

УДК 550.837

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ: ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ИНВЕРСИЯ МАГНИТОВАРИАЦИОННЫХ И МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВДОЛЬ ПРОФИЛЯ НАРЫН

© 2010 г. **М. Н. Бердичевский**<sup>1</sup>, **Н. С. Голубцова**<sup>1</sup>, **Ив. М. Варенцов**<sup>2</sup>, **П. Ю. Пушкарев**<sup>1</sup>,  
**А. К. Рыбин**<sup>3</sup>, **Е. Ю. Соколова**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

<sup>2</sup>ЦГЭМИ ИФЗ РАН, г. Троицк Московской обл.

<sup>3</sup>Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизия

Поступила в редакцию 25.01.2010 г.

В статье приводятся результаты двумерной инверсии глубинных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований вдоль Нарынского профиля. Использован метод частичных (последовательных) инверсий, когда на первом этапе для локализации глубинных аномалий электропроводности используются магнитовариационные отклики, а затем привлекаются данные магнитотеллурического зондирования, служащие для уточнения структуры вмещающей среды и деталей строения верхней части разреза. Показано, что такой подход позволяет оценить информативность отдельных составляющих электромагнитного поля, снизить искажающее влияние приповерхностных геоэлектрических неоднородностей и повысить устойчивость итогового решения обратной задачи.

### ВВЕДЕНИЕ

Первые опыты по совместной интерпретации магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) зондирований на Тянь-Шане относятся к 1988–1990 гг., когда группой ученых Электромагнитной экспедиции Института высоких температур РАН и МГУ были построены геоэлектрические разрезы по трем профилям, пересекающим складчатые сооружения Центрального Тянь-Шаня в субмеридиональном направлении. Эти построения опирались на магнитовариационные данные, свободные в низкочастотной области от искажений приповерхностными неоднородностями [Трапезников и др., 1997]. Анализировались данные ЦЭС-2, полученные более чем в ста точках зондирований. Модельные расчеты проводились с помощью программы, использующей метод конечных элементов [Wannamaker et al., 1987], а подбор параметров модели осуществлялся вручную, интуитивно. Прежде, чем добиться хорошего совпадения модельных и наблюдаемых данных, приходилось перебрать не один десяток моделей. Тогда же результаты электромагнитных зондирований были сопоставлены с данными сейсмической томографии. Сравнение показало, что пониженные сопротивления коровых блоков коррелируются с пониженными сейсмическими скоростями и повышенным поглощением сейсмических волн, что свидетельствует в пользу флюидной природы совпадающих геоэлектрических и сейсмических аномалий [Киссин, Рузайкин, 1997].

В последующее годы электромагнитные наблюдения на Тянь-Шане существенно расширились, в это же время появились новые методы автоматизированной инверсии. Для интерпретации накопленных данных сформировался научный коллектив из ученых Бишкекской научной станции РАН,

ЦГЭМИ ИФЗ РАН и МГУ, получивший название Рабочей группы NARYN. Основные цели работы коллектива – построение геоэлектрического разреза Центрального Тянь-Шаня по всему комплексу МТ/МВ данных вдоль наиболее представительного по плотности наблюдений профиля НАРЫН и совершенствование методики интерпретации материалов глубинных зондирований в сложно построенных квазидвумерных средах.

По результатам исследований Рабочей группы NARYN предполагалось написание трех статей. В первой работе этого цикла [Бердичевский и др., 2010] представлены результаты углубленного структурного анализа всей совокупности МТ и МВ откликов, полученных вдоль геотраверса НАРЫН в широком диапазоне периодов, сделаны оценки искажений этих откликов поверхностными и глубинными трехмерными (3D) неоднородностями, а также выявлены участки профиля и диапазоны периодов, наиболее благоприятные для 2D интерпретации данных.

Настоящая статья является второй в намеченном цикле. Ее цель – построение простой, но устойчивой блочной геоэлектрической модели вдоль всего профиля по результатам одних лишь длиннопериодных зондирований. На профиле, помимо наблюдений со станциями ЦЭС-2 и Phoenix, выполнено 19 глубинных пятикомпонентных МТ зондирований (14 на территории Киргизии и 5 на севере Китая) с аппаратурой LIMS в диапазоне периодов 0.1–40000 с. Расположение пунктов глубинных зондирований приведено в работе [Бердичевский и др., 2010].

Следует отметить, что методика совместной интерпретации МТ и МВ откликов получила интенсивное развитие в процессе совместной работы ученых МГУ, ИО РАН и ЦГЭМИ ИФЗ РАН в рамках международного проекта EMSLAB при построении

геоэлектрической модели Каскадной субдукционной зоны. В этих исследованиях, в частности, была продемонстрирована эффективность подходов к интерпретации квазидвумерных данных, основанных на последовательной 2D инверсии их отдельных компонент с приоритетом МВ откликов и импедансных фаз [Варенцов и др., 1996; Ваньян и др., 1997; 2002]. Эффективность сложившегося метода последовательных частичных инверсий продемонстрирована на ряде модельных и практических примеров в работе [Бердичевский и др., 2003] и далее исследована в монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Данный метод основан на тонком учете различий в чувствительности откликов ЭМ поля к глубинным и поверхностным проводникам. Процесс инверсии разбивается на три этапа. На первом этапе проводится инверсия МВ данных – компонент ( $\text{Re}$ ,  $\text{Im}$ ) типпера  $W_{\text{zx}}$ , на втором – инверсия продольных фаз импеданса  $\varphi^{\parallel}$ , на третьем – инверсия поперечных амплитудных и фазовых данных ( $\rho^{\perp}$ ,  $\varphi^{\perp}$ ).

Представлялось важным применить данный простой, но весьма продуктивный метод в сложных условиях Центрального Тянь-Шаня и получить надежную модель в качестве базиса для последующих более сложных решений задачи 2D инверсии совместного ансамбля МТ/МВ данных [Sokolova et al., 2007; 2008] в рамках общего подхода, представленного в работах [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007]. Это исследование имело солидное основание – в работе [Бердичевский и др., 2003] уже была изучена специфика приложения метода последовательных частичных инверсий при интерпретации имитационных данных в модели “нарынского” типа.

В первой части статьи представлены результаты предварительного изучения интерпретируемых данных, выходящие за рамки систематического анализа их точности и размерности, выполненного в работе [Бердичевский и др., 2010]. Во второй части приводятся результаты инверсии МВ данных (типперов) с помощью сглаживающего алгоритма REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000]. В третьей, наиболее важной части представлена серия геоэлектрических моделей, полученных в результате последовательности частичных инверсий по алгоритму INV2D [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007] сначала для МВ данных, а затем для различных импедансных компонент.

К сожалению, М.Н. Бердичевский ушел из жизни, когда работа над текстом этой статьи была еще далека от завершения. Мы сознаем, что с его участием изложение полученных результатов могло бы стать более полным, точным и ярким.

## 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МТ/МВ ДАННЫХ

### Проверка выполнения импедансных дисперсионных соотношений

Прежде, чем приступить к интерпретации данных, необходимо оценить их качество и, в частности, проверить выполнение импедансных диспер-

сионных соотношений. Дисперсионные соотношения между кажущимся сопротивлением ( $\rho$ ) и фазой импеданса ( $\varphi$ ) справедливы в одномерной (горизонтально слоистой) и двумерной (в случае  $H$ -поляризации поля) средах [Weidelt, 1972; Бердичевский, Дмитриев, 1991]. В двумерном случае  $E$ -поляризации они нарушаются в достаточно редких ситуациях – таких как зондирования в глубоких каньонах и донные наблюдения в области берегового склона [Алексеев и др. 2009].

Для 14 зондирований на киргизской части профиля исследована точность выполнения указанных дисперсионных соотношений – проведен пересчеты  $\rho$  в  $\varphi$  (и наоборот) для данных продольной и поперечной поляризации поля. Поскольку измерительные оси зондирований ориентированы по геомагнитным меридиану ( $x$  – на север) и широте ( $y$  – на восток), а простираются глубинных геоэлектрических структур близко к широтному, то в качестве поперечных и продольных кривых выбраны исходные кривые  $\rho_{xy}$  и  $\rho_{yx}$ , соответственно. Расчеты проводились по программе Похотелова [Бердичевский, Похотелов, 1997] в интервале периодов  $1-10^4$  с. Практически для всех рассмотренных зондирований исследуемые дисперсионные соотношения выполняются с приемлемой точностью – это видно на рис. 1, где сопоставлены исходные фазы с фазами, пересчитанными из кажущихся сопротивлений. Расхождения наблюдаются лишь в области длинных периодов, что обусловлено погрешностями экстраполяции данных при вычислении дисперсионных интегралов. Лишь в 404 пункте на периодах до 100 с отмечаются существенные невязки между наблюдаемыми и вычисленными кривыми.

### Оценки размерности и простираения глубинных структур

Подробный анализ инвариантных параметров МТ/МВ откликов, характеризующих размерность геоэлектрической среды и направления простирающихся доминирующих структур, сделан в работе [Бердичевский и др., 2010]. Особое внимание при этом уделялось получению оценок, свободных от искажающего влияния приповерхностных неоднородностей. Показано, что импедансные амплитуды испытывают сильные статические искажения во всем диапазоне периодов. Продольные фазы искажены существенно меньше. Влияние на них осадочных впадин, как правило, заканчивается на периодах в первые сотни секунд. Анализ индукционных векторов и параметров асимметрии ( $\text{Skew}$ ) для различных МТ/МВ откликов свидетельствует о том, что на всем профиле (особенно в северной его части – п. 405–414) имеет место достаточно устойчивая квазидвумерность данных, осложненная в отдельных компонентах и на отдельных участках профиля статическими эффектами приповерхностных структур и верхнекоровыми 3D неоднородностями.

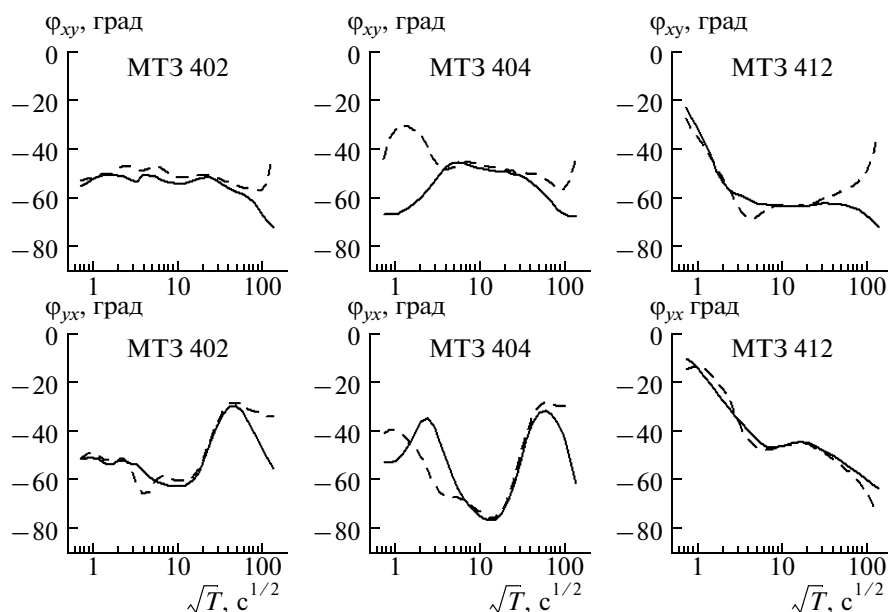


Рис. 1. Результаты пересчета кривых кажущегося сопротивления в фазовые для двух поляризаций поля: верхний ряд – поперечная поляризация, нижний – продольная; сплошные линии – наблюдаемые данные, пунктирные – вычисленные.

Дополним этот анализ рассмотрением МТ и МВ полярных диаграмм, следуя монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. На рис. 2 представлены полярные диаграммы ряда компонент импеданса и типпера вдоль профиля НАРЫН для периода 1600 с. Эти диаграммы построены по результатам ранних наблюдений с аппаратурой ЦЭС-2 и служат дополнительной наглядной иллюстрацией основных выводов работы [Бердичевский и др., 2010].

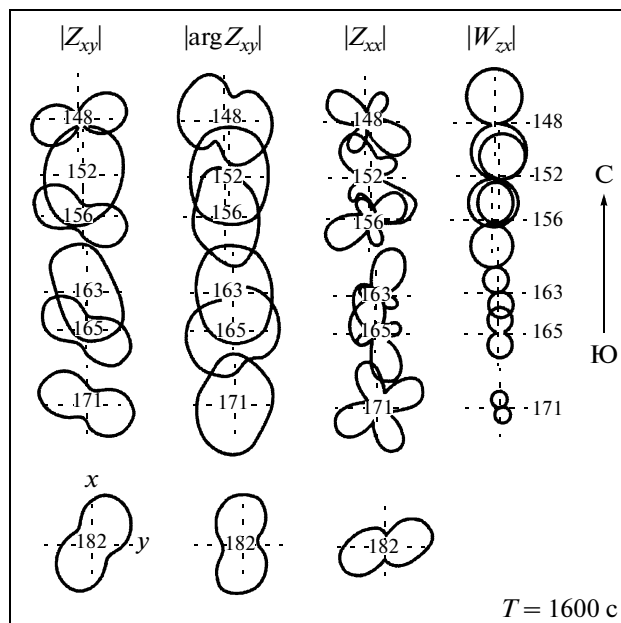


Рис. 2. Полярные диаграммы импеданса и типпера по наблюдениям ЦЭС-2 вдоль профиля НАРЫН [Бердичевский, Дмитриев, 2009]; цифры внутри и около полярных диаграмм – номера пунктов зондирования.

В поведении импедансных диаграмм  $|Z_{xy}|$  и  $|Z_{xx}|$  отсутствует явная закономерность изменения формы и ориентации вдоль профиля. Диаграммы  $|\arg Z_{xy}|$  более устойчивы к приповерхностным искажениям. Во многих точках они вытянуты в субмеридиональном направлении, отражая субширотное простираение региональных двумерных структур. Наиболее информативными являются амплитудные диаграммы типпера. Они во всех точках профиля имеют форму восьмерок с довольно тонкими перехватами в центре и ориентированы в субмеридиональном направлении, что отчетливо указывает на региональные квазидвумерные структуры субширотного простираения.

Таким образом, и новые длиннопериодные данные LIMS, и старые данные ЦЭС-2 убеждают нас, что в условиях Центрального Тянь-Шаня вполне допустимо интерпретировать наиболее информативные компоненты данных (прежде всего, МВ отклики и фазы импеданса) в классе 2D моделей.

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СГЛАЖЕННАЯ 2D ИНВЕРСИЯ МВ ДАННЫХ

Перед тем, как приступить к последовательности инверсий в блочной модели, была выполнена сглаженная 2D инверсия длиннопериодных МВ данных по программе REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000]. Нашей целью здесь была демонстрация информативности данных типпера  $W_{zx}$  при минимальных априорных предположениях, выражаемых в схеме параметризации геоэлектрической модели. Для детализации наиболее интересных участков профиля (разломной зоны Линии Николаева и Атбаши-Иньльчекского разлома) дополнительно были привлечены данные ЦЭС-2 в пунктах 165 и 174.

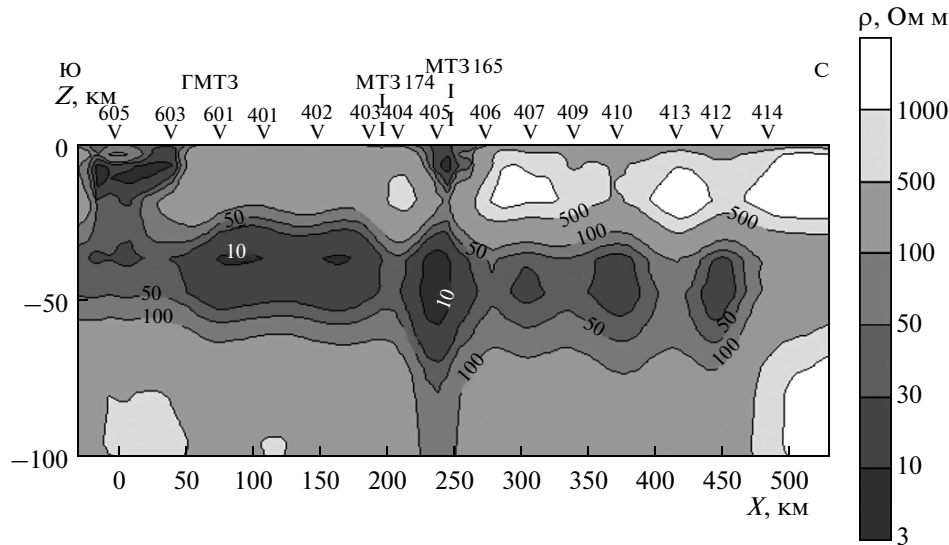


Рис. 3. Геоэлектрический разрез вдоль профиля НАРЫН, построенный по результатам инверсии МВ данных ( $\text{Re } W_{zx}$ ) по программе REBOCC; изолинии сопротивления даны в Ом м.

Рассматривались две стартовые модели: одно-родное полупространство и пятислойный горизонтально слоистый разрез. В слоистой модели первый слой имитировал осадочно-вулканогенный чехол ( $\rho_1 \sim 100$  Ом м,  $h_1 \sim 1$  км), второй — плохо проводящую верхнюю кору ( $\rho_2 \sim 1000$  Ом м,  $h_2 \sim 30$  км), третий — коровый проводящий слой ( $\rho_3 \sim 50$  Ом м,  $h_3 \sim 25$  км), четвертый — плохо проводящую верхнюю мантию ( $\rho_4 \sim 500$  Ом м,  $h_4 \sim 90$  км) и пятый — хорошо проводящую мантию ( $\rho_5 = 50$  Ом м). Параметры слоев взяты из работ [Трапезников и др., 1997; Berdichevsky, Dmitriev, 2002].

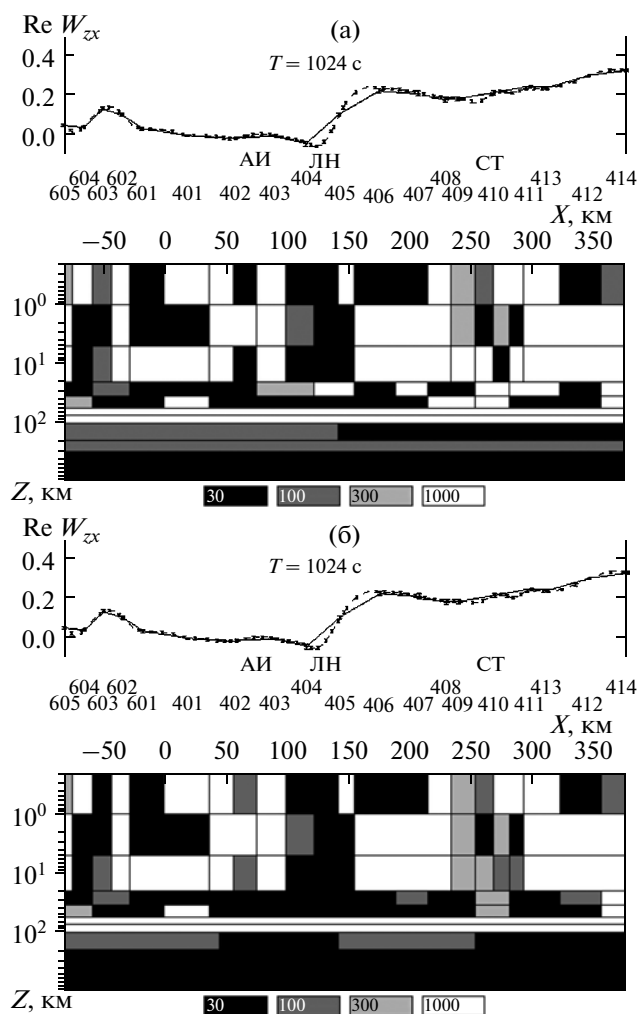
Расчеты показали, что если в стартовой модели проводящий слой отсутствует, то в итоговой он не составляет единую структуру, а разделяется на несколько изолированных “пятен”. Наиболее яркий результат получен при инверсии компоненты  $\text{Re } W_{zx}$  в интервале периодов 25–1600 с, когда в качестве стартовой модели используется горизонтально-слоистая среда. На рис. 3 показан итоговый геоэлектрический разрез до глубины 100 км. Здесь существенно детализируется коровый проводящий слой, намеченный в начальной модели на глубине 30–60 км, и наблюдается его погружение с юга на север с предположительным выклиниванием севернее п. 412–414, а также проявляется его латеральная неоднородность с понижением сопротивления с начального уровня 50 Ом м ниже 10 Ом м. Выявлены и проводящие вертикальные зоны, соединяющие коровый проводник с осадочным чехлом. Эти зоны приурочены к серии глубинных разломов в районе п. 405 (Линия Николаева); п. 603–605 (бортовые разломы на севере Таримского бассейна) и п. 410 (Северо-Тяньшаньский разлом). Важно подчеркнуть, что при инверсии типпера не только локализуются глубинные аномалии электропроводности, но и уточняется слоистая структура вмещающей среды, в

частности прослеживается повышение сопротивления верхней коры от Линии Николаева на север.

### 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ БЛОЧНАЯ ИНВЕРСИЯ МТ/МВ-ДАННЫХ

На данном этапе строится последовательность 2D инверсий МТ/МВ данных в классе блочных моделей с фиксированной геометрией с использованием алгоритма INV2D [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007]. В рамках применяемого алгоритма возможен выбор различных схем параметризации модели и схема с фиксированной геометрией является простейшей. При проведении блочной инверсии важно правильно выбрать размер и геометрию блоков. Нами при построении интерпретационной модели учитывались априорные данные о строении региона и результаты предварительной сглаженной инверсии REBOCC. Разбиение на блоки осуществлялось в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [Dmitriev, 1987; Бердичевский, Дмитриев, 1991; Berdichevsky, Dmitriev, 2002]. Интерпретационная модель должна, с одной стороны, отражать все существенные особенности разреза, а, с другой стороны, быть достаточно простой, чтобы обеспечить практическую устойчивость решения обратной задачи. Исходя из этого, области разреза, где предполагались резкие изменения электропроводности, разбивались на блоки более детально, а области с незначительными изменениями электропроводности представлялись укрупненными блоками. Так была получена начальная модель, состоящая из 125 блоков, сопротивления которых подлежали оптимизации. Решение задач моделирования ЭМ полей осуществлялось на конечно-разностной сетке размерностью  $90 \times 44$  узлов.

Интерпретация МВ и МТ данных в построенной модели велась методом последовательных ча-



**Рис. 4.** Геоэлектрическая модель вдоль профиля НАРЫН, полученная в результате инверсии  $Re W_{zx}$  и  $Im W_{zx}$  по программе INV2D: (а) – первичное решение; (б) – решение с верхнемантийной детализацией; вверху – профильные графики наблюдаемых и модельных данных для периода 1024 с; здесь и на следующих рисунках приняты следующие обозначения: сплошная линия – наблюдаемые данные, пунктирная – модельные; цифры в прямоугольниках внизу – средняя величина сопротивления блоков в Ом м; АИ – Атбаш-Иньльчекский разлом, ЛН – Линия Николаева, СТ – Северо-Тяньшаньский разлом.

стичных инверсий. Процесс инверсий состоял из четырех этапов.

### Инверсия МВ данных ( $Re W_{zx}$ и $Im W_{zx}$ )

Начальной моделью инверсии служило однородное полупространство сопротивлением 1000 Ом м. Разбиение на блоки осуществлялось следующим образом. Область моделирования в Земле делилась на 10 слоев, 5 верхних слоев (до глубины 75 км) разбивались на 23 блока каждый, 2 следующих (до глубины 200 км) – на 4 блока, нижнее основание (глубже 200 км) было представлено двумя блоками.

Прежде всего, было необходимо определить период, начиная с которого типпер освобождался от влияния неоднородностей верхней части разреза. Результаты структурного анализа МВ откликов, приведенные в первой статье цикла [Бердичевский и др., 2010], а также ряд предварительных инверсий, осуществленных для различных диапазонов периодов, позволили установить, что наилучшие результаты (с наименьшими невязками данных) получаются для интервала периодов 724–4096 с. На более коротких периодах остается существенным влияние приповерхностных неоднородностей, а на более длинных – проявляются эффекты неоднородности внешнего источника.

Модель, полученная в результате инверсии данных  $Re W_{zx}$  и  $Im W_{zx}$ , приведена на рис. 4а. Отметим, что в данном случае по одним лишь МВ откликам при полном отсутствии априорных предположений в начальной модели однородного полупространства восстанавливаются все основные структурные элементы среды. Отчетливо выделяются: неоднородный верхний слой, имитирующий осадочный чехол; 4 локальные проводящие зоны в верхней коре, приуроченные к Северо-Тяньшаньскому разлому (п. 409–410), разломной зоне Линии Николаева (п. 405), Атбаш-Иньльчекскому разлому (п. № 403) и северному борту Таримского бассейна (п. 603–605); горизонтально неоднородный коровый проводящий слой на глубине 20–55 км и ступень в астеносфере на глубине 100–200 км, расположенная под Линией Николаева. Эта модель дает вполне удовлетворительное совпадение модельных и наблюдаемых данных во всем рассматриваемом диапазоне периодов – невязки не превышают первых процентов (рис. 4а, верхняя панель).

Некоторые особенности построенной модели вызвали сомнения, поэтому были проведены два дополнительных опыта.

### Проверка наличия в коровом слое плохо проводящих участков

Результаты инверсии показали, что проводящий слой в коре на некоторых участках профиля (под Линией Николаева и Северо-Тяньшаньским разломом) содержит высокоомные блоки. Были сделаны попытки заменить, учитывая принцип эквивалентности, непроводящие блоки более проводящими так, чтобы не допустить заметного возрастания невязок данных. Для восьми блоков, расположенных в основании Линии Николаева вычислялись величины средней электропроводности и соответствующего среднего сопротивления ( $\rho_{\text{среднее}}$ ), затем значения сопротивлений всех остальных блоков модели фиксировались, и оптимизировались только эти 8 блоков ( $\rho_{\text{начальное}} = \rho_{\text{среднее}}$ ). Такая же процедура осуществлялась с блоками в основании Северо-Тяньшаньского разлома. Результаты показали, что в районе Линии Николаева плохо проводящие блоки

исчезают, причем общая невязка модели существенно не увеличивается, а вот в основании Северо-Тяньшаньского разлома сохраняются повышенные сопротивления (100–200 Ом м). Этот результат в определенной степени согласуется с выводами статьи [Трапезников и др., 1997] о том, что в северной части профиля сопротивление корового проводника увеличивается, хотя в нашей модели это увеличение нельзя назвать монотонным и плавным.

#### Проверка наличия ступени в астеносфере

Верхнемантийный слой на глубине 100–200 км был разбит на большее количество блоков, чем в первоначальной модели, и была выполнена инверсия с начальной моделью, представлявшей результат предыдущей инверсии. В итоге проявилась латеральная неоднородность верхней мантии с проводящими блоками, тяготеющими к вертикальным коровым проводящим зонам в центральной части профиля. Эту модель (рис. 4б) можно считать окончательной в процессе инверсии типперов.

#### Инверсия продольных фаз импеданса

Результаты инверсии данных типпера были использованы в качестве начальной модели при инверсии фаз продольного импеданса ( $\phi^{\parallel}$ ). На предварительном этапе исследований мы убедились, что дисперсионные соотношения между модулем и фазой импеданса в большинстве случаев выполняются. Поэтому мы отказались от использования статически искаженных продольных амплитудных кривых и ограничились инверсией одних лишь фазовых данных.

Расчеты проводились для двух интервалов периодов. Сначала инверсия продольных фаз  $\phi^{\parallel}$  велась в том же диапазоне, что и инверсия типперов. Однако, фазы в этом диапазоне меняются слабо и результат инверсии получился почти такой же, как и при инверсии типперов (лишь увеличился контраст сопротивлений в мантийных блоках). В расширенном диапазоне периодов (22–4096 с) получена модель, представленная на рис. 5. В ней все основные структурные элементы выделяются так же отчетливо, как и при инверсии типперов. При этом продольные фазы позволили скорректировать конфигурацию субвертикальных проводников (по данным типперов они получились более растянутыми по горизонтали). Уменьшилось также сопротивление блоков, расположенных над коровым проводящим слоем на глубине 10–20 км. Это, возможно, связано с наличием в консолидированной земной коре выше проводящего слоя других, относительно малых проводящих структур, проявляющихся, из-за большого размера оптимизируемых блоков, в таком сглаженном виде.

Не удалось, однако, подобрать минимум фазовых данных на периодах 256–1024 с в пункте 404. Напомним, что на этом участке профиля наблюдалось и нарушение дисперсионных соотношений.

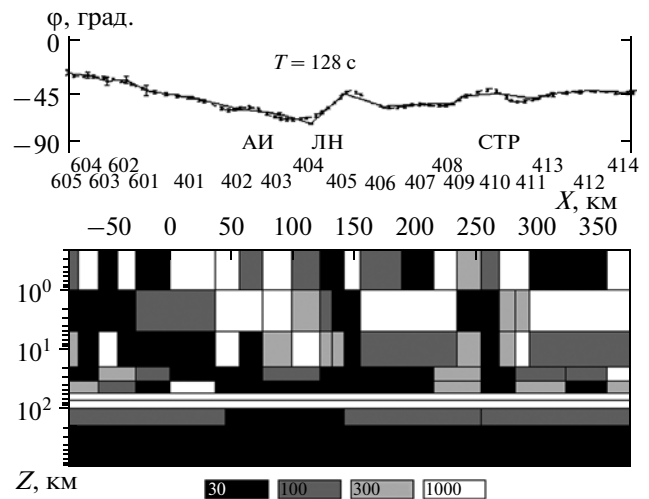


Рис. 5. Геоэлектрическая модель вдоль профиля НАРЫН, построенная по результатам инверсии продольных фаз (стартовая модель – результат инверсии типперов); сверху – профильные графики наблюдаемых и модельных продольных фаз для периода 128 с.

Возможно, это связано с наличием в разрезе глубинной 3D неоднородности, затрудняющей двумерных подбор данных.

#### Уточнение сопротивления осадков и высокоомной части земной коры по поперечным импедансным данным

Следующим этапом стало использование поперечных фазовых и амплитудных кривых для уточнения сопротивления осадков и верхней части земной коры. В качестве начальной была взята итоговая модель инверсии продольных импедансных фаз (рис. 5) и в ней оптимизировались только блоки, представляющие осадки и высокоомные участки земной коры на глубине до 20 км, а также блоки в верхних частях Линии Николаева и Северо-Тяньшаньского разлома на глубине 1–5 км. Расчеты в случае *H*-поляризации позволили уточнить сопротивление консолидированной земной коры – в северной части профиля оно больше, чем в южной, а также показать, что коровые аномалии Линии Николаева и Северо-Тяньшаньского разлома соединяются с осадочными отложениями и могут служить каналами для перетекания тока из глубинных проводящих слоев в приповерхностный.

#### 4. ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ИТОГОВОЙ МОДЕЛИ И ПРОВЕРКА ЕЕ ДОСТОВЕРНОСТИ

По результатам последовательных инверсий получена серия моделей, которые при сохранении общих черт несколько отличаются друг от друга в деталях. Выполнена следующая процедура их сведения в обобщенную итоговую модель. Модель, получен-

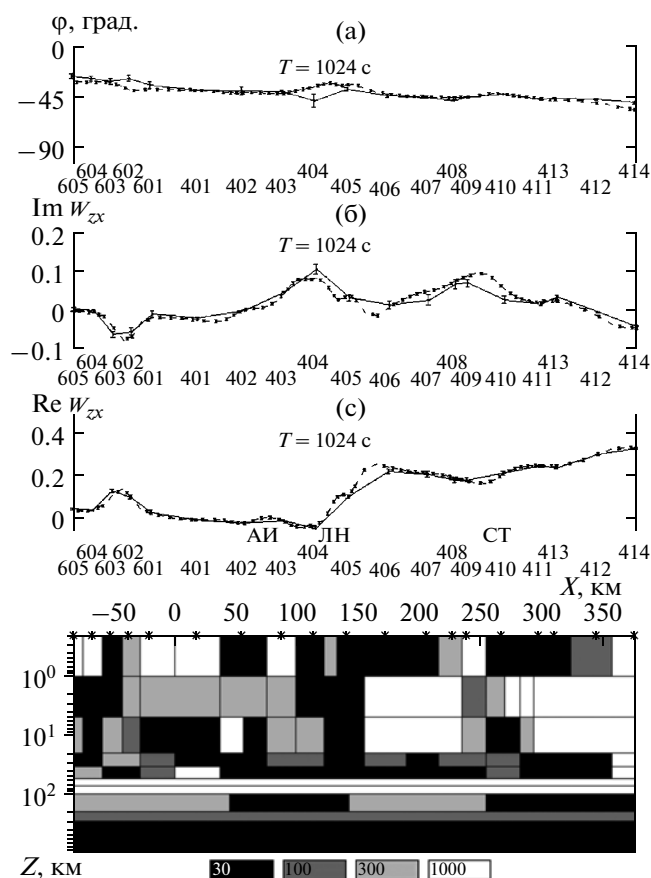


Рис. 6. Итоговая блочная геоэлектрическая модель вдоль профиля НАРЫН, полученная в результате последовательности частичных инверсий.

ная по поперечным импедансным данным, была несколько скорректирована для более полного соответствия всей совокупности инвертируемых данных. Коррекция модельных сопротивлений осуществлялась с учетом информативности блоков и при постоянном контроле невязок. Полученная модель представлена на рис. 6.

Далее была проведена проверка значимости составных частей этой модели — примерно так же, как это делалось при построении итоговой модели метода последовательных инверсий в эксперименте EMSLAB [Ваньян и др., 2002]. Поочередно убирались отдельные существенные структуры (Линия Николаева, Атбаши-Иньльчекский разлом, вертикальная проводящая зона в Китае, Северо-Тяньшаньский разлом, коровый проводящий слой) и сравнивались невязки, получаемые до и после изменений. Мы убедились, что как только один из указанных элементов модели убирается, невязки значительно возрастают. Лишь при исключении проводящих блоков, соответствующих Атбаши-Иньльчекскому разлому, невязки увеличились незначительно. Единственный элемент, присутствие которого не было подтверждено таким образом, — это ступени в астеносфере.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода последовательных частичных инверсий позволило достаточно надежно построить геоэлектрический разрез вдоль геотраверса НАРЫН. На этом разрезе нашли свое отражение все основные глубинные структуры региона, которые пересекает профиль: Северо-Тяньшаньский разлом, разломную зону Линии Николаева, Атбаши-Иньльчекский разлом, северную бортовую зону Таримского бассейна. Уверенно выделен коровый проводящий слой в интервале глубин 20–55 км с проводимостью, меняющейся по латерали. Этот слой прослеживается практически вдоль всего профиля, исчезая лишь на севере в районе п. 412–414. Получены данные, свидетельствующие о неоднородности проводящей астеносферы, однако они нуждаются в дальнейшем уточнении.

Показано, что магнитовариационные параметры ( $\text{Re } W_{zx}$  и  $\text{Im } W_{zx}$ ) содержат практически полную информацию о глубинном разрезе и при их инверсии получают модели, весьма близкие к итоговой. Этот результат иллюстрирует выводы работы [Бердичевский и др., 2003] об информационной эквивалентности идеальных данных импеданса и типпера в 2D средах и согласуется с результатами инверсии синтетических МТ/МВ данных в блочных 2D моделях [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007]. Таким образом, инверсия данных типпера в сложных, но квазидвумерных геоэлектрических условиях может дать надежную основу для дальнейших уточняющих оценок, выполняемых путем инверсии фазовых импедансных откликов и избранных компонент кажущегося сопротивления.

Следует подчеркнуть, что решение обратной задачи в моделях с фиксированной геометрией и достаточно крупной блочной структурой облегчает устойчивое решение обратной задачи в силу компактности вектора оптимизируемых параметров. Выбор оптимизируемых блоков, существенно влияющих на интерпретируемый ансамбль данных, становится здесь дополнительным средством стабилизации и учета априорной информации. Разумеется, при этом страдает точность подбора данных, однако устойчивое решение с умеренным разрешением на практике выглядит предпочтительнее детального, но неустойчивого. Поэтому метод последовательных инверсий даже в представленной, достаточно простой реализации несомненно полезен при решении обратной задачи в сложно построенных регионах.

Не следует, однако, считать, что сопоставимого компромисса устойчивости/детальности решения обратной задачи нельзя добиться при одновременной совместной инверсии всего ансамбля МТ/МВ данных и при усложнении схем параметризации модели. В рамках примененного алгоритма INV2D с помощью робастной метрики функционала невязки данных удается эффективно разрешать противоречия, возможные при инверсии многокомпо-

ментных ансамблей данных. В работах [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007] приведены примеры инверсии синтетических данных в достаточно сложных блочных моделях, в которых качество решений совместной многокомпонентной инверсии близко к решению путем последовательной инверсии. Ярким примером эффективности совместной многокомпонентной инверсии в режиме многооконого сканирования среды в рамках алгоритма INV2D стало решение обратной задачи для синтетических данных в чрезвычайно сложной 2D модели, имитирующей разрез зоны сочленения докембрийской и палеозойской платформ в Польской Померании [Varentsov et al., 2007].

В следующей статье этого цикла, которая готовится к печати, будет подробно показано, что дает применение упомянутых новых возможностей алгоритма INV2D при инверсии комплекса МТ/МВ данных на профиле НАРЫН и как сопоставляются результаты последовательных частичных и совместных многокомпонентных инверсий в весьма сложных высокогорных условиях Центрального Тянь-Шаня. Первые результаты этих исследований уже представлены в работах [Sokolova et al., 2007; 2008]. Данный анализ позволит точнее сформулировать рациональную стратегию интерпретации квазидвумерных МТ/МВ данных в условиях, типичных для высокогорных орогенов.

Авторы благодарны В.И. Дмитриеву за полезные советы и консультации в ходе выполнения работы. Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00875а и 08-05-00345а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Д.А., Пальшин Н.А., Варенцов Ив.М.* Дисперсионные магнитотеллурические соотношения в двумерной модели берегового эффекта // *Физика Земли*. 2009. № 2. С. 84–87.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М.: Недра. 1991. 250 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 570 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С., Мерицкова Н.А., Пушкарев П.Ю.* Магнитовариационное зондирование: новые возможности // *Физика Земли*. 2003. № 9. С. 3–30.
- Бердичевский М.Н., Похотелов Д.О.* О нарушении дисперсионных соотношений в трехмерной магнитотеллурической модели // *Физика Земли*. 1997. № 8. С. 3–12.
- Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов Ив.М., Рыбин А.К., Баглаенко Н.В., Баталев В.Ю., Голубцова Н.С., Матюков В.Е., Пушкарев П.Ю.* Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ магнитотеллурических и магнитовариационных откликов вдоль геотранверса НАРЫН // *Физика Земли*. 2010. Данный номер.
- Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарев П.Ю., Романюк Т.В.* Геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны // *Физика Земли*. 2002. № 10. С. 23–53.
- Ваньян Л.Л., Варенцов Ив.М., Голубев Н.Г., Соколова Е.Ю.* Построение индукционных МТ кривых по профильным геомагнитным данным при изучении электропроводности континентальной астеносферы в эксперименте EMSLAB // *Физика Земли*. 1997. № 10. С. 33–46.
- Варенцов И.М.* Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // *Физика Земли*. 2002. № 11. С. 11–33.
- Варенцов Ив.М., Голубев Н.Г., Гордиенко В.В., Соколова Е.Ю.* Исследование глубинной геоэлектрической структуры вдоль профиля Линкольн Лайн (эксперимент EMSLAB) // *Физика Земли*. 1996. № 4. С. 124–144.
- Киссин И.Г., Рузайкин А.И.* Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Киргизского Тянь-Шаня // *Физика Земли*. 1997. № 1. С. 21–29.
- Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Вольхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К.* Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня // *Физика Земли*. 1997. № 1. С. 3–20.
- Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I.* Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems. Tulsa: SEG. 2002. 215 p.
- Dmitriev V.I.* Inverse problems in electrodynamic prospecting. III-posed problems in the natural sciences. M.: Mir. 1987. P. 77–101.
- Siripunvaraporn W., Egbert G.* An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data // *Geophysics*. 2000. V. 65. P. 791–803.
- Sokolova E., Berdichevsky M., Varentsov I., Rybin A., Baglaenko N., Batalev V., Golubtsova N., Matukov V., Pushkarev P.* Advanced methods for joint MT/MV profile studies of active orogens: The experience from the Central Tien Shan. Protokoll uber das 22 Kolloquium “Elektromagnetische Tiefenforschung” / Eds. Ritter O., Brasse H. Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam. Germany. 2007. P. 132–141.
- Sokolova E., Berdichevsky M., Varentsov I., Rybin A., Golubtsova N., Pushkarev P., Baglaenko N., Matukov V.* Geoelectrical cross-section of Central Tien Shan and geodynamic implications. 19th Int. Workshop on EM Induction in the Earth (Extended Abstracts. V. 1). Beijing. China. 2008. P. 203–208.
- Varentsov Iv.M.* Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data // *Electromagnetic sounding of the Earth's interior. Methods in geochemistry and geophysics*, 40 / Ed. Spichak V.V. Elsevier. 2007. P. 189–222.
- Varentsov Iv., Baglaenko N., Sokolova E.* EMTESSZ-Pomerania WG. 2D inversion resolution in the EMTESSZ-Pomerania project: data simulation approach. Protokoll uber das 22 Kolloquium “Elektromagnetische Tiefenforschung” / Eds. Ritter O., Brasse H. Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam. Germany. 2007. P. 143–150.
- Weidelt P.* The Inverse Problem of Geomagnetic Induction // *Zeitschrift für Geophysik*. 1972. V. 8. P. 257–290.
- Wannamaker P.E., Stodt J.A., Rijo L.* A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling // *Geophys. J.R. Astr. Soc.* 1987. V. 88. P. 277–296.