

УДК 550.837

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ: АНАЛИЗ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ И МАГНИТОВАРИАЦИОННЫХ ОТКЛИКОВ ВДОЛЬ ГЕОТРАВЕРСА НАРЫН

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

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

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

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

E-mail: sokol\_l@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2010

За два последние десятилетия Научной станцией РАН (г. Бишкек) выполнено более сотни магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований на геотраверсе НАРЫН, секущем Тяньшаньский регион от оз. Балхаш до Таримского бассейна вдоль меридиана 76° в.д. Актуальной стала задача интеграции и комплексной интерпретации материалов этих зондирований для достижения нового уровня детальности и достоверности представлений о геоэлектрическом разрезе Центрального Тянь-Шаня. В статье представлен комплекс методов обработки и инвариантного анализа электромагнитных данных, служащий решению этой задачи. Его применение позволило обосновать выбор двумерной интерпретационной модели для профиля НАРЫН и сформировать адекватный ансамбль инвертируемых данных. Разработанные методические подходы будут полезны при проведении подобных исследований и в других горных регионах. Работа поддержана грантами РФФИ 08-05-00875а и РФФИ-ГФЕН 07-05-92124а.

### ВВЕДЕНИЕ

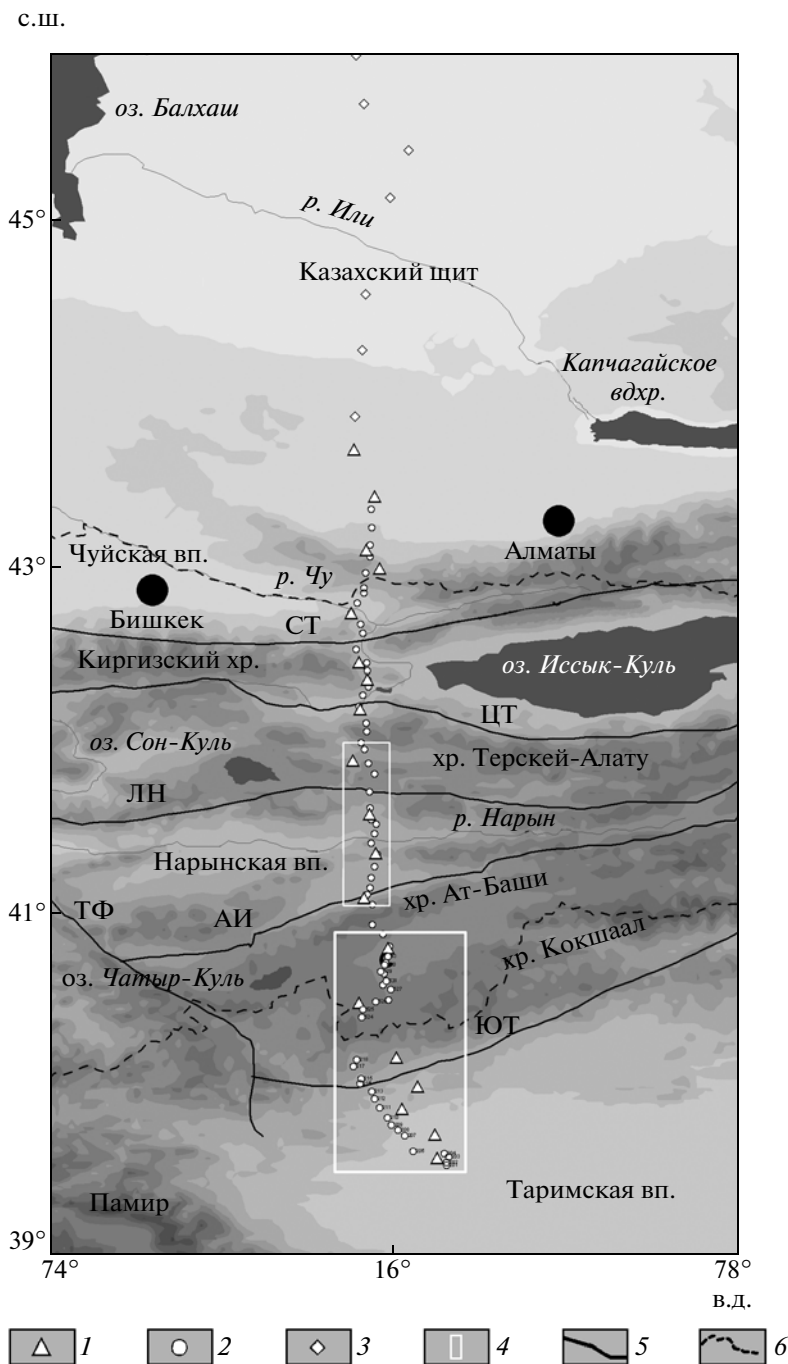
Регион Тянь-Шаня является уникальным объектом для изучения геодинамических процессов современного внутриконтинентального орогенеза. Здесь под эгидой Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) на протяжении последних двадцати лет интенсивно ведутся комплексные геолого-геофизические исследования фундаментальных проблем геодинамики [Современная геодинамика ..., 2005]. Методы глубинной геоэлектрики, прежде всего, магнитотеллурический (МТ) и магнитовариационный (МВ), являются существенными элементами этого комплекса и вносят важный вклад в понимание тектонического строения, флюидного и термического режимов недр.

Первые систематические представления о геоэлектрическом строении земной коры региона были получены по массиву МТ/МВ зондирований, проведенных в 80-х и 90-х годах с разведочной аппаратурой на серии геотраверсов, секущих Тянь-Шань [Трапезников и др., 1997; Рыбин и др. 2001]. История этих исследований, выполненных вместе с учеными МГУ, приводится в статье [Бердичевский и др., 2010].

Геотраверс НАРЫН, наиболее представительный в этой серии по протяженности и количеству зондирований, проходит вдоль меридиана 76° в.д. через Центральный Тянь-Шань, являющийся фокусом геодинамической активности всего орогена.

Для получения более достоверной информации о глубинном распределении электропроводности в 1999–2000 гг. здесь было выполнено 19 длиннопериодных зондирований [Bielinski et al., 2003]. Затем, в 2005 и 2007 гг., на выявленных наиболее сложно построенных участках проведены детализационные зондирования с новым поколением разведочной аппаратуры. Сводный массив зондирований на профиле НАРЫН представлен на рис. 1. Важно подчеркнуть, что в большинстве точек этого массива выполнены не только МТ, но и МВ зондирования. Более того, с конца 90-х годов практически все зондирования велись синхронно несколькими станциями.

Актуальной стала задача интеграции на этом профиле уникальных (по плотности и диапазону периодов), но весьма разнородных массивов данных и проведения их совместной интерпретации с целью построения опорного геоэлектрического разреза Центрального Тянь-Шаня на современном уровне детальности и достоверности. Создание рационального комплекса методов, способного решить эту задачу, стало главным направлением деятельности рабочей группы NARYN, объединившей ученых из НС РАН, МГУ и ЦГЭМИ ИФЗ РАН – авторов данной статьи. Предстояло развить алгоритмы обработки, анализа и двумерной (2D) интерпретации комплекса МТ и МВ данных с учетом специфики выполненных зондирований и особенностей региона. Акцент в этой работе был сделан на



**Рис. 1.** Схема расположения пунктов МТ/МВ зондирований вдоль геотранверса НАРЫН на фоне карты рельефа Центрального Тянь-Шаня и сопредельных территорий: 1 – пункты длиннопериодных зондирований LIMS; 2 – пункты зондирований ЦЭС-2; 3 – пункты зондирований МТ-ПИК; 4 – участки детализационных зондирований Phoenix; 5 – основные разломы: СТ – Северо-Тяньшаньский, ЦТ – Центрально-Терскейский, ЛН – Линия Николаева, АИ – Ат-баши-Инильчекский, ТФ – Таласо-Ферганский, ЮТ – Южно-Тяньшаньский; 6 – граница Кыргызстана.

наиболее полном учете ресурсов синхронности зондирований, получении глубинных ЭМ откликов, свободных от искажающего влияния приповерхностных структур, применении многокомпонентной 2D инверсии с учетом топографии и степени

трехмерности отдельных элементов ансамбля интерпретируемых данных. Полученные результаты позволили повысить качество данных и эффективность решения интерпретационных задач в сложных квазидвумерных средах по сравнению с наши-

ми предшествующими работами [Варенцов и др., 1996; Ваньян и др., 1998; 2002; Бердичевский и др., 2003; Рыбин и др., 2001; Bielinski et al., 2003].

Результаты исследований рабочей группы NARYN, включая развитые методические подходы, полезные при анализе ЭМ откликов и в других горных регионах, будут изложены в серии итоговых публикаций. В настоящей статье, первой в этой серии, подводятся итоги начального этапа создания интерпретационной модели и представляются результаты верификации и анализа МТ и МВ откликов, полученных по материалам всей совокупности зондирований на профиле НАРЫН. Исследуется и обосновывается возможность их интерпретации в рамках двумерного подхода. Представляется многокомпонентный ансамбль оценок МТ/МВ передаточных операторов (импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика), сформированный в сводном диапазоне периодов 0.1–16384 с и подлежащий дальнейшей интерпретации.

В статье также представлены важные методические результаты, прежде всего, новые схемы многоточечного помехоподавляющего оценивания локальных передаточных операторов (импеданса  $Z$  и типпера  $W_2$ ) и двухточечного синхронного горизонтального МВ оператора  $M$ ; а также новые приемы инвариантного анализа передаточных операторов для определения размерности геоэлектрической среды и направлений простирания доминирующих глубинных структур в присутствии приповерхностных гальванических искажений.

В последующих публикациях будут рассмотрены два взаимодополняющих подхода к инверсии построенного ансамбля данных, параллельно развиваемых группой NARYN и основанных на различных модификациях общего алгоритма решения обратных задач, развитого в работах [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007]. В первом подходе [Бердичевский и др., 2010] для максимально устойчивого построения относительно простой геоэлектрической модели вдоль Нарынского профиля используются одни лишь длиннопериодные данные и реализуется стратегия [Бердичевский и др., 2003] их последовательных частичных инверсий с приоритетом МВ откликов (типперов) и импедансных фаз. В основе второго подхода, результаты которого готовятся к печати, лежит существенно более детальная кусочно-непрерывная параметризация модели и применение схем взвешенной многокомпонентной инверсии для извлечения наиболее полной информации из сводного ансамбля данных разведочного и длиннопериодного диапазонов. Первые обнадеживающие результаты этого подхода представлены в [Sokolova et al., 2007; 2008].

## 1. КОМПЛЕКС МТ/МВ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ПРОФИЛЕ НАРЫН

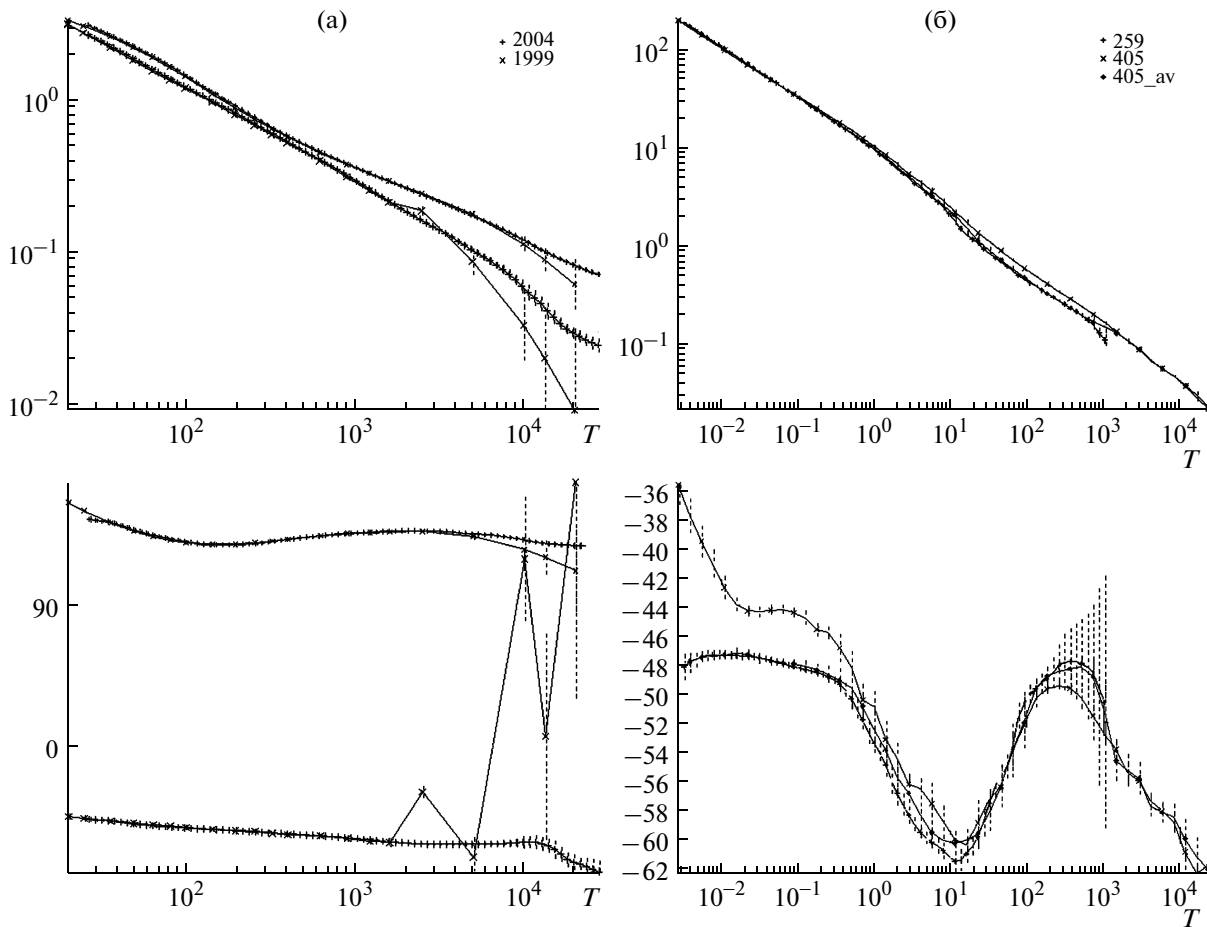
Основу гетерогенной сети ЭМ наблюдений на профиле НАРЫН (рис. 1) заложили 42 локальных зондирования в разведочном диапазоне периодов (0.1–1600 с) со станциями ЦЭС-2 (Киргизский Тянь-Шань) и МТ-ПИК (Казахская плита), выполненные силами НС РАН в 80-е и 90-е годы [Трапезников и др., 1997].

Прогресс в глубинных исследованиях дали поставленные в 1999–2000 гг. пятикомпонентные зондирования с канадскими длиннопериодными станциями LIMS, выполненные синхронно в группах по 5, 10 и 4 пункта для южной (северный Тарим), центральной (Киргизский Тянь-Шань) и северной (Казахская плита) частей профиля, соответственно. Наблюдения LIMS длительностью порядка 20 дней с дискретизацией 2 с дополнялись в каждой точке локальными разведочными зондированиями с американской аппаратурой МТ24 (EMI), что обеспечило сводный диапазон зондирования 0.003–16384 с. Эти зондирования проведены сотрудниками НС РАН совместно с американскими геофизиками из Калифорнийского университета в Риверсайде [Рыбин и др., 2001; Bielinski et al., 2003]. Построенная ими геоэлектрическая модель указывает на значительные вариации электропроводности коры и верхней мантии вдоль профиля. Участок с наиболее сложным геоэлектрическим строением выявлен в пределах Нарынской впадины, ограниченной с севера важнейшей структурной линией региона – разломной зоной Линии Николаева, разделяющей каледониды Северного и каледоно-герцинские структуры Срединного Тянь-Шаня.

Для детализации Нарынского участка в 2005 г. поставлены 23 широкодиапазонных (0.003–2048 с) попарно синхронных зондирования с канадскими разведочными станциями Phoenix. В 2007 г. 18 аналогичных зондирований Phoenix выполнены на примыкающем к южному окончанию профиля НАРЫН сейсмическом геотрассе МАНАС [Рыбин и др., 2008], обеспечивая детализацию зоны сочленения Тарима и Южного Тянь-Шаня.

## 2. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СИНХРОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ИТоговый МАССИВ МТ/МВ ОТКЛИКОВ

Синхронные схемы проведения ЭМ зондирований с естественным возбуждением поля стали на современном этапе важнейшим инструментом изучения геоэлектрической структуры литосферы [Бердичевский, Жданов, 1981; Egbert, 2002; Varentsov, 2007b], поскольку обеспечивают эффективное подавление локальных ЭМ шумов [Gamble et al., 1979; Варенцов и др., 2003; Sokolova, Varentsov, EMTESZ-Pomerania WG, 2005; Ernst et al., 2008], искажений, связанных с неоднородной структурой



**Рис. 2.** (а) – сравнение в п. 407 зондирований LIMS ранее полученных оценок импеданса (1999, [Рыбин и др., 2001]) с новыми оценками (2004), вверху – амплитуды дополнительных импедансов  $Z_{xx}$  и  $Z_{yy}$  (в практических ед.), внизу – соответствующие фазы (в град.); (б) – оценки амплитуды (вверху, в практических ед.) и фазы (внизу, в град.) импеданса  $Z_{xy}$  в п. 405 зондирований LIMS/MT24 и близком п. 659 зондирований Phoenix, а также итоговая оценка для п. 405 (405\_av) как результат робастного осреднения представленных данных.

возбуждения поля [Варенцов, Соколова, 2003] и пополняют ансамбль интерпретируемых данных новыми синхронными откликами [Varentsov, EMTESZ-Pomerania WG, 2005]. Центральный Тянь-Шань стал одним из центральных полигонов обработки методов и технологий синхронного ЭМ зондирования.

#### Методика обработки синхронных данных

Для углубленной обработки синхронных наблюдений на профиле НАРЫН (данных LIMS 1999–2000 гг. и Phoenix 2005–2007 гг.) применялись многоточечные процедуры оценивания передаточных операторов – метод mRR (*multi remote reference*, множественных удаленных баз) [Варенцов и др., 2003], основанный на робастном осреднении RR-оценок для нескольких базовых пунктов, и его новая модификация mRRMC (*multi remote reference with magnetic control*, множественных удаленных баз с магнитным контролем) [Varentsov, Sokolova,

EMTESZ-Pomerania WG, 2005; Varentsov, 2007b]. Процедура mRRMC накладывает ограничения на изменчивость горизонтальных МВ откликов между точкой зондирования и удаленными базами при отборе для обработки отрезков синхронных многоточечных записей ЭМ поля, тем самым концентрируя оценивание передаточных операторов на материале, наиболее отвечающем критериям однородного внешнего поля и ограниченного уровня ЭМ шумов.

С помощью новых методик удалось повысить устойчивость оценивания локальных передаточных операторов  $Z$  и  $W_z$  для данных LIMS по сравнению с результатами первичной обработки [Рыбин и др., 2001], проведенной по программе Чейва [Chave et al., 1987]. Наиболее существенное повышение точности достигнуто для дополнительных компонент импеданса (рис. 2а), что позволило в дальнейшем повысить точность определения его инвариантных параметров, зависящих в общем случае от всех четырех скалярных элементов импедансного тензора. Получение в результате mRRMC осредне-

ния надежных длиннопериодных (выше 10000 с) оценок расширило возможности разрешения верхнемантийных геоэлектрических структур. К сожалению, новая обработка данных LIMS выполнена только для 14 пунктов, расположенных в Киргизии и Казахстане. Временные ряды для пяти китайских зондирований (п. 601–605) в нашем распоряжении отсутствовали и в них при дальнейшем анализе пришлось ограничиться не вполне устойчивыми на длинных периодах (особенно в дополнительных импедансах) первичными оценками  $Z$  и  $W_z$ .

В рамках данного исследования на профиле НАРЫН впервые в Центральном Тянь-Шане получены кондиционные оценки горизонтального МВ оператора  $M$  – передаточного оператора, связывающего горизонтальные магнитные поля в пункте зондирования и базовом пункте наблюдения. Эти синхронные МВ отклики представляются важным интерпретационным ресурсом [Varentsov, EMTESZ-Pomerania WG, 2005; Varentsov, 2007b]. Первоначально горизонтальные МВ отклики для подмножеств киргизских и казахских пунктов LIMS были определены относительно п. 410 и 411, соответственно. Полученные результаты, устойчивые в диапазоне периодов 16–32768 с, с помощью дополнительных синхронных наблюдений 2005 г. на этих базовых пунктах были приведены к единой базе в п. 410.

Обработка данных 23 МТ зондирований, выполненных в 2005 г. с аппаратурой Phoenix для детализации участка профиля в районе разломной зоны Линии Николаева, проводилась методом RRMC с контролем горизонтальных магнитных связей в попарно-синхронных пунктах. Большая часть территории Киргизии характеризуется низким уровнем индустриальных ЭМ шумов, однако низкое качество локальных электрических сетей, трудности заземления электрических линий в горных условиях, возрастающие в этих условиях погрешности ориентации индукционных магнитных датчиков (особенно вертикального) и сильные ветровые помехи в ряде случаев заметно снижают качество получаемых результатов. Помехоподавляющая технология RRMC при построении оценок  $Z$  и  $W_z$  способствовала стабилизации результатов в диапазоне низкой энергии вариаций ЭМ поля (0.1–10 с). Использование стандартной методики однодневных наблюдений Phoenix с применением низкочастотных аппаратных фильтров затрудняло получение надежных результатов на периодах более 1000 с. В ряде случаев удалось добиться стабилизации результатов на периодах 1000–2000 с за счет использования второй базы – стационарного пункта на полигоне НС РАН в г. Бишкеке на удалении более 300 км.

#### Сводные ансамбли передаточных операторов

Результаты углубленной обработки зондирований LIMS и Phoenix были интегрированы с кондиционными оценками  $Z$  и  $W_z$ , полученными ранее по

данным ЦЭС-2, МТ-ПИК и МТ24, а также со стандартными оценками Phoenix для зондирований 2007 г. на геотраверсе МАНАС [Рыбин и др., 2008]. Для зондирований Phoenix, расположенных вблизи пунктов наблюдений LIMS или ЦЭС-2, проводилось сопоставление всех имеющихся результатов и по удовлетворительно согласующимся данным строились осредненные широкодиапазонные оценки (рис. 2б). В итоге, на гетерогенной сети наблюдений геотраверса был сформирован многокомпонентный набор одноточечных (локальных) и двухточечных (синхронных) значений передаточных операторов ЭМ поля в сводном диапазоне периодов 0.003–16384 с. Передаточные операторы представлены в исходной для всех зондирований геомагнитной системе координат с осью  $x$  направленной на север и осью  $y$  – на восток. При величине магнитного склонения на профиле НАРЫН менее  $6^\circ$  нет необходимости их пересчета в географическую координатную систему.

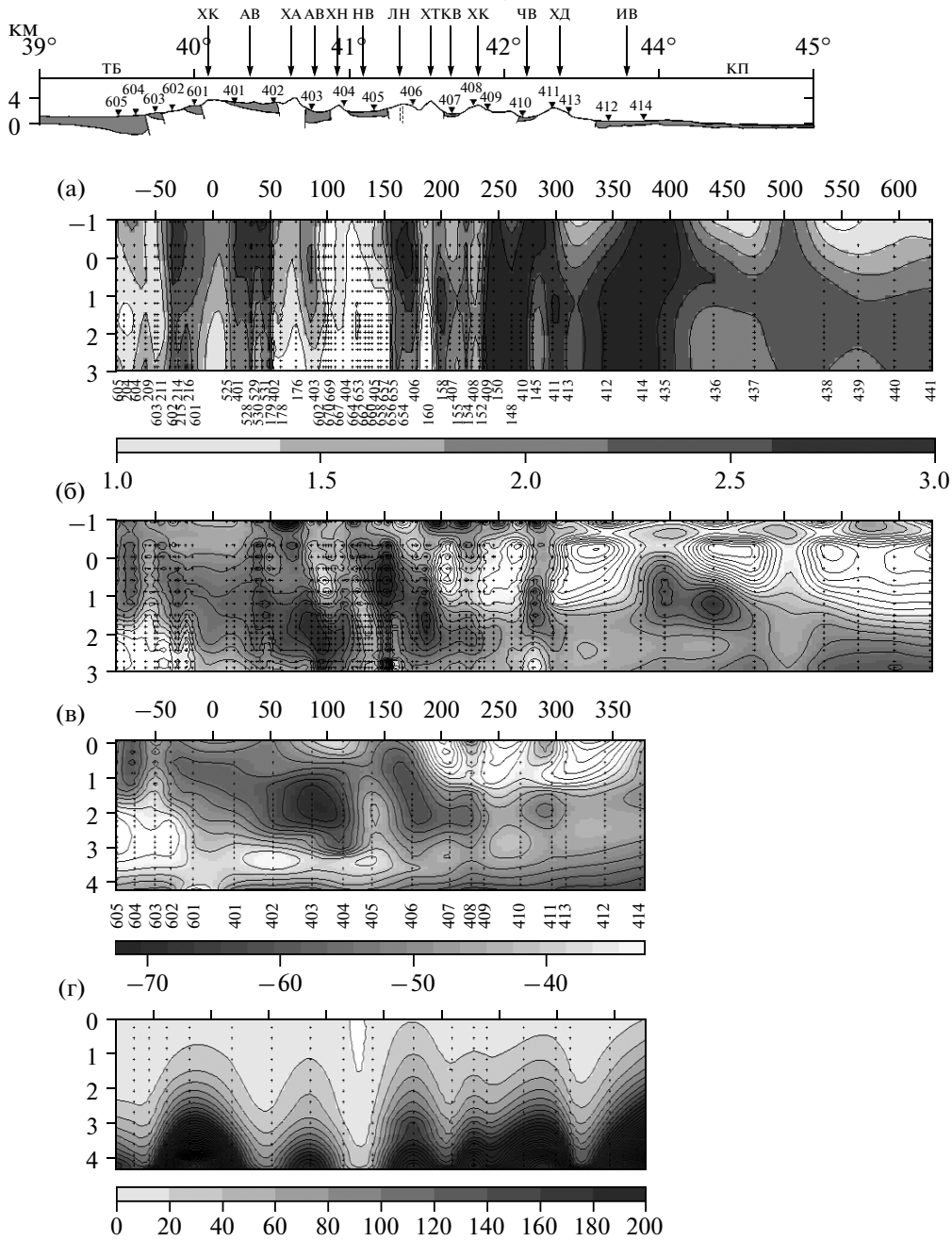
При анализе полученного ансамбля данных выделим два его важных подмножества. Длиннопериодный ансамбль, сокращенно обозначенный ГМТ, основан на сводных зондированиях LIMS/МТ24/Phoenix. Он содержит оценки импеданса и типпера в 19 пунктах для периодов 0.1–16384 с и оценки горизонтального МВ оператора относительно базы в п. 410 для 14 зондирований (п. 401–414) для периодов 32–16384 с.

Кондиционные результаты зондирований ЦЭС-2 (11 пунктов), МТ-ПИК (12), LIMS/МТ24/Phoenix (19) и Phoenix (23) составили в ограниченном разведочном диапазоне периодов более плотный объединенный ансамбль, сокращенно обозначенный МТ. В него входят оценки импеданса в диапазоне периодов 0.1–1024 с и типпера в диапазоне 16–1024 с для 65 зондирований по всей длине профиля от Прибалхашья до северного борта Таримской впадины. Данные этого ансамбля существенным образом детализируют структуру коровых ЭМ откликов, поскольку шаг наблюдений в областях сгущения зондирований уменьшается до 3–5 км (рис. 1, рис. 3).

В настоящем анализе не рассматриваются ЭМ отклики на самых коротких периодах (0.03–0.1 с). Они представляются избыточными при построении единой корово-мантийной геоэлектрической модели вдоль профиля НАРЫН, но могут быть востребованы в дальнейшем при детализации структур осадочного чехла на отдельных ее участках.

#### Морфология псевдоразрезов МТ/МВ откликов

Визуализация построенных ансамблей передаточных операторов в исходной системе координат ( $x$  – север/ $y$  – восток) представляется весьма полезной, поскольку простирающиеся доминирующие геоэлектрические структур априорно (в соответствии с региональной тектоникой) предполагается субши-



**Рис. 3.** Псевдоразрезы импедансных откликов для ансамбля зондирований МТ: (а) – продольное кажущееся сопротивление  $R_o_{EP}$  (в Ом м, lg-масштаб), (б) – фаза продольного импеданса  $Arg_{Z_{EP}}$  (в град.); и для длиннопериодного ансамбля ГМТ: (в) – фаза продольного импеданса  $Arg_{Z_{EP}}$  (в град.), (г) – оценка глубины проникновения ЭМ поля по эффективному кажущемуся сопротивлению (в км); вертикальные оси – период (в с, lg-масштаб); сверху – схема рельефа и осадочных структур: ТБ – Таримский Бассейн; ХК – хр. Кокшаал; АВ – Аксайская впадина; ХА – хр. Ат-Баши; АВ – Атбашинская впадина; ХН – хр. Нарын; НВ – Нарынская впадина; ЛН – разломная зона Линии Николаева; ХТ – хр. Терскей; КВ – Кочкорская впадина; ХК – хребет Кунгей; ЧВ – Чуйская впадина; ХД – хр. Джетыжол; ИВ – Илийская впадина.

ротным, т.е. вдоль оси  $u$ . Наиболее компактной формой представления пространственно-частотной структуры компонент передаточных операторов ЭМ поля являются их псевдоразрезы – карты с профилем наблюдения по горизонтали и параметром глубинности (логарифмом периода) по верти-

кали. Начало координат на профиле НАРЫН положено на границе Киргизии и Китая, профильные координаты увеличиваются с юга на север.

На рис. 3 представлены псевдоразрезы кажущихся сопротивлений и фаз импеданса. Здесь же на верхней панели показан рельеф Центрального

Тянь-Шаня и прилегающих участков Казахской и Таримской плит, а также осадочные структуры межгорных впадин. Показанные псевдоразрезы отражают широкий спектр аномалий электропроводности на различных структурных этажах. Простейшие оценки глубинности зондирований по скин-глубине для эффективных кажущихся сопротивлений по ГМТ ансамблю (рис. 3г) показывают, что доступные для изучения геоэлектрические неоднородности лежат в интервале от первых сотен метров (скин-глубина для сопротивлений 10–100 Ом м на периоде 0.1 с) до первых сотен км (периоды свыше 7000–10000 с).

Ряд ярких аномалий может быть соотнесен с известными особенностями строения Центрального Тянь-Шаня. Аномалии на псевдоразрезах кажущихся сопротивлений тесно связаны с локализацией межгорных впадин и крупных осадочных бассейнов. Псевдоразрезы северной (поперечной  $Ro_{Hp}$ ) и восточной (продольной  $Ro_{Ep}$ ) компонент могут быть схематично разделены на шесть областей по среднему уровню сопротивлений. На рис. 3а ( $Ro_{Ep}$  для МТ ансамбля) выделяются: южная низкоомная область (до пикета –50 км), отвечающая выклинивающейся к северу толще осадков Таримского бассейна; высокоомная область хребта Кокшаал; самая низкоомная область Аксайской, Атбашинской и Нарынской впадин с локальными повышениями сопротивлений под разделяющими их хребтами Атбаша и Нарын; высокоомная область хр. Терской с прилегающей Кочкоркской впадиной; наиболее высокоомная на профиле область хр. Киргизский (Кунгей) и хр. Джетыжол с их предгорьями; наконец, северная область пониженных сопротивлений (от пикета 430 км), обусловленных нарастанием к северу Илийской долины мощности осадочного чехла Казахской плиты. Частотная зависимость кажущихся сопротивлений, отражающая изменение удельных сопротивлений с глубиной, отчетлива только в пределах Казахской плиты: здесь низкие сопротивления осадочных пород чехла сменяются с ростом периода повышенными значениями, отвечающими фундаменту, и далее – пониженными, характерными для проводящей верхней мантии. На остальных участках профиля эта зависимость маскируется сильными статическими искажениями.

Фазовые компоненты импеданса дают более содержательную информацию об изменении удельного сопротивления с глубиной. Продольные фазы представляются при профильной интерпретации самыми информативными в отношении глубинных структур. На рис. 3б, 3в приведены псевдоразрезы продольных фаз для МТ и ГМТ ансамблей, соответственно. На них наиболее отчетливо выделяется отрицательная аномалия на периодах 2–500 с (с экстремумом, достигающим  $-70^\circ$  в окрестности периода 100 с), что по оценкам эффективной скин-глубины (рис. 3г) указывает на присутствие в разрезе проводящей структуры на глубинах первых де-

сятков км. Наиболее ярко эта аномалия представлена в МТ диапазоне (рис. 3в) – здесь можно проследить смещение ее экстремума с периодов 2–5 с до 100–300 с (погружение проводника на север в области сочленения Тарима и Южного Тянь-Шаня?). На коротких периодах (первые секунды) заметно влияние осадочных впадин, выраженное сменой отрицательных экстремумов на положительные. Наиболее глубокие впадины искажают фазовый отклик корового проводника (например, Нарынская, Чуйская и Илийская в окрестностях пикетов 130, 260 и 350 км, соответственно).

На данном этапе анализа импедансных откликов целесообразно рассмотреть псевдоразрезы эффективного импеданса – простейшего тензорного инварианта, получаемого как корень из определителя. На псевдоразрезах эффективной фазы отклик проводящего слоя наиболее отчетлив и устойчив. В целом, во всех фазовых компонентах на периодах первых сотен секунд наблюдается отрицательная аномалия, связанная с проводящим коровым слоем. Эта аномалия прослеживается на большей части профиля, затухая на Казахской плите. Тенденция погружения корового проводника от Тарима на север отражается в конфигурации примыкающих положительных фазовых аномалий, обусловленных структурой верхне- и нижнекоровых изоляторов. Увеличенная электропроводность верхней мантии отражается отрицательными фазовыми аномалиями на периодах 1000–6000 с (рис. 3в). Существенное увеличение глубины проникновения ЭМ поля в пределах Казахской плиты (рис. 3г) в силу высокого поперечного сопротивления ее литосферы позволяет на севере профиля наблюдать верхнемантийные эффекты уже на периодах нескольких сотен секунд.

Псевдоразрез действительной части типпера ( $Re_{W_{zx}}$ ), представленный для ансамбля ГМТ на рис. 4, хорошо отражает латеральные изменения сопротивления разреза. Наиболее яркие эффекты чередования плохо проводящих горных массивов и низкоомных разломных зон (Южно-Тяньшаньский разлом, п. 602–601; Атбаша-Иньельчекский, п. 403–670; Линия Николаева, п. 661–405–656; Северо-Тяньшаньский, п. 409–410), усугубленных влиянием осадков прилегающих межгорных впадин. Наиболее сильный и глубинный контраст отмечается в зоне Линии Николаева (п. 405–656). Здесь аномалия наблюдается на периодах до 1500 с, что позволяет предположить продолжение этой разломной зоны до глубины нескольких десятков км. Псевдоразрез мнимой части типпера (рис. 4б) более отчетливо отражает изменения сопротивления с глубиной.

Псевдоразрезы северной ( $M_{xz}$ ) компоненты горизонтального МВ отклика (рис. 4в, 4г) характеризуется присутствием яркой амплитудно-фазовой аномалии в районе Линии Николаева (п. 405–657).

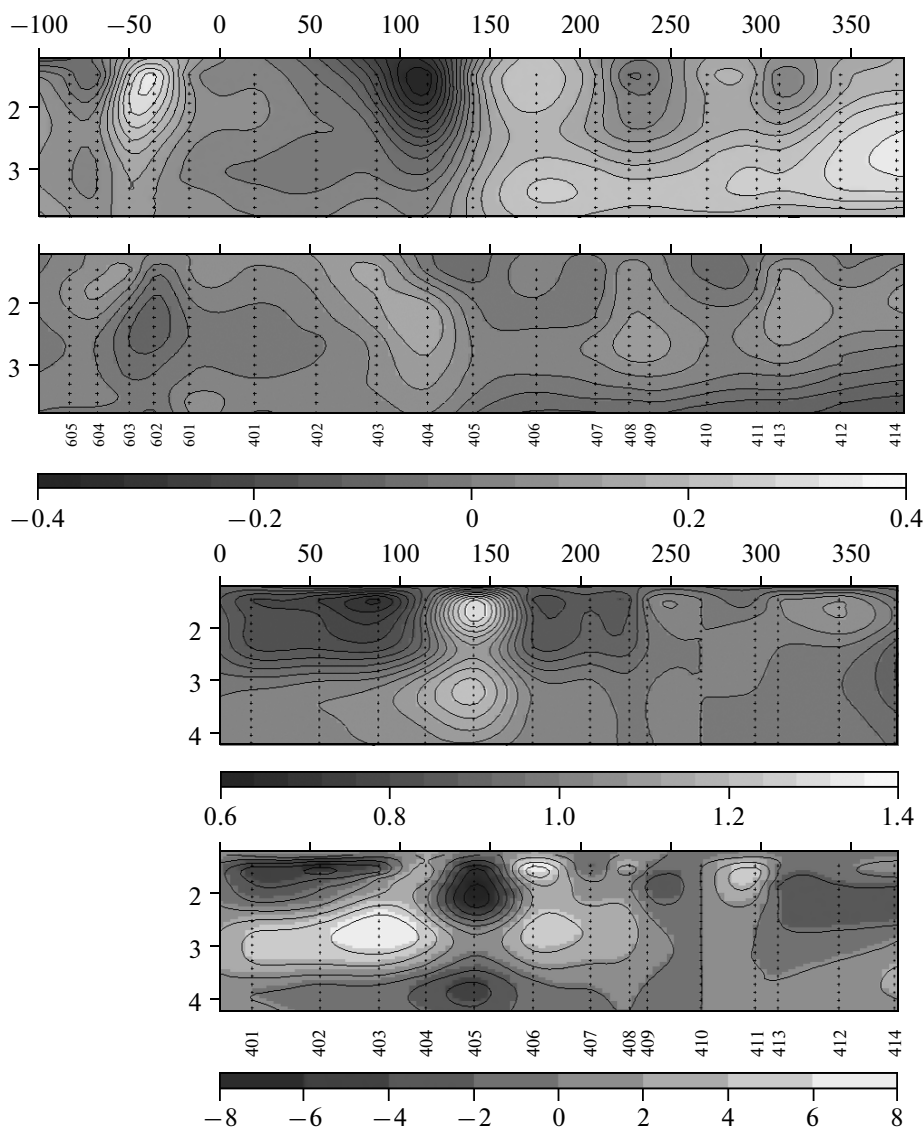


Рис. 4. Псевдоразрезы компонент МВ откликов для длиннопериодных зондирований LIMS, сверху вниз:  $\text{Re}_W_{zx}$ ,  $\text{Im}_W_{zx}$ ,  $\text{Mod}_M_{xx}$ ,  $\text{Arg}_M_{xx}$ .

Аномалия распадается на два экстремума (на периодах 50 и 2000 с для амплитуды, 100 и 7000 с для фазы), что существенно дополняет информацию о структуре этой аномальной зоны, поставляемую данными типпера и импедансных фаз. Менее отчетливы на редкой сети пунктов наблюдения фазовые аномалии в п. 409 (Северо-Тяньшаньский разлом?), а также в п. 411 и 413 (экстремум на периодах 50–150 с).

### 3. ИНВАРИАНТНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ОПЕРАТОРОВ

При интерпретации построенных на профиле НАРЫН сводных массивов МТ/МВ откликов самый первый этап заключается в анализе их инвариантных параметров с целью извлечения ин-

формации о размерности и простирании изучаемых геоэлектрических структур. На основе этой информации принимается принципиальное решение о возможности или невозможности 2D инверсии имеющихся данных и, в случае положительного решения, по результатам инвариантного анализа формируется двумерная интерпретационная модель [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Определяются и параметризуются области приоритетного поиска аномалий электропроводности, выбирается модель вмещающей среды, извлекаются компоненты данных, отвечающие принятой 2D модели; выбирается алгоритм инверсии и тактика его применения. Наконец, оцениваются искажающие 3D эффекты в инвертируемых данных, их влияние на результаты профильной инверсии и возможности его устранения. В значительной степени осо-



бенности процедуры построения интерпретационной модели определяются алгоритмом инверсии данных. Для алгоритма INV2D, применяемого группой NARYN, эти особенности достаточно подробно представлены и проиллюстрированы в работах [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007a].

Для определения размерности и простирания геоэлектрических структур Центрального Тянь-Шаня исследовались различные схемы инвариантного анализа полученных передаточных операторов ЭМ поля. Однако в центре нашего внимания находились схемы, в наибольшей степени устойчивые к приповерхностным гальваническим (статическим) искажениям: СВВ-декомпозиция фазового тензора импеданса [Caldwell et al., 2004], декомпозиция Свифта горизонтального МВ оператора [Varentsov, 2007b], а также оценки размерности и простирания структур по данным типпера [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Для контраста рассматривались результаты декомпозиции импеданса в традиционных схемах Свифта и Эггерса, подверженных существенным статическим искажениям. Детали большинства упомянутых декомпозиций представлены в монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

### Определение размерности геоэлектрических структур

Параметр магнитотеллурической неоднородности  $N$  является простейшей мерой 2D/3D неоднородности среды и может быть получен в схемах декомпозиции импеданса  $\mathbf{Z}$ , поставляющих его главные (в определенном смысле экстремальные) скалярные значения  $Z_{\max}$  и  $Z_{\min}$ :  $N = |Z_{\max} - Z_{\min}| / |Z_{\max} + Z_{\min}|$ . Будем, следуя [Бердичевский, Дмитриев, 2009], рассматривать этот параметр в рамках декомпозиции Эггерса, в которой главные значения приобретают смысл собственных. Среда считается квазиодномерной при малом  $N$  ( $< 0.2-0.3$ ), однако эта оценка подвержена статическим искажениям.

Простейшим параметром – индикатором трехмерности среды считается параметр асимметрии  $Skew_S$  в системе декомпозиции Свифта:  $Skew_S = |Z_{xx} + Z_{yy}| / |Z_{xy} - Z_{yx}|$ . Существенная трехмерность среды проявляется при величине этого параметра  $> 0.3$ , но эта оценка также подвержена статическим искажениям.

Элегантный путь получения статически неискаженных оценок асимметрии импеданса лежит на пути анализа фазового тензора импеданса:  $\Phi = [\text{Re}\mathbf{Z}]^{-1} \cdot [\text{Im}\mathbf{Z}]$ . По определению [Caldwell et al., 2004] этот оператор не зависит от частотной независимой действительной матрицы гальванических искажений. В предложенной в цитированной статье СВВ-декомпозиции фазового тензора вводится параметр его угловой асимметрии  $Skew_{SBB} = \frac{1}{2} \arctg((\Phi_{xy} - \Phi_{yx}) / (\Phi_{xx} + \Phi_{yy}))$ ,  $\Phi = \{\Phi_{ij}, i, j =$

$x, y\}$ , который функционально связан [Caldwell et al., 2004; Бердичевский, Дмитриев, 2009] с безразмерным параметром асимметрии в декомпозиции

Бара:  $Skew_B = \sqrt{|\text{Im}(Z_{xy}Z_{yy}^* + Z_{xx}Z_{yx}^*)| / |Z_{xy} - Z_{yx}|}$ . Этот последний параметр, общий для схем Бара и СВВ, представляется значительно более прагматичным средством диагностики трехмерности глубинных откликов в условиях статических искажений. Порог их выявления составляет  $0.2-0.3$ , что сопоставимо с порогом параметра  $Skew_S$ .

В дополнение к импедансным оценкам трехмерности среды воспользуемся и их МВ аналогами. В соответствии с природой МВ данных эти оценки свободны от статических искажений в диапазоне длиннопериодных исследований. Для горизонтального МВ оператора  $\mathbf{M}$  воспользуемся подходом Свифта [Varentsov, EMTESZ-Pomerania WG, 2005; Varentsov, 2007b] и определим параметр асимметрии:  $Skew_M = |M_{xy} - M_{yx}| / |M_{xx} + M_{yy}|$ . Оценка  $Skew_M$  указывает на 3D эффекты при заметно меньшем пороге (порядка 0.1).

Трехмерность типпера проявляется в несоосности действительных  $\mathbf{W}_{\text{Re}}$  и мнимых  $\mathbf{W}_{\text{Im}}$  векторов индукции и, следуя [Бердичевский, Дмитриев, 2009], может быть оценена параметром:  $Skew_W^{BD} = (\text{Re}W_{zx}\text{Im}W_{zy} - \text{Re}W_{zy}\text{Im}W_{zx}) / (\text{Re}W_{zx}\text{Im}W_{zx} + \text{Re}W_{zy}\text{Im}W_{zy})$ , который, однако, становится неустойчивым при малых длинах векторов индукции. Для получения более устойчивой оценки асимметрии типпера используем оценку направления  $\theta_{\max}$  вектора максимальной индукции  $\mathbf{W}_{\max}$ , определяемого максимизацией амплитуд компонент типпера в процессе вращения координатной системы, в которой он представлен:  $\theta_{\max} = \frac{1}{2} \arctg(2\text{Re}(W_{zx}W_{zy}^*) / (|W_{zx}|^2 - |W_{zy}|^2)) + n\frac{\pi}{2}$ ,  $n = 0, 1, 2, 3$  с выбором надлежащего  $n$ . Вектор индукции  $\mathbf{W}_{\max}$  близок к векторной сумме  $\mathbf{W}_{\text{Re}} + \mathbf{W}_{\text{Im}}$  и представляется наиболее устойчивым инвариантом для малых типперов. Определим длины перпендикуляров  $p_{\text{Re}}$  и  $p_{\text{Im}}$ , построенных из вершин векторов  $\mathbf{W}_{\text{Re}}$  и  $\mathbf{W}_{\text{Im}}$  на направление максимальной индукции  $\theta_{\max}$ :  $p_{\text{Re}} = W_{\text{Re}} |\sin(\theta_{\text{Re}} - \theta_{\max})|$ ,  $p_{\text{Im}} = W_{\text{Im}} |\sin(\theta_{\text{Im}} - \theta_{\max})|$  здесь  $W_{\text{Re}}$  и  $W_{\text{Im}}$  – длины, а  $\theta_{\text{Re}}$  и  $\theta_{\text{Im}}$  – азимуты соответствующих векторов. Параметр асимметрии представляется максимумом этих длин:  $Skew_W = \max(p_{\text{Re}}, p_{\text{Im}})$  и по построению равен нулю в 1D и 2D средах. На первый взгляд, напрашивается нормировка этой оценки на величину  $W_{\max}$ , но она нецелесообразна по соображениям устойчивости. Параметр асимметрии типпера  $Skew_W$  указывает на трехмерность с порогом порядка 0.3.

Распределение параметра неоднородности  $N$  вдоль профиля НАРЫН для ансамбля ГМТ пока-

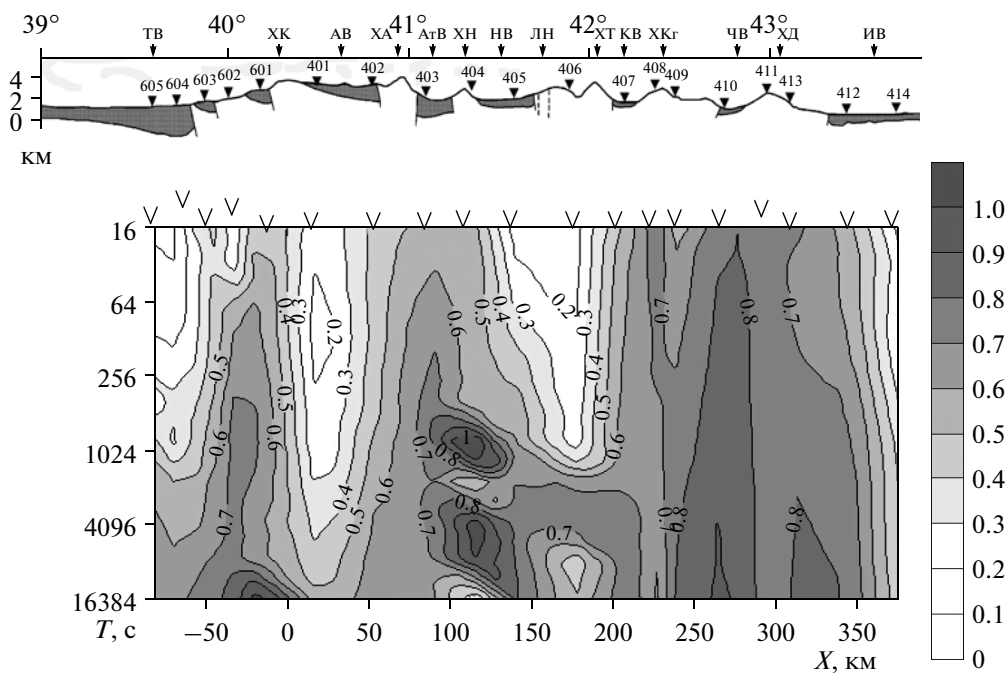


Рис. 5. Псевдоразрез импедансного параметра неоднородности среды  $N$  (в отн. ед.) для ансамбля зондирований ГМТ.

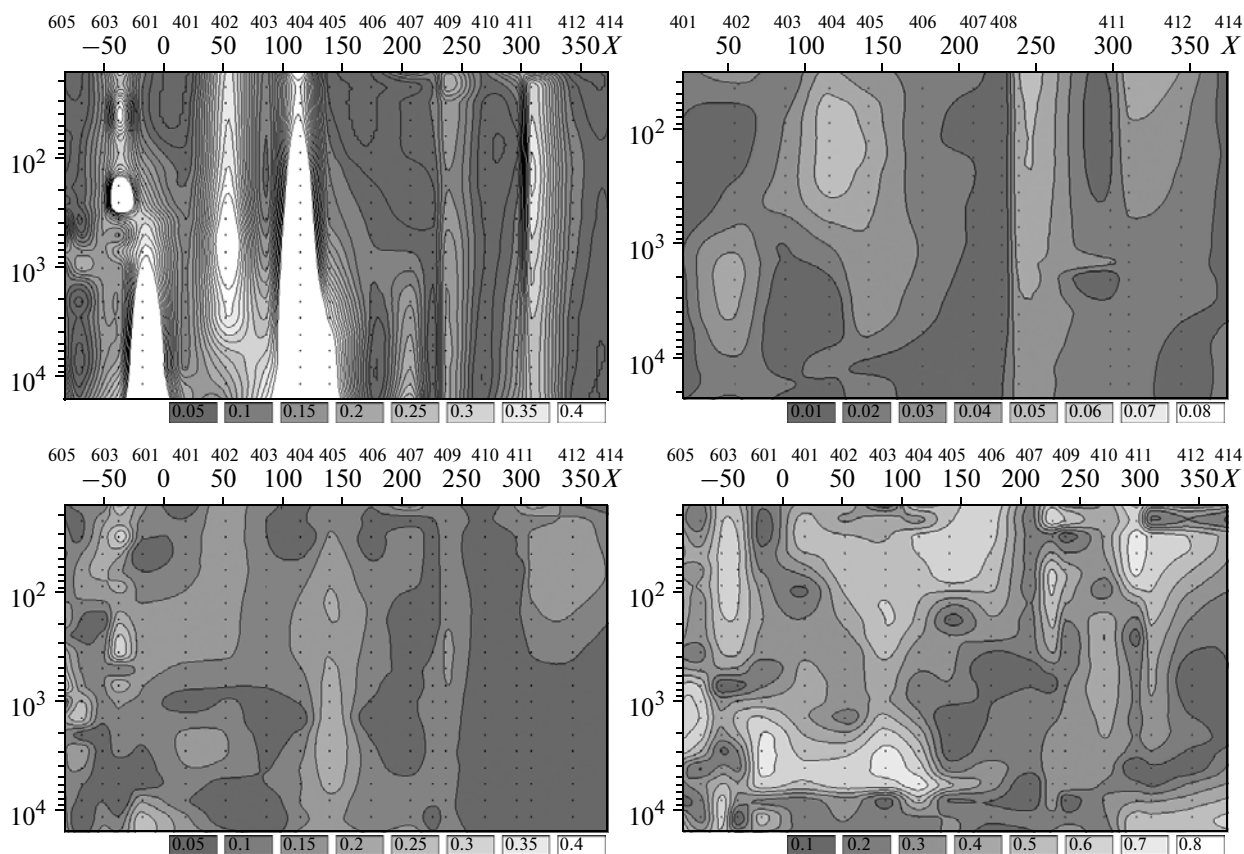
зано на рис. 5. Относительной однородностью (квазиоднородностью) верхней части разреза характеризуются области пологих осадочных впадин (Таримская, Аксайская, Нарынская и Илийская, где  $N < 0.2$ ). В других областях  $N > 0.5$ , что свидетельствует о существенной 2D/3D неоднородности разреза, либо статических искажениях.

Псевдоразрезы различных оценок асимметрии ( $Skew_S$ ,  $Skew_B$ ,  $Skew_M$  и  $Skew_W$ ) для ансамбля данных ГМТ сопоставлены на рис. 6. Импедансная оценка Свифта отмечает на значительной части профиля НАРЫН (особенно для периодов  $> 500$  с) сильные 3D искажения в широком диапазоне периодов, маркируемые значениями  $Skew_S > 0.3$ . В большей части таких областей, однако, статически неискаженная фазовая оценка  $Skew_B < 0.2$  и, соответственно, природа таких эффектов связана с приповерхностными искажениями. Трехмерность по данным  $Skew_B$  проявляется в широком диапазоне периодов лишь в п. 405 (зона Линии Николаева) и, в меньшей степени, в примыкающем п. 404, а также в п. 409 (Северо-Тяньшаньский разлом). Более локально (и лишь на периодах до 1000 с) трехмерность отмечается также на южной части профиля (п. 602–603, 605 и 401–402) и на севере (п. 412–413). Следует отметить, что трехмерность в таримских пунктах отчасти может объясняться повышенным уровнем погрешностей оценивания дополнительных импедансов по программе Чэйва (рис. 2а), поскольку новая многоточечная обработка данных здесь не проводилась.

Импедансные оценки асимметрии по данным ансамбля МТ подтверждают (по перекрывающимся

интервалам периодов) выводы, сделанные по ансамблю ГМТ в п. 401–402, 404–405, 412–413, а также выявляют локальные области трехмерности на коротких периодах в п. 410–411 (Чуйская впадина) и п. 435, 436 и 440 (на периодах 1–20 с).

Результаты анализа размерности геоэлектрических структур по МВ данным выглядят заметно проще и, в целом, хорошо соотносятся с аналогичной информацией, извлеченной из импедансных данных. Самым простым выглядит псевдоразрез  $Skew_M$  – на нем есть лишь признаки слабой трехмерности (на уровне  $Skew_M = 0.06–0.08$ ) в п. 402, 404–405, 409 и 412–413. На псевдоразрезе асимметрии типпера  $Skew_W$  в длиннопериодном диапазоне трехмерные эффекты отсутствуют на Казахской плите – здесь отмечаются лишь локальные эффекты на периодах до 1000 с в п. 410–412. В центральной части профиля отмечается протяженная область 3D эффектов в п. 401–406 до периодов 100–200 с, а также в п. 601–404 на более длинных периодах 2000–7000 с. Эти эффекты, однако, не столь сильны в данных фазового тензора (см. соответствующие участки псевдоразреза  $Skew_B$ ). Повидимому, здесь проявляется повышенная чувствительность типпера к влиянию проводящих структур, лежащих в стороне от профиля: существенному увеличению продольной проводимости осадков Нарынской впадины в западном направлении (рис. 8), а также возможной трехмерности структуры электропроводности в зоне пересечения Таласо-Ферганского и Южно-Тяньшаньского разломов (рис. 1).



**Рис. 6.** Псевдоразрезы распределения параметров асимметрии импедансного и фазового тензора (панели слева, сверху вниз:  $Skew_S$ ,  $Skew_B$ ), горизонтального магнитного тензора и типпера (панели справа, сверху вниз:  $Skew_M$  и  $Skew_W$ ) для ГМТ ансамбля.

Подводя итог анализу размерности геоэлектрической среды по МТ и МВ данным, можно сделать вывод о существенной двумерности корово-мантинного разреза, наличии многочисленных приповерхностных 3D эффектов (как статических, так и более сложных, проявляющихся в импедансных фазах и данных типпера) и, наконец, о присутствии отдельных локальных 3D эффектов в коре и верхней мантии (прежде всего, в окрестностях п. 405 и 601–403).

### Определение направления простирания геоэлектрических структур

Продолжим анализ инвариантных параметров передаточных операторов ЭМ поля в схемах декомпозиции, рассмотренных в предшествующем разделе, обращая внимание теперь на оценки главных направлений операторов, указывающих в квазидвумерном случае на простирание доминирующих геоэлектрических структур. Сосредоточимся на исследовании статически неискаженных оценок, определяемых по МВ данным и фазовому тензору импеданса. Для контраста рассмотрим статически

искаженные главные направления импеданса в декомпозиции Свифта.

Главные направления импеданса в схеме Свифта ортогональны и определяются минимизацией амплитуд диагональных элементов в ходе вращения системы координат представления тензора. В схеме Свифта для горизонтального МВ оператора отличен лишь критерий минимизации амплитуд внедиагональных элементов. Кроме того, эта схема может применяться и к аномальному оператору  $\mathbf{M}_a = \mathbf{M} - \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I}$  – единичный оператор. Главные направления фазового тензора в схеме СВВ строятся методом сингулярного разложения [Caldwell et al., 2004; Бердичевский, Дмитриев, 2009] и также ортогональны. В двумерной среде одно из главных направлений определяет направление ее простирания.

Визуализацию главных направлений и главных амплитудных/фазовых значений импеданса и горизонтального МВ отклика для профиля зондирования удобно организовать в виде матричных диаграмм со строками, отвечающими пунктам, и столбцами, отвечающими периодам наблюдения. Каждый элемент таких диаграмм для схем декомпозиции с ортогональными главными направлениями

представляется крестом, ориентированным вдоль главных направлений с длинами лучей креста, определяемыми соответствующими главными значениями — амплитудами или абсолютными значениями фаз. На построенные кресты для большей наглядности могут быть натянуты эллипсы.

Наиболее просто выглядят амплитудные диаграммы главных направления аномального МВ оператора  $M_a$  при выборе базовой точки в квазиодномерном нормальном разрезе вне существенных аномалий электропроводности: эллипсы стягиваются в точку в пунктах наблюдения с нормальной геоэлектрической структурой; приобретают круговую форму в квазиодномерных областях, отличных от нормального разреза; сильно вытягиваются над квазидвумерными проводящими структурами и сжимаются в отрезок над двумерными; наконец, умеренно вытянутые эллипсы указывают на трехмерные структуры. Для диаграмм горизонтального МВ отклика в ряде случаев целесообразно повернуть кресты/эллипсы на  $90^\circ$  так, чтобы длинные оси наглядно указывали на простирание проводящих структур.

Интерпретация аналогичных диаграмм для импедансных амплитуд затруднена их сильным затуханием с периодом и присутствием статических искажений, она несколько проще для импедансных фаз и наиболее продуктивна для фазового тензора. На матричных диаграммах индукционных векторов (в конвенции Визе) направления простирания проводящих структур перпендикулярны направлению действительных векторов с большой длиной.

Другой важной формой визуализации закономерностей распределения главных направлений для серии пунктов и периодов наблюдения являются секторные гистограммы, статистически указывающие на доминанты простирания и характеризующие их устойчивость. Большой опыт построения и визуализации главных направлений МТ/МВ откликов накоплен при анализе данных массива синхронных зондирований EMTESZ-Pomerania и представлен в работах [Varentsov et al., 2005; Varentsov, EMTESZ-Pomerania WG, 2005; Ernst et al., 2008].

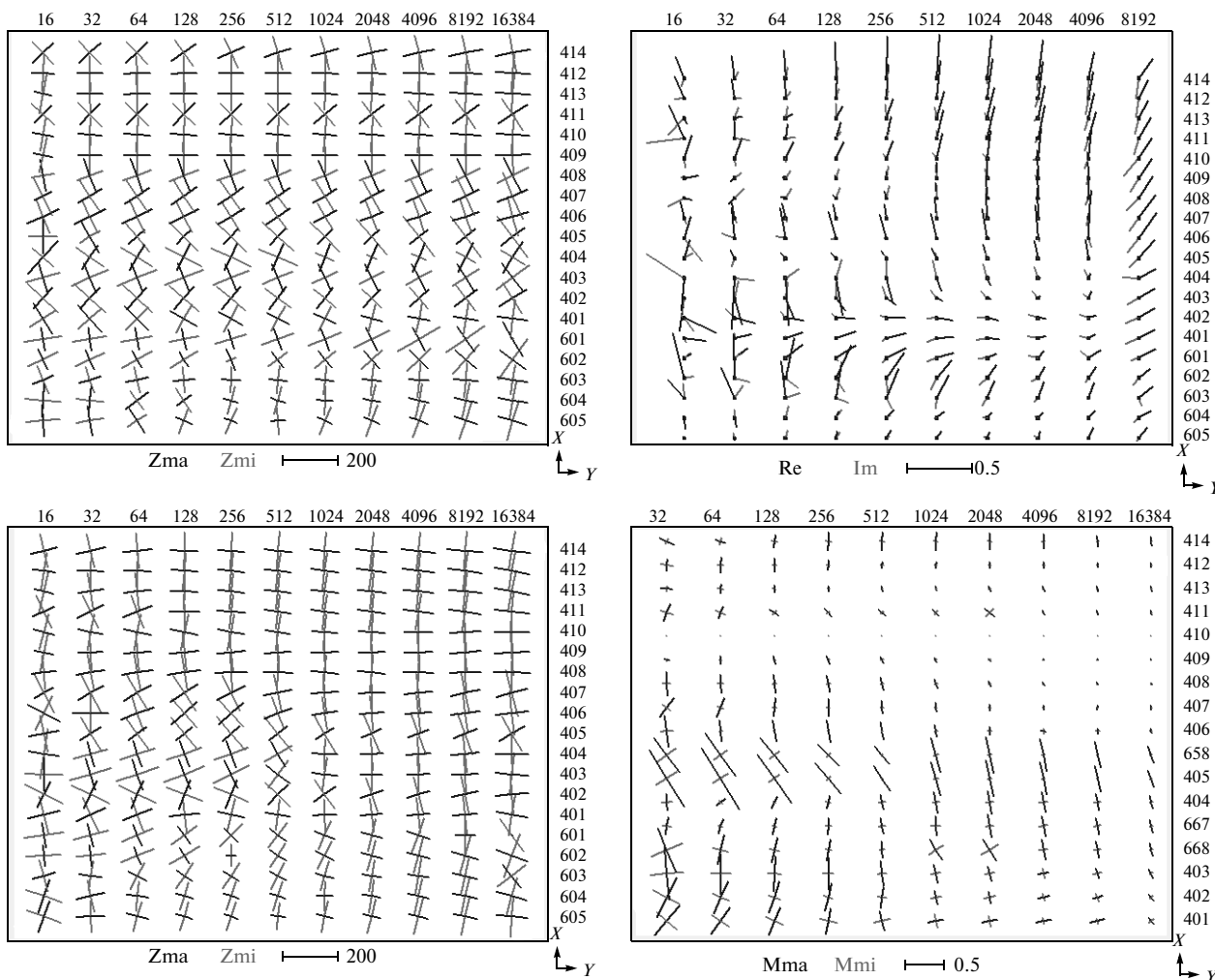
На рис. 7 вдоль профиля НАРЫН для ансамбля данных ГМТ сопоставляются матричные крестовые диаграммы главных направлений импеданса (схема Свифта), фазового тензора импеданса (схема СВВ) и аномального горизонтального МВ отклика с диаграммой индукционных векторов. Наиболее закономерную структуру демонстрируют диаграммы для фазового тензора. Длиннопериодные данные ( $>1000$  с) характеризуется весьма устойчивой ориентацией главных направлений вдоль и поперек профиля. На Казахской плите такая ориентация прослеживается уже с периода 100 с. Эта закономерность хорошо согласуется с широтным простиранием структур Центрального Тянь-Шаня. Единичные исключения в длинопериодном

диапазоне наблюдаются в п. 405 с существенной трехмерностью (рис. 6) и в п. 402 (до периода 4000 с). В пределах таримского участка профиля наблюдается закономерный поворот длиннопериодных диаграмм примерно на  $20^\circ$  к востоку. На центральном и таримском участках на периодах 16–512 с в главных направлениях и фазах проявляются несколько локальных аномалий коровой глубинности. Диаграммы импедансных главных направлений и фаз Свифта также проявляют отмеченные закономерности, но с большим разбросом и большим числом явных искажений.

Главные направления и амплитуды горизонтального МВ оператора  $M_a$  (определенного относительно базы в п. 410) демонстрируют существенную двумерность этого отклика с субширотной оценкой простирания на большей части профиля в длинопериодном диапазоне ( $>1000$  с). На северной части профиля (в п. 406–412) в этом диапазоне наблюдается квазиодномерная структура отклика (что подтверждает разумность выбора базы в п. 410), однако на периодах до 1000 с и здесь отмечается двумерная структура субширотного простирания. Наиболее яркие длиннопериодные 2D аномалии наблюдаются в центральной зоне в п. 658–668, причем в п. 658 и 405 на более коротких периодах аномалии усиливаются, но меняют ориентацию и становятся трехмерными. На южнотяньшаньском отрезке профиля (п. 401–403) умеренная двумерность субширотного простирания прослеживается на периодах сотен секунд. Для больших периодов максимальные лучи крестов становятся короче и разворачиваются поперек профиля.

Положительные аномалии максимальной амплитуды горизонтального МВ отклика располагаются непосредственно над областями повышенной электропроводности. В осевых частях таких областей действительные векторы индукции, напротив, имеют минимальную (близкую к нулю) длину и далее по профилю, уже за пределами этих областей, достигают максимальной длины, ориентируясь “от источника”. Совместный анализ диаграмм горизонтальных МВ откликов и индукционных векторов подтверждает, что наиболее яркая аномалия электропроводности расположена между п. 658–668 на глубинах, отвечающих периодам от десятков до 4000 с. При этом, северная граница данной зоны представляется весьма отчетливой между п. 658 и 406, в то время как ее южная граница (в пределах п. 401–403) определяется плохо в связи с разным проявлением аномальных эффектов на разных периодах и вероятной интерференцией эффектов различной глубинности. Эти же данные указывают на меньших периодах на аномалию электропроводности на самом южном окончании профиля.

В области Южного Тянь-Шаня и его сочленения с Таримом выявляется область значительных 3D искажений данных типпера на периодах 2000–7000 с.

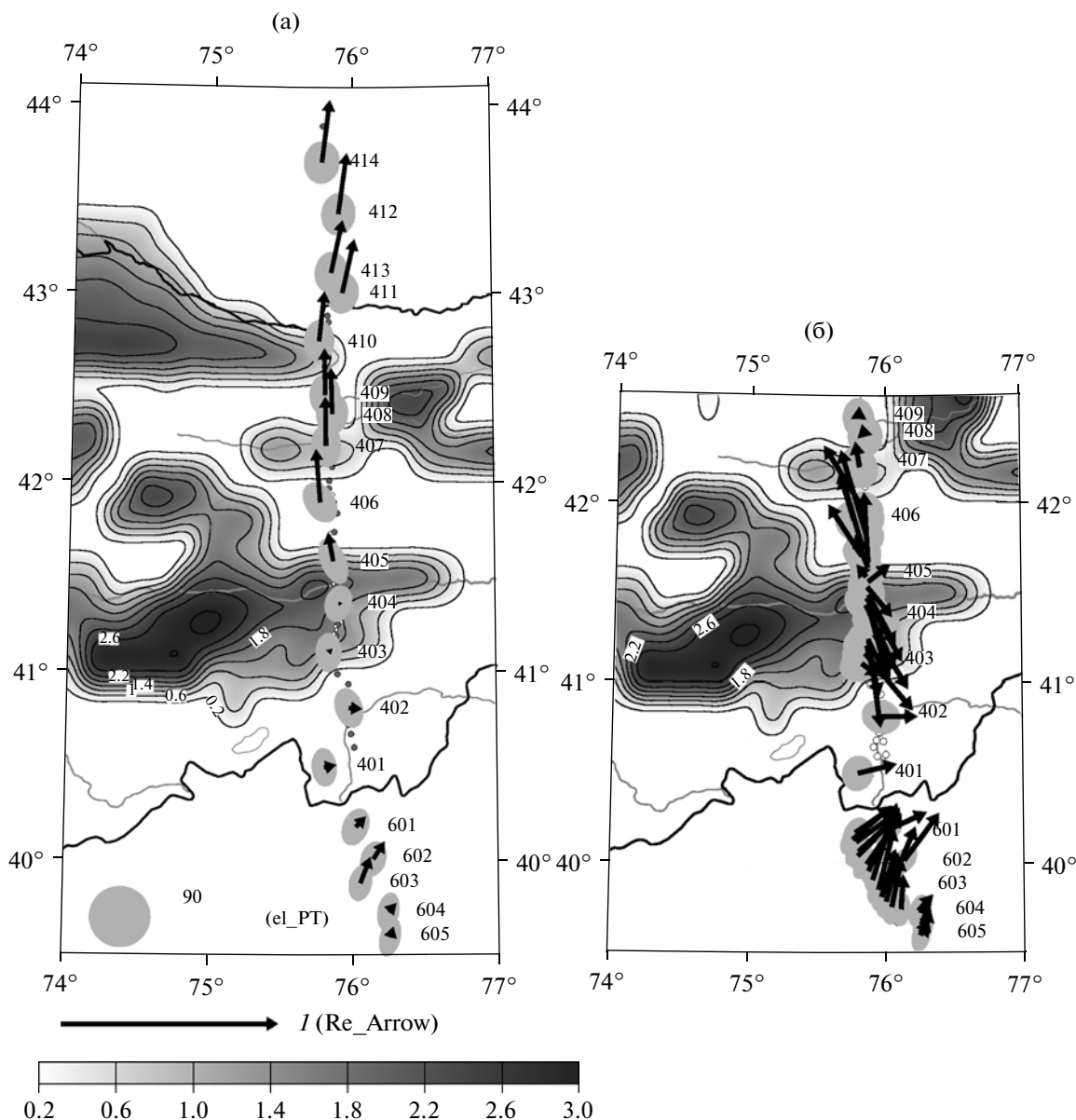


**Рис. 7.** Диаграммы главных значений и направлений МТ/МВ откликов для ансамбля зондирований ГМТ: слева сверху вниз — импедансные фазовые отклики в схемах Свифта и СВВ; справа сверху — индукционные векторы (Re и Im); справа внизу — амплитудные отклики горизонтального МВ оператора  $M_a$ ; по горизонтальным осям панелей — периоды (с), по вертикальным — пункты зондирования с юга (внизу) на север (вверху); система координат зондирований показана в нижнем левом углу панелей.

Из всех рассмотренных откликов индукционные векторы наиболее ярко реагируют на расположенные к западу от профиля трехмерные осадочные структуры (рис. 8) и разворачиваются в противоположном восточном направлении. Далее к югу индукционные векторы начинают отражать влияние структур Тарима и приобретают устойчивую С-ССВ ориентацию, как и главные оси фазового тензора. Таким образом, можно заключить, что на геотраверсе НАРЫН присутствует участок достаточно сильных 3D искажений типпера, занимающий, однако, не более десятой части профиля (рис. 1). Индукционные векторы в диапазоне 16–7500 с на всем профиле, за исключением указанного участка, подтверждают, наряду с данными фазового тензора импеданса и аномального горизонтального МВ отклика, субширотное простираение основных геоэлектрических структур Центрального Тянь-Шаня. На

периодах же более 2 часов в них проявляется сильный эффект неоднородности источника (рис. 7), маскирующий отклики глубинных геоэлектрических неоднородностей.

Анализ площадных распределений главных направлений ЭМ откликов на ряде характерных периодов делает наглядным тот факт, что их поведение в пределах Центрального Тянь-Шаня довольно четко контролируется границами геотектонических провинций (рис. 8). Регион каледонид Северного Тянь-Шаня (п. 414–406) характеризуется субмеридиональным направлением действительных векторов индукции, минимальных главных осей фазового и максимальных главных осей аномального горизонтального МВ тензора. Герцинский Срединный Тянь-Шань (нарынский отрезок, п. 405–403) отличается заметными отклонениями рассматриваемых главных направлений к западу (после инверсии

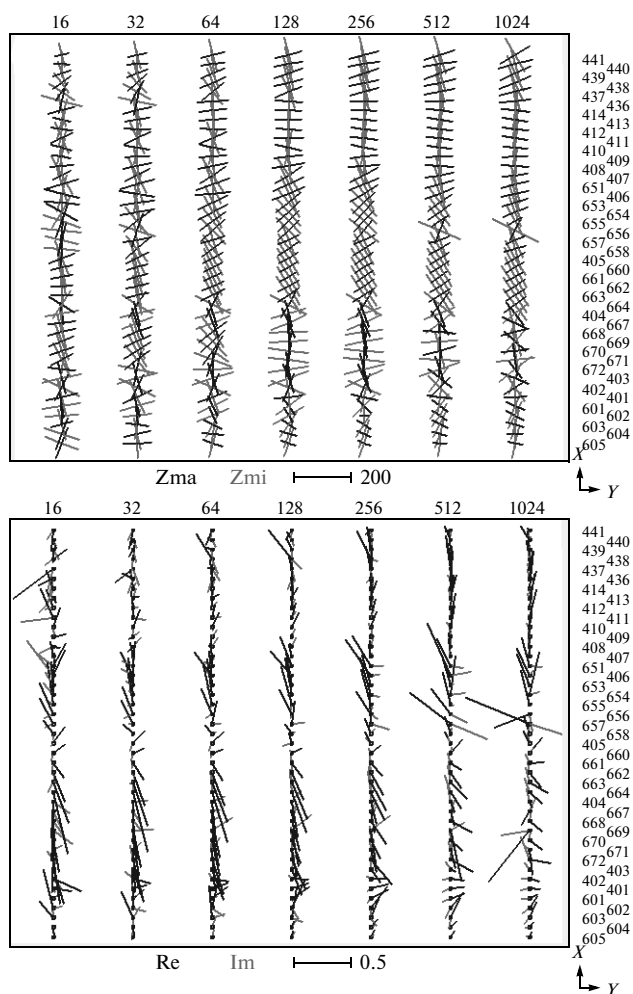


**Рис. 8.** Эллипсы экстремальных значений фазового тензора импеданса и векторы индукции (Re) для периодов 2048 с – (а) на всем протяжении профиля и 256 с – (б) в зоне Линии Николаева, на фоне карты суммарной продольной проводимости осадочного чехла Центрального Тянь-Шаня [Мельникова, 1991]; масштаб векторов индукции задан стрелкой единичной длины; масштаб значений фазового тензора – окружностью радиуса 90°; интегральная проводимость дана в См (в lg-масштабе).

между п. 404 и 403 индукционные векторы на юге данного отрезка отклоняются на восток). Наиболее устойчивы здесь главные направления фазового тензора, теряющие субмеридиональную и субширотную ориентацию лишь в п. 405.

Рассмотрение главных направлений на фоне карты интегральной проводимости осадочного чехла Киргизского Тянь-Шаня [Мельникова, 1991] проясняет определенные аспекты их аномального поведения, в частности, на таком важном отрезке профиля, как нарынский участок. Рис. 8 показыва-

ет, что для данных ансамбля **МТ** локальные аномалии в поведении главных направлений фазового тензора и векторов индукции в значительной мере обусловлены распределением осадков в двух смежных межгорных впадинах: более глубокой Нарынской и меньшей по размерам Атбашинской, разделенных узким горным хребтом (рис. 1). Впадины пересекают профиль НАРЫН в субширотном направлении, однако изолинии интегральной проводимости в расположенной западнее области наиболее развитого осадочного чехла протягиваются в на-



**Рис. 9.** Диаграммы главных значений и направлений фазовых импедансных откликов (схема СВВ, сверху) и индукционные векторы ( $Re$  и  $Im$ , внизу) для  $MT$  ансамбля; оси — как на рис. 7.

правлении СВВ, ортогональном к направлению векторов индукции на данном участке и очень близкому к максимальному амплитудному направлению горизонтального  $MV$  тензора в окрестности п. 405.

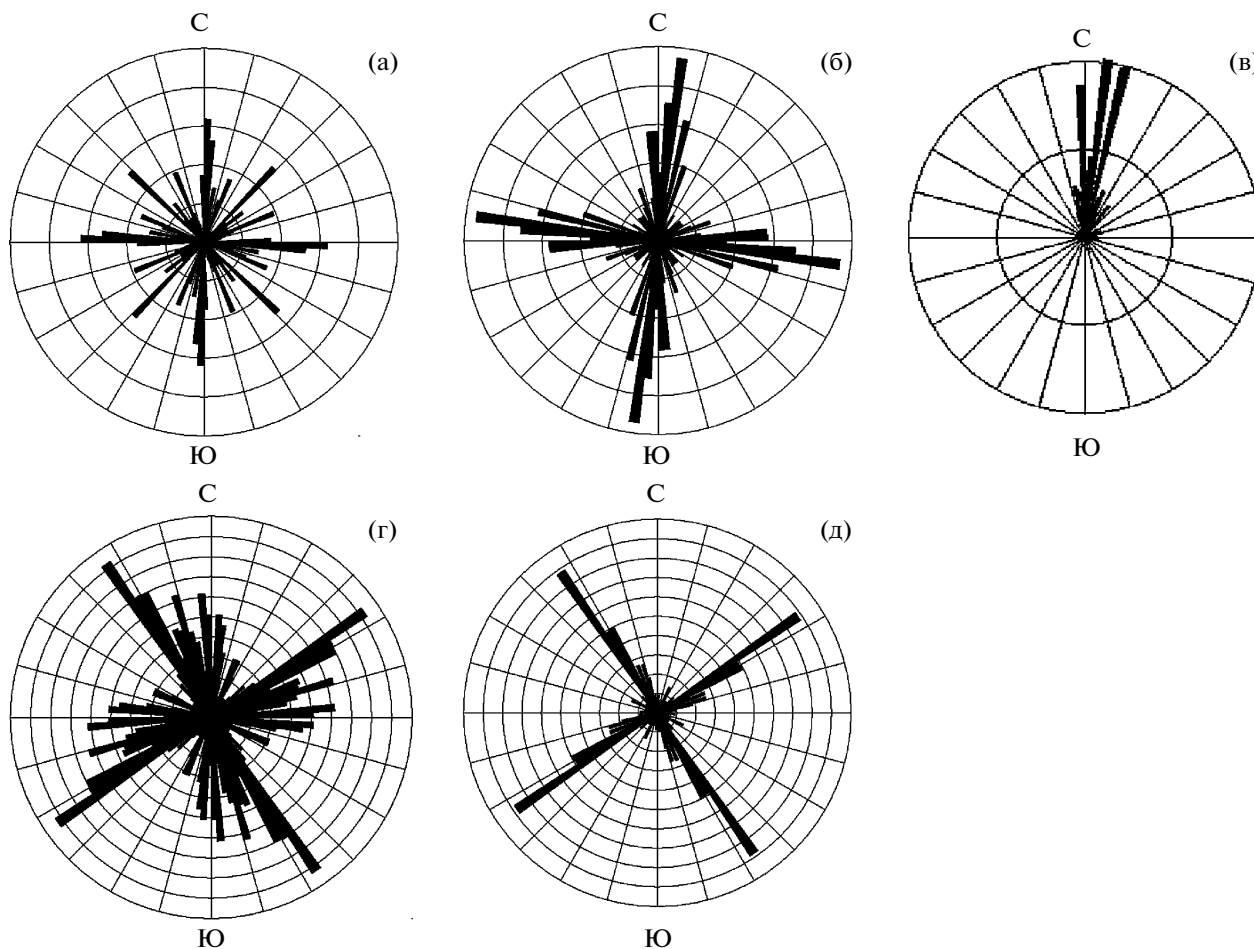
Анализ данных ансамбля  $MT$  подтверждает с существенной детализацией выводы, сделанные по ансамблю  $GMT$ . На рис. 9 показаны крестовые диаграммы фазового тензора и векторы индукции для периодов 16–1024 с. Новые черты поведения инвариантов фазового тензора и векторов индукции выявлены на участке детализации разломной зоны Линии Николаева. На периодах 64–1024 с для п. 404–651 прослеживается поворот главных осей эллипсов фазового тензора на  $30^\circ$  к западу, а в п. 672–404 — похожий поворот на более коротких периодах (2–64 с). Векторы индукции в этих пунктах также разворачиваются в соответствующих направлениях, причем инверсия их направлений и, соответственно, ось аномалии электропроводности

определяются в п. 660 и 661 — на 20 км южнее маркируемой по геологическим данным Линии Николаева. Рис. 9 также позволяет проследить как с ростом периода изменяется морфология ЭМ откликов, отражающих распределения проводимости осадочного чехла в окрестности этого сложного участка профиля. Максимальное влияние осадков наблюдается на достаточно длинных периодах 128–256 с.

По результатам проведенного анализа можно заключить, что преобладающее субширотное направление геотектонических структур Центрального Тянь-Шаня находит свое отражение в ориентации главных направлений передаточных операторов  $MT$  и  $GMT$  ансамблей вдоль профиля НАРЫН. Это соответствие выдержано наиболее строго в интервале периодов 512–4098 с. На более коротких периодах в разной степени для различных откликов и участков профиля присутствуют эффекты приповерхностных и верхнекоровых 3D неоднородностей, вносящие заметные возмущения в ориентацию главных направлений. Наиболее стабильны главные направления фазового тензора и горизонтального  $MV$  отклика, ориентированные в соответствии с региональной тектоникой вплоть до самых длинных периодов оценивания в ансамбле  $GMT$ . В отличие от данных типпера они не проявляют существенной зависимости от эффектов неоднородности источника для периодов выше 2 часов. На участке профиля, пересекающем Нарынскую впадину, выявлен закономерный и согласованный во всех передаточных операторах разворот азимутов их главных направлений на  $30^\circ$  к западу, обусловленный конфигурацией осадочного бассейна.

Эти выводы статистически подтверждаются с помощью секторных гистограмм распределений главных направлений. На рис. 10 они представлены отдельно для ансамблей  $GMT$  и  $MT$ . В ансамбле  $GMT$  экстремум азимутов действительных векторов индукции и один из экстремумов главных направлений фазового тензора совпадают, составляя  $\sim 7^\circ$  (СВВ), что определяет азимут простирания доминирующих структур  $\sim -83^\circ$  (СЗЗ). Гистограмма оценок главных направлений импеданса по схеме Свифта наглядно показывает, насколько увеличивается их разброс под влиянием статических приповерхностных искажений.

В нижнем ряду рис. 10 сопоставлены гистограммы оценок главных направлений фазового тензора в диапазоне 16–1024 с в двух вариантах: для всех 65 точек профиля, включенных в ансамбль  $MT$ , и для подмножества 27 детализационных зондирований на 80-км участке зоны Линии Николаева. На первой из них выявляются два кластера направлений — субмеридиональное и северо-западное ( $\sim -30^\circ$ ), а на второй остается лишь одно доминирующее направление ( $\sim -30^\circ$ ). Первое из них ортогонально региональному простиранию



**Рис. 10.** Секторные гистограммы главных направлений МТ/МВ откликов, в верхнем ряду оценки по всем 19 точкам ГМТ ансамбля для периодов 256–4096 с): (а) – главные направления импеданса по схеме Свифта; (б) – главные направления фазового тензора импеданса по схеме СВВ; (в) – индукционные векторы (Re); в нижнем ряду – главные направления фазового тензора по схеме СВВ для периодов 64–1024 с: (г) – для всех 65 точек ансамбля МТ; (д) – для его подмножества из 27 точек зондирования Phoenix и LIMS в зоне Линии Николаева.

структур, а второе – простирацию Нарынской впадины.

Полученные результаты обосновывают возможность 2D интерпретации накопленных данных, указывают пути выбора их наиболее информативных компонент и оценивают степень их искаженности 3D эффектами. Следующие статьи данного цикла посвящены различным подходам 2D интерпретации МТ/МВ данных на профиле НАРЫН в рамках общей схемы инверсии [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007a]. Важной особенностью этой схемы является минимизация функционалов невязки в робастной норме Хьюбера, позволяющей ограничивать влияние локальных искажений данных, в том числе и 3D искажений, подробно рассмотренных выше. Существует в этой схеме и явный путь подавления таких искажений путем увеличения погрешностей данных в процедуре инверсии пропорционально как отвечающему им параметру асимметрии (явная трехмерность среды), так и отклоне-

нию соответствующей оценки простирания от перпендикуляра к направлению профиля (двумерность, не соответствующая положению профиля, или трехмерность).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена современная методика обработки и анализа МТ/МВ данных, адаптированная к высокогорным условиям Тянь-Шаня и детально опробованная на материалах ЭМ зондирования на профиле НАРЫН. Использование новой помехоподавляющей технологии mRRMC [Varentsov, 2007b] для оценивания МТ/МВ передаточных функций по синхронным зондированиям и обобщение всех кондиционных материалов, полученных на профиле за последние два десятилетия, позволили подготовить для последующей интерпретации многокомпонентный ансамбль хороших по качеству данных в диапазоне периодов 0.1–16000 с.



Этот ансамбль включает оценки локальных (импеданс, типпер) и двухточечных синхронных (горизонтальный МВ отклик) передаточных операторов и обеспечивает разрешение осадочных, коровых и верхнемантийных структур.

Для определения параметров размерности и направлений простирания доминирующих глубинных геоэлектрических структур отобраны устойчивые к приповерхностным гальваническим искажениям схемы инвариантного анализа передаточных операторов [Caldwell et al., 2004; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Varentsov, 2007b], выявившие в целом регионально-двумерный характер ЭМ откликов на профиле НАРЫН и указавшие на принципиальную возможность интерпретации накопленных данных в рамках 2D модельных представлений. Подчеркнем, однако, что в рамках данного исследования особое внимание было обращено на тонкий количественный анализ инвариантных МТ/МВ параметров, свидетельствующих о размерности и простирании геоэлектрических структур, с целью дальнейшего учета степени 3D искаженности данных в процедурах 2D интерпретации.

Псевдоразрезы МТ/МВ откликов вдоль изучаемого геотраверса изобилуют яркими аномалиями в различных диапазонах периодов. Отчетливо выделяются две области существенно двумерных откликов от субширотных коровых и верхнемантийных структур, соотносимые с Казахской плитой и Северным Тянь-Шанем (п. 414–406); область Среднего Тянь-Шаня (п. 405), отмеченная локальной 3D коровой аномалией в зоне разломов Линии Николаева; область Южного Тянь-Шаня (п. 402–601), подверженная влиянию удаленных 3D структур, находящихся вне профиля; а также область борта Таримской впадины (п. 602–605) с квазидвумерностью, не вполне ортогональной направлению профиля. В данных типпера на периодах более 8000 с доминируют эффекты неоднородного внешнего источника, таким образом, при интерпретации эти длиннопериодные данные типпера исключены из интерпретационного ансамбля.

Наиболее существенные 3D искажения данных имеют приповерхностную природу и связаны со структурами горного рельефа и осадков межгорных впадин. Эти приповерхностные эффекты проявляются, в основном, на периодах до первых сотен секунд. Анализ ансамбля данных на детализированном Нарынском участке профиля (рис. 8б), показал, что аномальные эффекты в этом диапазоне периодов определяются, в значительной степени, пространственной структурой Нарынской и Атбашинской впадин. Отдельные топографические эффекты проявляются и на периодах тысяч секунд, внося заметные искажения в отклики корово-мантийных структур [Sokolova, Varentsov, 2009]. Детальный учет в интерпретационной модели априорных представлений о рельефе и осадочных структурах

будет способствовать более достоверному разрешению глубинных геоэлектрических структур. Этому же будет способствовать дополнительное взвешивание интерпретируемых данных с учетом их 3D искаженности [Sokolova et al., 2007; 2008]. Стратегия и тактика 2D инверсии подготовленных данных подлежит уточнению с использованием имитационных данных [Sokolova; Varentsov, 2009].

В настоящее время изучение геоэлектрического строения активных орогенов ведется все более широким фронтом во многих регионах мира, при этом зондирования, как правило, проводятся в прагматичном профильном варианте. Это позволяет полагать, что представленный опыт изучения Центрального Тянь-Шаня и отработанный методический инструментарий будут полезны при планировании и проведении новых подобных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н., Жданов М.С.* Интерпретация аномалий переменного ЭМ поля Земли. М.: Недра. 1981. 327 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 679 с.
- Бердичевский М.Н., Варенцов Ив.М., Голубцова Н.С., Пушкарев П.Ю., Рыбин А.К., Соколова Е.Ю.* Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: последовательная инверсия данных магнитовариационного и магнитотеллурического зондирования вдоль профиля НАРЫН // Физика Земли. 2010. Данный номер.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С., Мещикова Н.А., Пушкарев П.Ю.* Магнитовариационные зондирования: новые возможности // Физика Земли. 2003. № 9. С. 3–30.
- Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарев П.Ю., Романюк П.В.* Геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны // Физика Земли. 2002. № 10. С. 23–53.
- 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.
- Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р., Наливайко К.В., Рабочая группа BEAR.* Методика построения передаточных операторов ЭМ поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. 2003. № 2. С. 30–61.
- Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Рабочая группа проекта BEAR.* Диагностика и подавление авроральных искажений передаточных операторов ЭМ поля в эксперименте BEAR // Физика Земли. 2003. № 4. С. 21–48.
- Мельникова П.А.* Карты суммарной продольной проводимости мезо-кайнозойских отложений межгорных впадин Киргизии. Строение литосферы Тянь-Шаня / Ред. Юдахин Ф.Н. Бишкек: Илим. 1991. С. 100–111.
- Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Шелочков Г.Г.* Магнитотеллурические и магнитовариационные ис-

- следования Киргизского Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. П. 42. № 10. С. 1566–1173.
- Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.Ю., Матюков В.Ю. Магнитотеллурические свидетельства глубинных геодинамических условий в зоне сочленения Южного Тянь-Шаня и Тарима. Записки Горного института. 2008. П. 183. С. 272–276.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального горообразования (Центральная Азия) / Ред. Лаверов Н.П. и др. М.: Научный мир, 2005. 400 с.
- 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.
- Bielinski R.A., Park S.K., Rybin A., Batalev V., Jun S., Sears C. Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30 (15). P. 1806, doi:10.1029/2003GL017455.
- Caldwell G.T., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. V. 158. P. 457–469.
- Chave A.D., Thomson D.J., Ander M.E. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions // J. Geophys. Res. 1987. V. 92(B1). P. 633–648.
- Egbert G.D. Processing and interpretation of EM induction array data // Surv. Geophys. 2002. V. 23. P. 207–249.
- Ernst T., Brasse H., Cerv V., Hoffmann N., Jankowski J., Jozwiak W., Kreuzmann A., Neska A., Palshin N., Pedersen L.B., Smirnov M., Sokolova E., Varentsov Iv. Electromagnetic images of the deep structure of the Trans-European Suture Zone beneath Polish Pomerania // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. P. 15307. doi:10.1029/2008GL034610.
- Gamble T.D., Goubau W.M., Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference // Geophysics. 1979. V. 44. P. 53–68.
- Sokolova E. Yu., Varentsov Iv. M., EMTESZ-Pomerania WG. The RRMC technique fights highly coherent EM noise. Protokoll uber das 21 Kolloquium “Elektromagnetische Tiefenforschung” / Eds. O. Ritter, H. Brasse. Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam. Germany. 2005. P. 124–136.
- Sokolova E. Yu., Varentsov Iv. M. Study of the topography effects in the MT/MV profile interpretation in high mountain regions. The 9<sup>th</sup> China Int. Geo-EM Workshop (Extended Abstracts). Guilin. China. 2009. P. 11–14.
- Sokolova E., Berdichevsky M., Varentsov Iv., 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. O. Ritter, H. Brasse). Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam. Germany. 2007. P. 132–141.
- Sokolova E., Berdichevsky M., Varentsov Iv., 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., EMTESZ-Pomerania WG. Method of horizontal magnetovariational sounding: techniques and application in the EMTESZ-Pomerania project. Protokoll uber das 21 Kolloquium “Elektromagnetische Tiefenforschung” / Eds. O. Ritter, H. Brasse. Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam. Germany. 2005. P. 111–123.
- Varentsov Iv. M. Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data. Electromagnetic sounding of the Earth’s interior. Methods in geochemistry and geophysics. V. 40. / Ed. V.V. Spichak. Elsevier. 2007a. P. 189–222.
- Varentsov Iv. M. Arrays of simultaneous electromagnetic soundings: design, data processing and analysis. Electromagnetic sounding of the Earth’s interior. Methods in geochemistry and geophysics. V. 40. / Ed. V.V. Spichak. Elsevier. 2007b. P. 263–277.
- Varentsov Iv. M., Sokolova E. Yu., EMTESZ WG. The magnetic control approach for the reliable estimation of transfer functions in the EMTESZ-Pomerania project. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. 2005. C-95(386). P. 68–79.
- Varentsov Iv. M., Sokolova E. Yu., Martanus E. R., EMTESZ-Pomerania WG. Array view on EM transfer functions in the EMTESZ-Pomerania project. Study of geological structures containing well-conductive complexes in Poland. Publ. Inst. Geoph., Pol. Acad. Sci. C-95(386). 2005. P. 107–121.