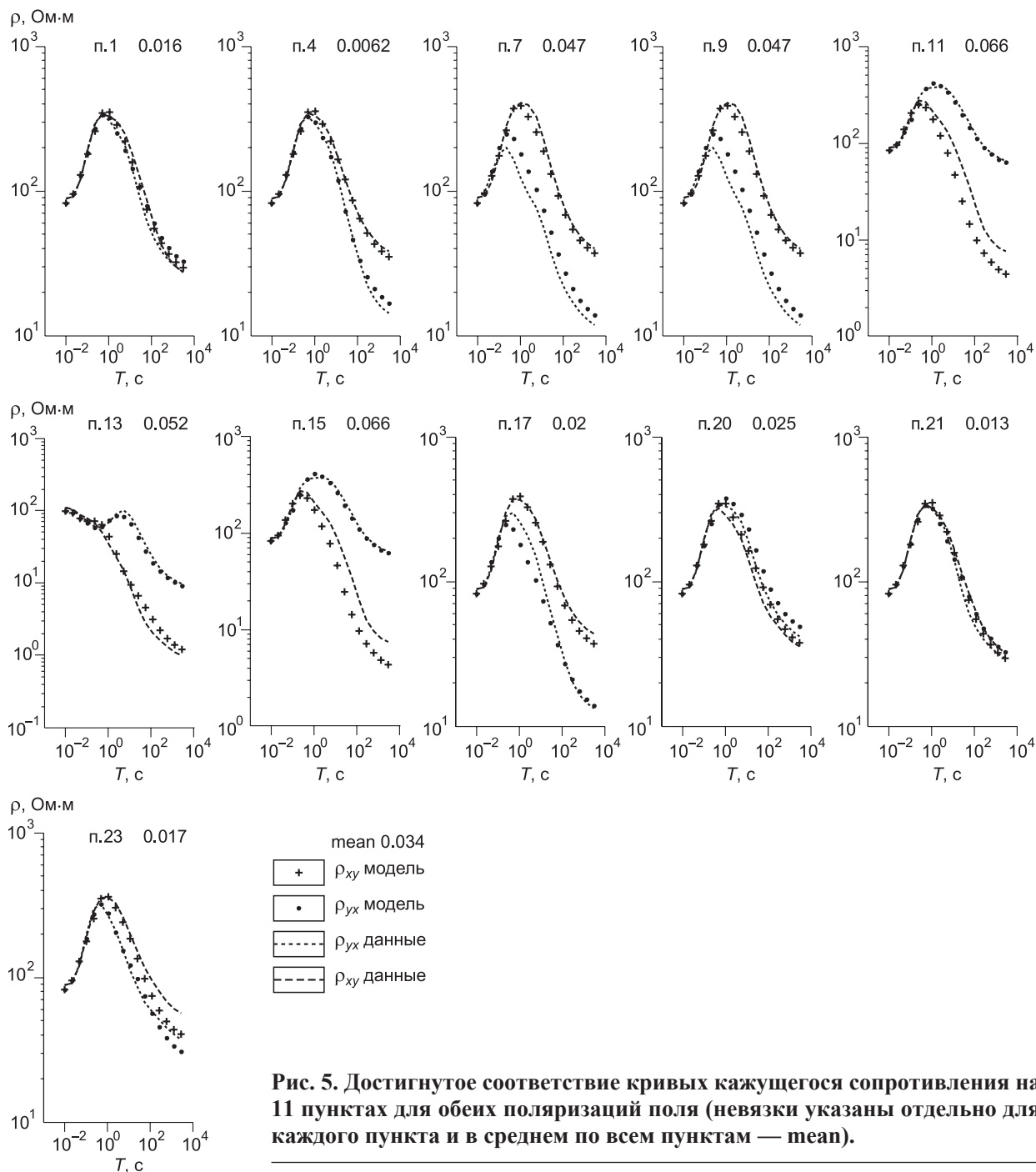


Рис. 5. Достигнутое соответствие кривых кажущегося сопротивления на 11 пунктах для обеих поляризаций поля (невязки указаны отдельно для каждого пункта и в среднем по всем пунктам — mean).

ющей среды на втором этапе оптимизации также считаются искомыми параметрами (в итоге остается 8 параметров). В случае, когда для новых параметров взяты средние значения от достигнутых на объединяемых параллелепипедах, сглаженное решение показано штриховой кривой на рис. 4, г.

В качестве стартовой модели на втором этапе бралось как сглаженное решение, так и модель однородной среды с УЭС 400 Ом-м и стартовыми мощностями слоев, равными 1 км. Второй этап оптимизации (см. рис. 4, в, итерации 31—50) приводит к модели с уменьшенной дисперсией k_{2m} . Итоговое решение (см. рис. 4, г, сплошная линия) использовано при построении восстановленного сечения вертикально проводящего канала (см. рис. 4, б).

На рис. 5 показано достигнутое соответствие входных синтетических и итоговых данных МТЗ для оптимизированных параметров среды. Приведены кривые кажущегося сопротивления на всех пунктах при обеих поляризациях поля, на каждом графике приведены невязки для данного пункта. Отметим, что изменения кривых от пункта к пункту характеризуют степень искажений, возникающих в 3D-среде.

Средняя по пунктам невязка кривых (mean) для итоговой модели среды 3.4 %. Можно считать, что восстановление исходной среды с помощью более грубой ее модели вполне удовлетворительное.

Приведем для информации сведения о времени расчетов. Так, решение прямой задачи на компьютере с частотой 2.94 ГГц для модели среды из трех слоев и $5 \times 5 \times 3 = 75$ параллелепипедами, осуществляется за ~5 с. Время, необходимое для расчета одной итерации при оптимизации модели среды используемым методом с теми же данными, ~10 мин.

Время решения прямой задачи для модели среды из трех слоев, представленной $9 \times 9 \times 3 = 243$ параллелепипедами, ~5 мин, а при увеличении их количества до $15 \times 15 \times 4 = 900$ параллелепипедов (модель среды из 4 слоев) достигает 3 ч 40 мин.

Таким образом, решение обратной задачи по методу Треффца без применения мощных вычислительных средств и параллельного программирования на практике возможно лишь с грубыми моделями среды. Однако, как следует из приведенных примеров, совместный учет искаженных кривых кажущихся сопротивлений на нескольких пунктах способствует повышению достоверности результатов интерпретации МТЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предприняты попытки совместной инверсии кривых МТЗ, взятых из нескольких пунктов без какого-либо их предварительного отбора и нормализации, и искаженных присутствием трехмерных неоднородностей электропроводности в среде. Обратная задача решалась с применением численной модели поля и искажений кривых МТЗ (по методу Треффца). Для оптимизации модели среды использовался нелинейный метод наименьших квадратов и итерационный процесс с вычислениями матрицы чувствительности и ее сингулярного разложения.

Для анализа возможностей такого подхода была выбрана модель среды с разломом в виде различных вертикально проводящих каналов. Решение обратной задачи находилось минимизацией целевого функционала, определяемого невязками модельных и синтетических «экспериментальных» кривых кажущихся сопротивлений, соответствующих элементам тензоров импеданса на боковой диагонали. Для точной характеристики оптимальности модели среды использовалась дисперсия отклонений найденных параметров среды от ее известной исходной модели, взятой для подготовки синтетических «экспериментальных» данных. Степень восстановления среды по данным МТЗ зависит от количества пунктов наблюдений. Чем больше этих пунктов и, соответственно, данных, тем за меньшее количество итераций и при более высоких значениях минимума целевого функционала результат ближе к исходной модели среды. Для надежности интерпретации результатов МТЗ предпочтительнее выбирать расположение пунктов адекватно строению среды. По аналогии с временными отсчетами лучше располагать пункты на равномерной сетке, размеры которой определяют наименьшие масштабы (если позволяют условия местности, возможен иной, близкий к этому вариант с пропусками), с которыми определяются детали строения среды по результатам зондирования.

Время, необходимое для решения обратной задачи по методу Треффца без мощных вычислительных средств и параллельного программирования, на практике допускает использование лишь грубых моделей среды. Достоинство данного подхода в том, что совместный учет искаженных кривых кажущихся сопротивлений на нескольких пунктах способствует большей достоверности результатов интерпретации. Он позволяет получить приближенное решение обратной задачи, которое в дальнейшем может быть использовано в качестве стартовой модели для других более сложных алгоритмов и программ.

ЛИТЕРАТУРА

Белявский В.В. Геоэлектрические модели Алтайской, Шапшальской и Тээлинской очаговых зон Алтае-Саянского региона // Геофизика, 2015, № 6, с. 29—37.

Белявский В.В., Яковлев А.Г. Профильная 3D-инверсия данных МТЗ–МВЗ на примере Шивелучской вулканической зоны полуострова Камчатка // Физика Земли, 2016, № 1, с. 59—78.

Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли, 2011, т. 47, № 2, с. 15—26.

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли, 2012, т. 48, № 5, с. 64—76.

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Логинов В.А., Нурмухамедов А.Г., Алексеев Д.А. Изменение электропроводности литосферы в районе очага сильнейшего Олюторского землетрясения в Корякском нагорье // Физика Земли, 2016, № 1, с. 31—46.

Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплекса электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая) // Физика Земли, 2011, т. 47, № 1, с. 63—75.

Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Компьютерное моделирование геоэлектроманнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // *Физика Земли*, 2011, т. 47, № 2, с. 3—14.

Плоткин В.В. Зона влияния неоднородности среды и поля при магнитотеллурическом зондировании // *Геология и геофизика*, 2012, т. 53 (1), с. 140—149.

Плоткин В.В. Искажения тензоров импеданса и типпера при трехмерных возмущениях среды и поля // *Геология и геофизика*, 2013, т. 54 (1), с. 124—131.

Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // *Геология и геофизика*, 2015, т. 56 (7), с. 1381—1390.

Плоткин В.В., Поспеева Е.В., Губин Д.И. Инверсия магнитотеллурических данных в разломных зонах Горного Алтая на основе трехмерной модели среды // *Геология и геофизика*, 2017, т. 58 (5), с. 801—811.

Senkaya M., Karsh H. Joint inversion of Rayleigh-wave dispersion data and vertical electric sounding data: synthetic tests on characteristic sub-surface models // *Geophys. Prosp.*, 2016, v. 64, № 1, p. 228—246.

*Рекомендована к печати 8 февраля 2017 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
16 августа 2016 г.*