

КОРОВАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЗОНЫ ИНДИЙСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ СУБДУКЦИИ: НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ПРОФИЛЮ В ГАРВАЛЬСКИХ ГИМАЛАЯХ

© 2016 г. Е. Ю. Соколова¹, М. Израиль², П. Гупта², А. В. Кошурников³,
М. Ю. Смирнов⁴, М. В. Череватова⁵

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Индийский технологический институт (ИТТ), г. Рурки, Уттаракханд, Индия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

⁵Университет Мюнстера, г. Мюнстер, Германия

E-mail: sokol_1@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2015 г.

Представлены результаты изучения геоэлектрического строения области континентальной субдукции Индийской литосферной плиты на участке Гарвальских Гималаев. В рамках российско-индийского проекта материалы широкополосных магнитотеллурических зондирований Индийского технологического института Рурки вдоль регионального профиля в крест структур орогена были пополнены, обработаны и проинтерпретированы с помощью новых программных средств, адаптированных к измерениям в горах и присутствию промышленных шумов. Построенная модель разреза глубинной электропроводности Гарвала выявила его квазидвумерные черты и уточнила локализацию среднего проводника, ассоциированного с рамповой структурой поверхности детачмента. Корреляции с региональными особенностями распределения гипоцентров землетрясений и сейсмомографических образов позволили сделать предположение о единой, флюидной, природе сейсмических и геоэлектрической аномалий в коре Гарвальского Тектонического Коридора, а также идентифицировать зоны сейсмогенерации. В данных расширенного профильного ансамбля магнитотеллурических и магнитовариационных передаточных функций выявлен отклик малоизученного глубинного проводящего объекта, протягивающегося на востоке от профиля, и, вероятно, связанного с активизацией древних транс-гималайских структур кратона, подготавливающей сегментацию Гималайской дуги.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, профильная инверсия, геоэлектрический разрез, сейсмичность, континентальная субдукция, Индийская плита, Гарвальские Гималаи, транс-гималайские структуры.

DOI: 10.7868/S0002333716020137

ВВЕДЕНИЕ

Горная страна Гарвала (*Garhwal* или *Garhwal-Kumaun*), административно относящаяся к индийскому штату Уттаракханд, занимает значительный сегмент (~77–81° E) в арке альпийского орогена Гималаев (рис. 1). Участок Гималайского Сейсмического Пояса (*Himalayan Seismic Belt*, HSB), максимально концентрирующий сейсмическую активность, обусловленную продолжающимся со времени эоценовой коллизии поддвигом Индийской плиты под Тибетское плато [Molnar, Tapponnier, 1975; Ni, Baranzangi, 1984; Molnar, 1990; Kayal, 2008], носит здесь название Гарвальского Тектонического Коридора. За последние десятилетия в нем произошли два крупных землетрясения: Шамоли (1999 г., mb6.3) и Утгаркаши

(1991 г., mb6.6). Более крупных событий здесь не было с момента исторического Кумаюнского землетрясения (1803 г., mb 7.0–8.0), что позволяло рассматривать Гарвал-Кумаюн как западный фланг сейсмической “бреши” (seismic gap) в Центральных Гималаях – протяженного участка гряды (~77–86° E), характеризующегося большим дефицитом сдвига [Khattri, 1987; Bilham et al., 2001]. Недавнее Непальское катастрофическое землетрясение 25.04.2015 сократило “бреши” с востока, но, по-видимому, несильно уменьшило величину накопленного сейсмического напряжения в Гарвале, а, следовательно, и опасности возникновения здесь крупных землетрясений.

Государственные перманентные и оперативно развертываемые сети сейсмического слежения

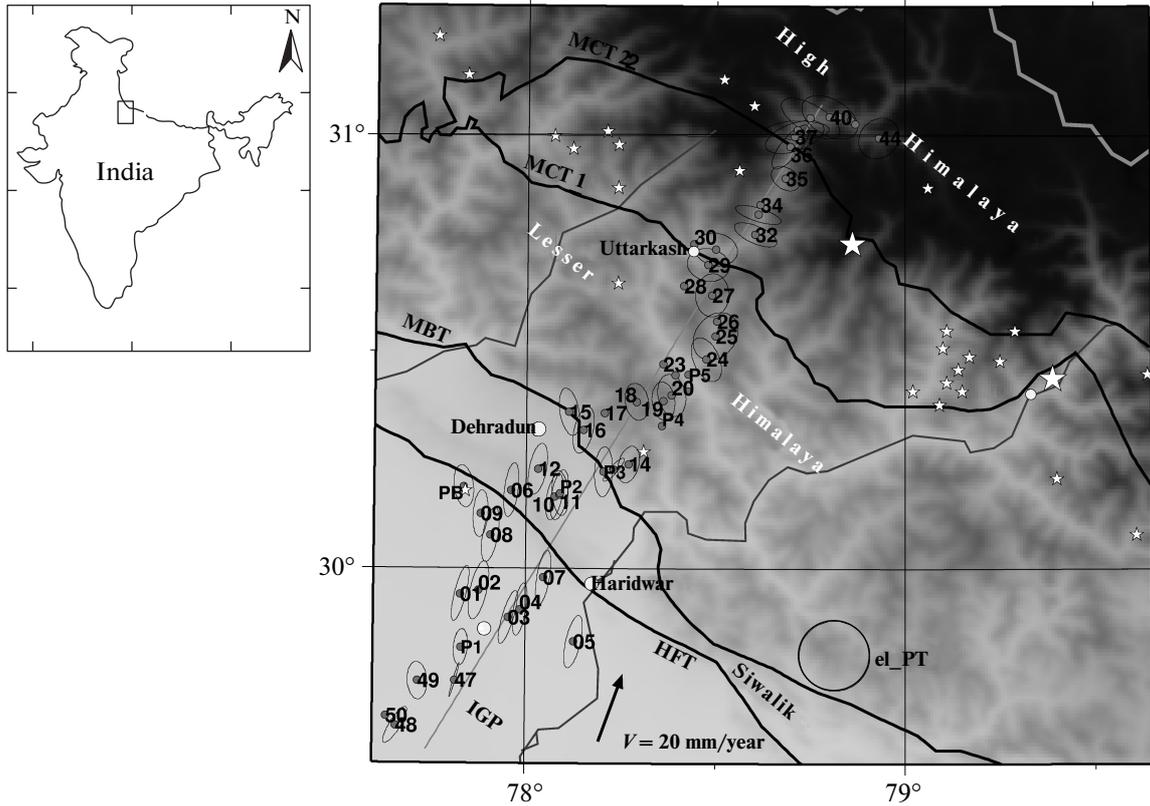


Рис. 1. МТ/МВ зондирования Индийского технологического института, Рурки (ИТТР, Roorkee) на профиле Рурки–Ганготри (RG) в Гарвальных Гималаях (Garhwal Himalaya): пункты однотоочных зондирований “Metronix”, 2004–2006 гг., [Israil et al., 2008] (01–44) и пункты синхронных зондирований “Metronix” и “Phoenix”, 2010–2012 гг., (47–50 и РВ-Р5 соответственно). На топооснову (градации серого) также вынесены главные структурные линии Гималайского Пояса Надвигов (адаптировано по [Valdija 1980; Kumar et al., 2002]): HFT – Himalayan Frontal Thrust, Гималайский Фронтальный Надвиг, MBT – Main Boundary Thrust, Главный Граничный Надвиг, МСТ1, 2 – Main Central Thrust, Главный Центральный Надвиг, отделяющие, соответственно, IGP – Indo-Gangetic Plain, Индо-Гангскую равнину, Siwalik, Сивалик, Lesser Himalaya, Низкие и High Himalaya, Высокие Гималаи. Также показаны: эпицентры землетрясений Гарвального тектонического коридора с $m_b > 3$ (каталог GS USA за 2001–2010 гг., малые звезды) и наиболее крупные землетрясения последних лет – Chamoli, Шамоли, ($m_b 6.3$, 1999 г.) и Uttarkashi, Уттаркаши, ($m_b 6.8$, 1991 г.) (большие звезды); вектор скорости (мм/год) движения Индийской плиты относительно Евразийской по [Paul et al., 2001].

Профиль для 2D-инверсии МТ данных проведен в крест региональных структур под азимутом 30° СВ (серая линия). Для пунктов, данные которых использовались в инверсии, показаны эллипсы экстремальных фаз фазового тензора (el_PT), рассчитанных для периода $T = 512$ с по схеме СВВ [Caldwell et al., 2004], в масштабе, заданном радиусом круга 90° .

ведут контроль сейсмичности на территории Уттаракханда с начала 80-х годов прошлого века [Kayaal, 2008]. Тогда же были начаты и геоэлектрические исследования региона, изучающие глубинное распределение электропроводности как источник сведений о структурах тектоносферы, вещественном составе, термальном и флюидном режимах недр. Эти знания, дополняющие результаты сейсмологических методов, необходимы для обоснования геодинамических построений и региональных моделей сейсмогенерации.

Первые сведения об аномальном геоэлектрическом строении Гарвала дали постановки массивов магнитовариационных (МВ) зондирований [Lilley et al., 1981; Arora, Mahashabde, 1987], результаты которых указывали на существование глубинной проводящей зоны, протягивающейся вдоль

траверса древнего хребта Аравали ($\sim 65^\circ$ NE) в направлении к Высоким Гималаям (рис. 1). Последовавшие вскоре магнитотеллурические (МТ) зондирования [Gupta et al., 1994] оценили в 6–8 км мощность проводящей терригенно-осадочной толщи в пределах Сивалика (Суб-Гималаи).

Масштабные региональные работы методом МТЗ были инициированы Индийским технологическим институтом Рурки (ИТТР). За период 2004–2006 гг. были выполнены 44 широкополосных зондирования с аппаратурой “Metronix” на профиле от г. Рурки до высокогорного ледника Ганготри, дающего начало Гангу (рис. 1). Интерпретация этих данных [Israil et al., 2008] выявила в коре Гарвала крупную аномалию электропроводности, ассоциированную подобно аномалии, открытой ранее в Непале [Lemonnier et al., 1999], с

Главным Центральным Надвигом (*Main Central Thrust*, МСТ).

Следующий этап комплексных магнитотеллурических и магнитовариационных работ на линии Рурки–Ганготри (RG) проходил в рамках российско-индийского проекта, начавшегося в 2010 г. Совместное исследование имело целью реконструировать распределение электропроводности по этому профилю с использованием новых полевых наблюдений, программных средств анализа МТ/МВ данных, развитых российскими учеными, а также их интерпретационного опыта, накопленного в других активных горных регионах. Требовалось проверить заметные артефакты построенного ранее разреза электропроводности [Israil et al., 2008], а главное – улучшить разрешение в области важной для геодинамических построений коровой аномалии, локализация которой представлялась в определенной мере противоречивой.

В статье описываются пути и результаты решения вставших при этом задач: пространственно-частотного расширения ансамбля данных зондирований, повышения качества оценивания передаточных функций на фоне индустриальных помех, а также применения современных методов анализа МТ/МВ данных и технологий их профильной инверсии для выделения региональных квази-двумерных геоэлектрических структур коры Гарвала в присутствии эффектов топографии и трехмерных (3D) искажений. В заключительной части вновь выстроенный разрез электропроводности по линии Рурки–Ганготри сопоставляется с уже имеющимися аналогичными построениями для других участков зоны субдукции Индийской плиты, верифицируется региональными сейсмическими материалами и используется для оценки некоторых физических параметров литосферы; по результатам анализа расширенного ансамбля МТ/МВ данных освещаются специфические черты модели сейсмогенерации в регионе Гарвала.

1. ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЙ ОЧЕРК И ЗАДАЧИ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РЕГИОНЕ ГАРВАЛЬСКИХ ПИМАЛАЕВ

Геология Гарвальских Гималаев к настоящему времени достаточно изучена [Valdiya, 1980; Srivastava, Mitra, 1994; Yin, 2006]. Именно в этом регионе была впервые описана гималайская последовательность геолого-геоморфологических (литотектонических) зон, которая выдерживается на всем протяжении орогена. Геотраверс Рурки–Ганготри на протяжении 200 км пересекает три из них (рис. 1): низкие холмы Внешних или Суб-Гималаев–Сивалика (*Siwalik*, SIW, неогеновая моласса); Низкие Гималаи (*Lesser Himalaya*, LH) – хребты высотой более 2500 м, сложенные, в основном, до-

кембрийскими и кайнозойскими осадочными и метаосадочными (низких фаз метаморфизма) породами; достигающие высоты 4000–8000 м Высокие Гималаи – кристаллическое ядро орогена (*High Himalaya*, HH, или *High Himalayan Crystalline*, HHС), сложенное позднепротерозойскими и кайнозойскими высокометаморфизованными комплексами, прорванными лейкогранитными интрузивами олигоцена-миоцена. Вне профиля, уже за китайской границей, осталась самая северная провинция – Гималаи Тетиса (*Tethyan Himalaya*, TH).

В настоящее время в Гималайском Поясе Надвигов (*Himalayan Thrust Belt*, НТВ), области поглощающей наибольшую долю коровой деформации, обусловленной континентальной коллизией [Srivastava, Mitra, 1994; Molnar, 1990], выделяются четыре наиболее крупные разрывные структуры (от древней на севере к более молодым на юге): Южно-Тибетский Срыв (*South Tibetan Detachment*, STD), разделяющий TH и HH; Главный Центральный Надвиг между HH и LH (*Main Central Thrust*, МСТ) – зона распределенного надвига, ограниченная в Гарвале линиями МСТ1 (*Mansuary Thrust*) и МСТ2 (*Varkrita Thrust*); Главный Граничный Надвиг (*Main Boundary Thrust*, MBT), проходящий у подножий Низких Гималаев; Главный Фронтальный Надвиг (*Main Frontal Thrust*, MFT), отделяющий холмы Сивалика от Индо-Гангской равнины. Эти структурно-тектонические линии, протягивающиеся суб-параллельно вдоль всей арки Гималаев, на Гарвальском участке ориентированы в направлении ~130° ЮВ (рис. 1). Близ поверхности они характеризуются крутым падением на северо-восток, а далее с глубиной, как принято полагать, выполаживаются и корнями уходят в плоскость срыва индийской литосферы (детачмента) – Главный Гималайский Надвиг (*Main Himalayan Thrust*, МНТ), впервые выделенный и ассоциированный с жесткой поверхностью погружающейся плиты по сейсмологическим данным в [Seeber et al., 1981].

Знания о глубинном поведении этих тектонических структур, являющихся ключевыми элементами архитектуры всей коллизионной системы, крайне важны для понимания ее геодинамики. Полученные первоначально на основе анализа информации о положении гипоцентров и механизмах землетрясений [Seeber et al., 1981; Ni, Barazangi, 1984; Khattri 1987; Pandey et al., 1995] и гравиметрических данных [Lyon-Caen, Molnar, 1985], они в настоящее время существенно уточняются, в первую очередь, по материалам наблюдений современных широкополосных сейсмических станций [Schulte-Pelkum et al., 2005; Oreshin et al., 2008; Nabelek et al., 2009; Caldwell et al., 2010; 2013].

Впервые полученные для региона Гарвальских Гималаев данные телесеismicкой томографии [Caldwell et al., 2010] дали подтверждения положому, под углом в первые градусы, погружению по-

верхности МНТ от Сивалика до зоны перехода от Низких к Высоким Гималаям, где уже на среднекоревых глубинах (15–20 км) начинается участок ее более крутого (до 20°) падения, далее опять выполаживающийся в направлении к STD. Существование подобной “рамповой” структуры в поверхности детачмента было отмечено по сейсмическим данным и на других сегментах Гималаев [Ni, Barazangi, 1984; Pandey et al., 1995; Schulte-Pelkum et al., 2005; Nabelek et al., 2009; и др.]. Для Гарвала оно ранее намечалось геолого-структурными построениями [Srivastava, Mitra, 1994]. Не менее важными стали согласующиеся с ранними гравиметрическими данными [Lyon-Caen, Molnar, 1985] выводы [Caldwell et al., 2010, 2013] о существовании в Гарвале глубинного прообраза рампа МНТ – флексуры поверхности Мохо, погружающей по глубине от 33 до 73 км и зеркально отражающей крутую ступень рельефа Гималаев.

Глубина залегания и геометрия МНТ и границы Мохо контролируют построение кинематических и геодинамических моделей коллизионного горообразования [Bollinger et al., 2006; Herman et al., 2010; и др.]. Для их уточнения нужно выстраивать как можно более полный вектор параметров состояния литосферы исследуемых областей. К числу важнейших характеристик относится флюидонасыщенность, влияющая на реологические свойства недр [Kirbi, 1983; Kohlstedt et al., 1995; Tullis et al., 1996; Unsworth et al., 2005]. При наличии свободных флюидов (водных растворов или расплава) в связанном поровом пространстве породы наиболее чувствительным их индикатором становится электропроводность [Hyndmad, Shearer, 1989; Nesbitt, 1993]. Поэтому для областей субдукции и активного орогенеза, где аномалии электропроводности в большинстве своем имеют флюидную природу [Kurtz et al., 1986; Ваньян и др., 2002; Lemonnier et al., 1999; Israil et al., 2008; Sokolova et al., 2008; 2011], глубинные электромагнитные зондирования все чаще становятся надежным источником знания как о структурах литосферы, так и о ее реологии. Подобные исследования в Гарвале, активное изучение которого современными геофизическими методами начато в отличие от Восточных и Центральных Гималаев совсем недавно, весьма актуальны и необходимы для создания комплексной модели глубинного строения региона, верификации на ее основе геодинамических моделей субдукции и горообразования, а также для получения обоснованной оценки сейсмической угрозы.

2. ЗОНДИРОВАНИЯ НА ПРОФИЛЕ РУРКИ–ГАНГОТРИ И ОБРАБОТКА ИХ ДАННЫХ

Зондирования на территории Уттаракханда приходится проводить в условиях обилия про-

мышленных помех как на густонаселенной равнине, так и в горных долинах, в большинстве имеющих местные линии электропередач, а зачастую и гидроэнергетические установки различной мощности. На первом этапе эксперимента ПТР на геотраверсе Рурки–Ганготри (2004–2006 гг.) были выполнены 44 пятикомпонентных широкополосных зондирования немецкими станциями “Metronix” с шагом 5–10 км и длительностью наблюдений от 2 до 4 сут (рис. 1). Однако из-за сложностей логистики зондирования проводились, как правило, в локальном варианте (детали эксперимента, точность и другие аппаратные характеристики приведены в статье [Israil et al., 2008]). Массовая обработка наблюдений с использованием штатного кода аппаратуры “Metronix” осуществлялась в одноточечном (SS, *single-site*) режиме, ограниченном в возможностях шумоподавления. По результатам оценки качества построенных МТ передаточных операторов и их инвариантного анализа для профильной инверсии тогда были отобраны тензоры импеданса лишь в 27 точках в диапазоне 0.001–1024 с, в то время как оценки МВ операторов в большинстве оказались некондиционными и не участвовали в содержательном анализе.

На следующем этапе, в рамках российско-индийского сотрудничества, были проведены дополнительные наблюдения: 5 двухточечных попарно-синхронных зондирований станциями “Metronix” (ПТР) и 5 зондирований “Phoenix” (МГУ), опирающихся на одновременные записи в общей удаленной базе (пункт РВ на рис. 1). Новые зондирования продлили профиль RG на юг от г. Рурки в Индо-Гангскую равнину и заполнили некоторые пробелы на его центральном участке.

Обработка прежних и новых зондирований, проведенная по российским методикам с привлечением кондиционных материалов ПТР для пунктов 2004–2006 гг., показала эффективность синхронных схем наблюдения для борьбы с промышленными шумами в Уттаркханде. Использовались программы оценивания МТ/МВ передаточных функций, разработанные в СПбГУ и ЦГ-ЭМИ ИФЗ РАН. С помощью первой из них [Smirnov, 2003] была произведена переобработка данных всех старых 44 МТ/МВ зондирований ПТР в полном диапазоне наблюдений “Metronix” (0.001–3000 с), что позволило во многих случаях существенно подавить индустриальные шумы благодаря эффективным 50-герцовым фильтрам кода. Вторая программа, PRC-MTMV [Варенцов и др., 2003; Varentsov, Sokolova, 2005], одной из сильных сторон которой является стабилизирующее многоуровневое робастное усреднение результатов оценивания, применялась для уточнения низкочастотных ветвей МТ/МВ кривых, а также оценок в диапазоне слабых МТ сигналов (в окрестности 10 с). К сожалению, анализ старых

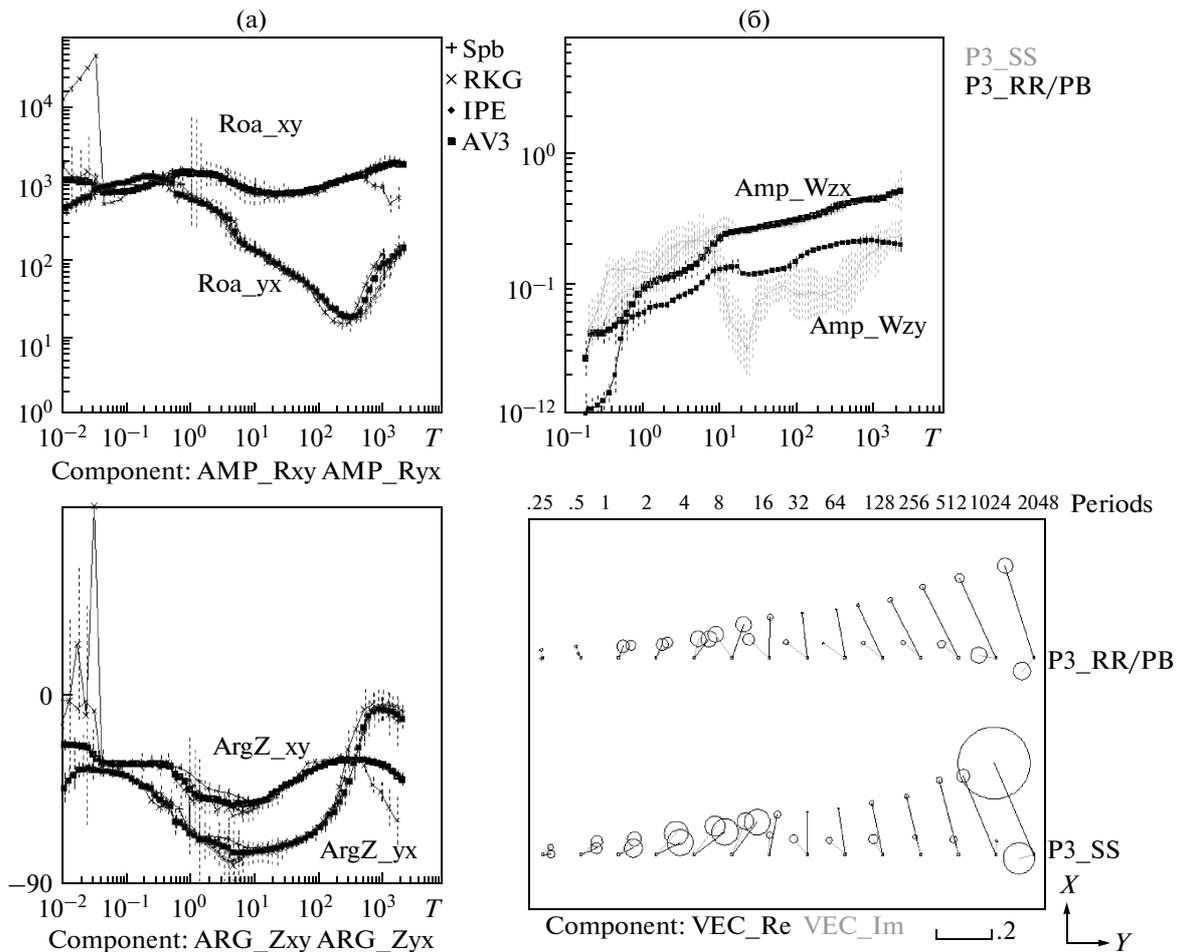


Рис. 2. (а) – Результаты однотоочечного оценивания кажущихся сопротивлений (вверху) и соответствующих импедансных фаз (внизу) по данным наблюдений “Metronix” в п. 32 с помощью программ СПбГУ, ИТР и ЦГЭМИ ИФЗ РАН (SPB, RKG, IPE, соответственно) и итоговое робастное осреднение кондиционных подмножеств трех полученных оценок (AV3); (б) – результаты оценивания типпера (частотные зависимости амплитуд Wzx, Wzy – вверху и реальных и мнимых индукционных векторов Re, Im – внизу) по наблюдениям “Phoenix” в т. P3 с использованием программы PRC_MTMV (SS и RR схемы, удаленная база в т. PB). На панели индукционных векторов, представленных в конвенции Wiese, ось X указывает направление на геомагнитный север; масштаб длины векторов задан отрезком 0.2. Погрешности оценивания показаны барами для частотных кривых и окружностями с центрами в концах соответствующих векторов.

наблюдений оказался по-прежнему ограничен SS вариантом оценивания, т.к. индийской стороне не удалось получить синхронные записи геомагнитных обсерваторий Уттаракханда. Однако переобработка с помощью двух новых программ и финальное робастное осреднение всех кондиционных оценок МТ/МВ передаточных функций, включая старые результаты ИТР, частично компенсировали их отсутствие: благодаря сложению преимуществ каждого из используемых методов, в целом ряде случаев удалось сгладить искажения частотных кривых и расширить их диапазон в область длинных периодов.

Пример построения итоговых оценок кажущихся сопротивлений и импедансных фаз приведен на рис. 2а (здесь и далее – в измерительных геомагнитных осях *x* – север, *y* – восток, практи-

чески совпадающих с географическими ввиду малой величины геомагнитного склонения в регионе). Сопоставляются частотные кривые МТЗ по результатам SS обработки данных зондирования “Metronix” в т. 32 с использованием штатного кода аппаратуры (RKG), программ СПбГУ (SPb) и ЦГЭМИ ИФЗ РАН (IPE). Результат SPb демонстрирует преодоление проблем обработки ИТР в высокочастотной части диапазона оценивания (сильное влияние гармоник 50 Гц помехи), а результаты обработки записей низкочастотного диапазона IPE – более устойчивые оценки в полосе слабых МТ сигналов (0–10 с), а также для наиболее длинных периодов. Итоговое робастное осреднение трех частных результатов дало достаточно надежные монотонные МТ кривые (AV3) для этой и большей части других точек зондирования.

Обработка синхронных наблюдений 2010–2012 гг. также велась “в три руки”, но по RR (*remote reference*) схемам оценивания с привлечением синхронных записей в удаленной базе РВ (рис. 1). В борьбе с промышленными шумами помогал помехоподавляющий потенциал опирающихся на оригинальные робастные RR алгоритмы технологий СПбГУ, а также ЦГЭМИ ИФЗ РАН, отличающихся применением адаптивных процедур селекции отрезков записи по критериям пространственной однородности внешнего магнитного поля (в целях соответствия парадигме МТ метода [Бердичевский, Дмитриев, 2009]). Пример их успешного использования при RR оценивании геомагнитного типпера (передаточного оператора, связывающего вертикальную компоненту поля с горизонтальными) по данным “Phoenix” в рядовом пункте Р3 и базовом РВ приведен на рис. 2б. Сопоставляются смещенные одноточечные и в значительной степени очищенные от искажений и определенные с меньшими доверительными интервалами двухточечные оценки частотных зависимостей амплитуд типпера (верхняя панель) и строящихся по его компонентам векторов индукции (нижняя панель). Напомним, что на первом этапе ПТР удалось получить оценки типпера лишь в нескольких пунктах и в SS-варианте, причем искажения в высокочастотном диапазоне часто сильно превышали выявленные в т.Р3.

В результате новой обработки данных всех имеющихся зондирований на профиле RG коллекция кондиционных оценок МТ/МВ передаточных функций была значительно расширена и уточнена по сравнению с первоначальным набором, используемым в работе [Israil et al., 2008]. Итоговые электромагнитные отклики геоэлектрической структуры Гарвалских Гималаев представлены на рис. 3 частотно-профильным распределением фазы детерминанта импедансного тензора для 37 точек в диапазоне оценивания 0.001–2048 с, а также коллекцией векторов индукции по 18 точкам. Последние приведены в интервале наиболее надежного определения (16–722 с) и сопоставлены с эллипсами экстремальных фаз фазового тензора (робастной к статическим искажениям трансформанты импедансного тензора, выстроенной по схеме СВВ [Caldwell et al., 2004]).

Несмотря на остающиеся элементы нестабильности этих распределений (в основном, базирующихся все же на одноточечных оценках), новый ансамбль МТ/МВ данных по профилю Рурки–Ганготри имеет наибольшую представительность в сравнении с аналогичными материалами имеющихся на сегодня других экспериментов зондирований Гималаев и их предгорий (как пионерских [Arora, Mahashabde, 1987; Lemonnier et al., 1999], так и сравнительно недавних [Arora et al., 2007; Patro, Harinarayana, 2009]). Без сомнения, каждый набор данных по этому труднодоступному

региону уникален и представляет большую ценность как материал, позволяющий подходить к более обоснованным обобщениям относительно геоэлектрического строения зоны субдукции Индийской плиты.

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ МТ/МВ ОТКЛИКОВ

Анализ МТ/МВ данных по линии Рурки–Ганготри был проведен на методической основе, тщательно отработанной на результатах профильных магнитотеллурических исследований Тянь-Шаня и наиболее полно представленной в работе [Бердичевский и др., 2010]. Главным принципом получения сведений о размерности МТ/МВ откликов и направлениях простирающихся основных геоэлектрических структур стала опора на устойчивые к искажениям схемы инвариантного анализа передаточных операторов, отдающие приоритет фазовым и геомагнитным данным [Бердичевский, Дмитриев, 2009; Caldwell et al., 2004].

Анализ морфологии частотных зависимостей передаточных функций в пунктах зондирования и их частотно-профильных распределений вдоль линии интерпретационного профиля, намеченного под азимутом 30° СВ в крест региональных структур Гарвала (рис. 1), позволяет провести пространственное районирование геоэлектрических откликов и создать исходные представления об основных особенностях глубинного разреза сопротивлений. Эффективная глубина проникновения поля при зондированиях с аппаратурой “Metronix” в первом приближении определяется диапазоном глубин от нескольких сотен метров до 50–60 км и более (при высокоомном разрезе).

В верхней части рис. 3 для привязки изображен рельеф (в км от уровня моря), указаны литотектонические провинции Гарвала, а также положение разделяющих их структурных линий (согласно рис. 1). Главной особенностью псевдоразреза фазы детерминанта импедансного тензора (Arg_Z_{det} , рис. 3а) является диагональная область пониженных значений. Эту аномалию можно ассоциировать с системой полого-падающих проводников, начинающихся с осадочного чехла Индо-Гангской равнины и Сивалика и далее погружающихся с увеличением проводимости уже в области средней коры зоны Главного Центрального Надвига (от МСТ1 до МСТ2, в диапазоне откликов 1–100 с). На участке профиля от IGP до НН эту аномалию подстилает область повышенных фаз – вероятно, отклик высокоомной индийской литосферы. На более высоких частотах к северу от МВТ также расположена область их повышенных значений, отвечающая изолирующим толщам метаморфитов верхней коры ЛН и НН. Те же региональные закономерности выявляются и при анализе кри-

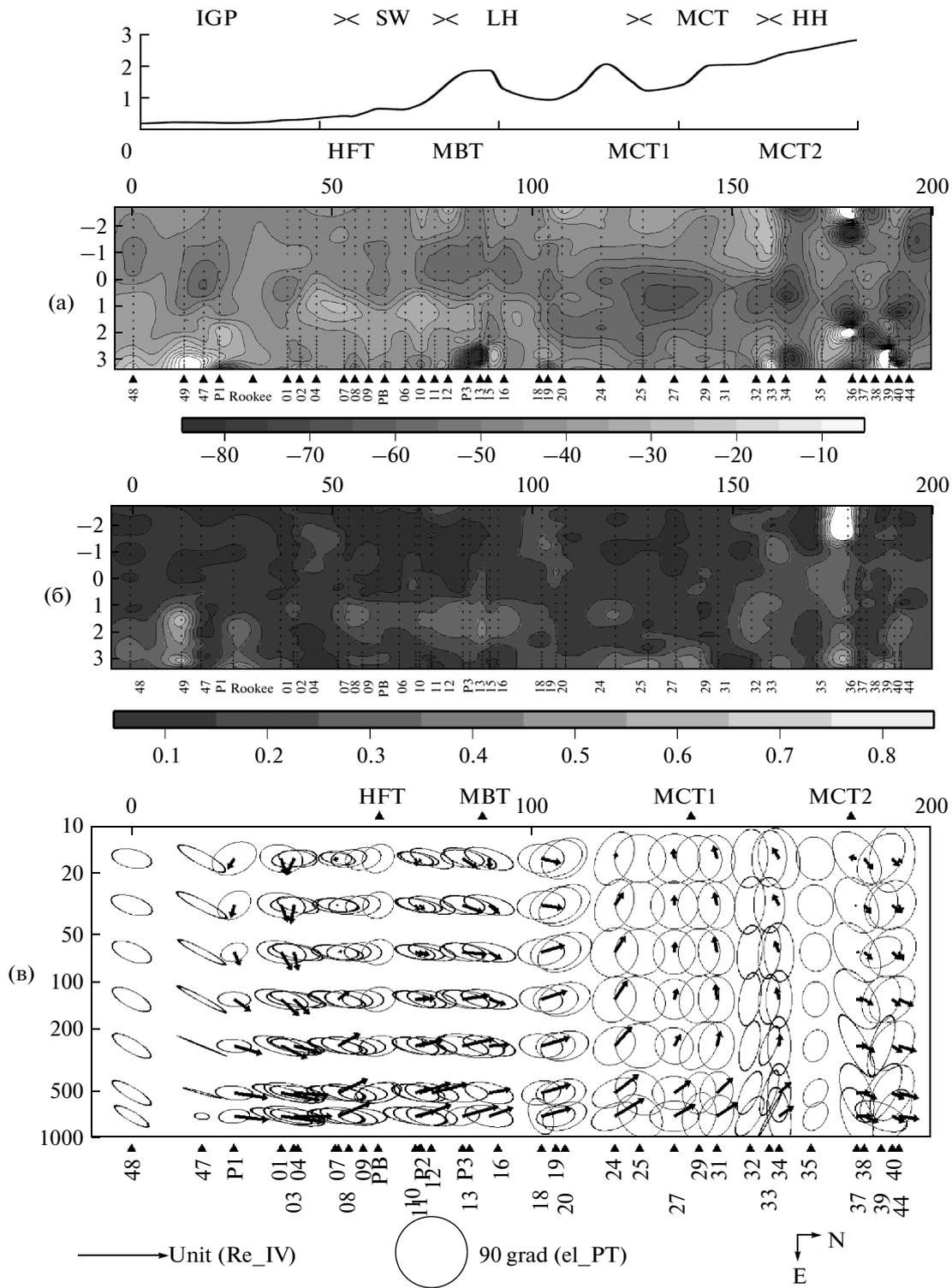


Рис. 3. Инварианты МТ и МВ откликов на профиле RG по материалам расширенного ансамбля данных зондирования: псевдоразрезы фазы детерминанта импеданса, Arg_Zdet (а) и амплитудного параметра трехмерности $SKEW_CBV$ (б) для 37 пунктов, а также – частотно-профильное распределение эллипсов экстремальных фаз фазового тензора (по схеме СВВ) и действительных векторов индукции (в конвенции Wiese, для 17 пунктов) (в).

Стрелка единичной длины задает масштаб индукционных векторов, а радиус круга 90° – длину осей эллипсов фазового тензора; вектора N и E – направление на север и восток. Над верхней панелью изображен рельеф, положение основных структурных линий и литотектонических провинций Гималаев, пересекаемых линией профиля (см. легенду рис. 1).

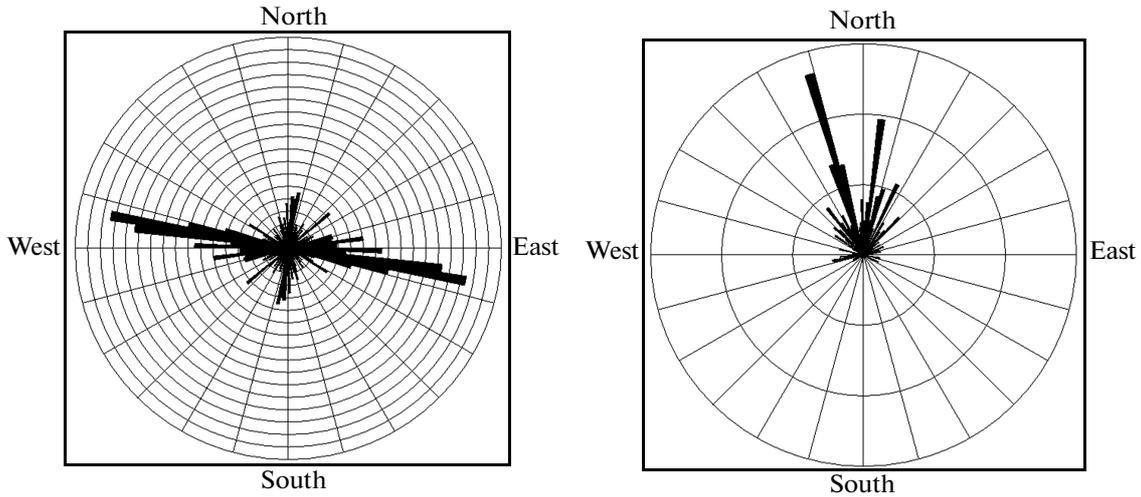


Рис. 4. Секторные диаграммы азимутов простираения геоэлектрических структур, определенных по главным направлениям фазового тензора с использованием схемы СВВ (данные 37 пунктов МТ ансамбля из подмножеств периодов 125–2048 с, слева), и направлений в крест простираению, определенным по азимуту действительных векторов индукции в конвенции Wiese (по данным 18 пунктов МВ ансамбля из подмножества периодов 16–722 с, справа). Сектор сканирования – 3°.

вых эффективных (вычисленных по детерминанту тензора импеданса) кажущихся сопротивлений, изменяющихся по уровню от 20 до 20000 Ом м на высоких частотах (для IGP и НН, соответственно). Погрешности оценивания (остаточные эффекты промышленных искажений) ответственны за нестабильность низкочастотных МТ данных в ряде точек IGP и SW (например, т. 49, т.т. P1, P3, т. 33), а сильные локальные 3D-эффекты канализации тока при измерениях в горных долинах Высоких Гималаев (т. 36, т. 39), вероятнее всего, определили случаи выхода фаз вне пределов квадранта (0° , -90°).

Согласно оценкам параметра асимметрии фазового тензора $Skew_CBV$ по схеме декомпозиции [Caldwell et al., 2004], устойчивой к приповерхностным гальваническим искажениям, на общем фоне 1–2D-данных значимые 3D-эффекты (отмеченные $Skew_CBV > 0.2$) проявляются в районе между НФТ и МВТ на периодах 10–100 с, а также в более широком диапазоне, но локально, – для нескольких точек в Высоких Гималаях (рис. 3б).

Частотно-профильные распределения эллипсов экстремальных фаз фазового тензора (рис. 3в), оцененных по схеме СВВ, и действительных векторов индукции, направленных “от проводника” (в конвенции Wiese), представлены в низкочастотном диапазоне, где определение последних более надежно (их пространственное распределение для периода 724 с, характеризующего среднюю и нижнюю кору, показано на рис. 7). По этим инвариантам можно судить как о размерности МТ/МВ откликов, так и об основных направлениях простираения глубинных геоэлектрических структур (или *страйке*). На участках Индо-Ганг-

ской плиты, Сивалика и, частично, Низких Гималаев вытянутость эллипсов, в также коллинеарность их длинных осей векторам индукции определяются устойчивой поляризацией в направлении $\sim 100\text{--}110^\circ$ СВ низкочастотного отклика мощных токов в осадочном чехле IGP и предгорных депрессиях (бассейн Ганга). Оценки интегральной продольной проводимости для пунктов равнины дают 700–500 См. На относительно коротких периодах в области НФТ, несмотря на сохранившиеся, однако, остаточные локальные искажения в ряде точек (или эффекты локальных проводящих структур, неразрешенных на конце профиля?), по поведению индукционных векторов можно выявить концентрацию токов в верхах коры. На наиболее длинных периодах вектора индукции по мере приближения к Низким Гималаям и далее вплоть до Высоких разворачиваются в СЗ направлении, что может свидетельствовать о влиянии глубинного проводника, расположенного к востоку от профиля. Подобные искажения МТ данных (менее чувствительных к 3D-эффектам вне профиля, чем типпер), начинают проявляться в поведении эллипсов фазового тензора лишь ближе к северной границе Низких Гималаев. В районе МСТ1 квази-круговые эллипсы (на фоне значений $Skew_CBV \sim 0.1$) и малые длины векторов индукции для периодов, характеризующих среднюю кору, четко свидетельствуют об аномальной проводимости последней. Смена вергентности длинных осей эллипсов в обрамляющих эту зону пунктах и соответствующие западные румбы направлений индукционных векторов в ее пределах говорят о расширении (в субмеридиональном направлении) этого проводника на восток

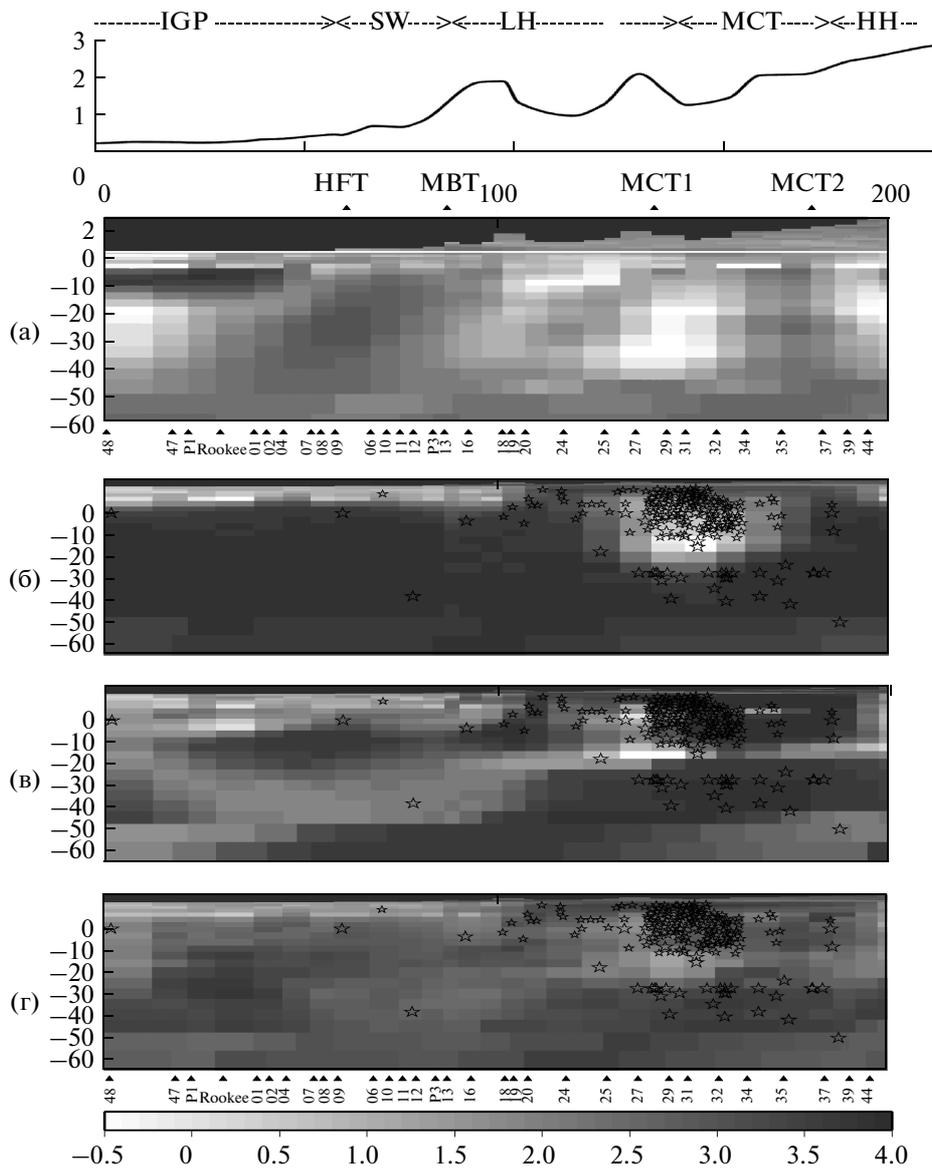


Рис. 5. Результаты 2D-инверсий различных подмножеств полного ансамбля МТ данных по линии RG по программе [Varentsov, 2007]: (а) для фазы эффективного фазового тензора (модель показана в двух окнах с разными масштабами глубин для рельефа и остальной литосферы); (б) — для кажущихся сопротивлений и фаз импеданса продольной (E_r) поляризации (здесь и далее модели показаны в одном окне с одинаковыми вертикальным и горизонтальными масштабами); (в) — для бимодального ансамбля тех же компонент (одновременный подбор данных продольной E_r и поперечной H_r поляризации). Представленным в соответствии с приведенной шкалой $\lg Ro$ (Ом м) моделям глубинного распределения сопротивлений отвечают робастные оценки невязок: по фазовым компонентам порядка $8^\circ-10^\circ$ и по амплитудам — 0.2–0.6 при RMS — от 1.1 до 1.8. Пункты зондирования указаны внизу моделей. На разрезы сопротивлений из полосы 70 км вокруг профиля спроецированы гипоцентры землетрясений $mb > 3$ (по данным каталога GS USA за 2001–2010 гг., большие звездочки) и локальная сейсмичность ([Khattri, 1992; Wason et al., 1999], малые звездочки). На нижней панели (г) изображен разрез сопротивлений, полученный по итогам робастного осреднения в пространстве параметров модели результатов 11 частичных инверсий.

от профиля. Аналогичное поведение МТ и МВ передаточных функций на двух участках Тянь-шаньского геотраверса NARYN обуславливалось эффектами глубинной проводящей неоднородности под Южным Тянь-Шанем и мощной осадочной мульдой Нарынской впадины (Центральный Тянь-Шань), находящихся к западу от линии зондирования [Бердичевский и др., 2010]). Подоб-

ные 3D-отклики хорошо моделировались при изучении возможностей “бокового” зондирования по профильным МТ/МВ данным в работе [Иванов, Пушкарев, 2010].

Как отмечалось выше, МТ операторы в области Высоких Гималаев в районе МСТ2 отличаются локальными 3D-искажениями, однако в псевдо-

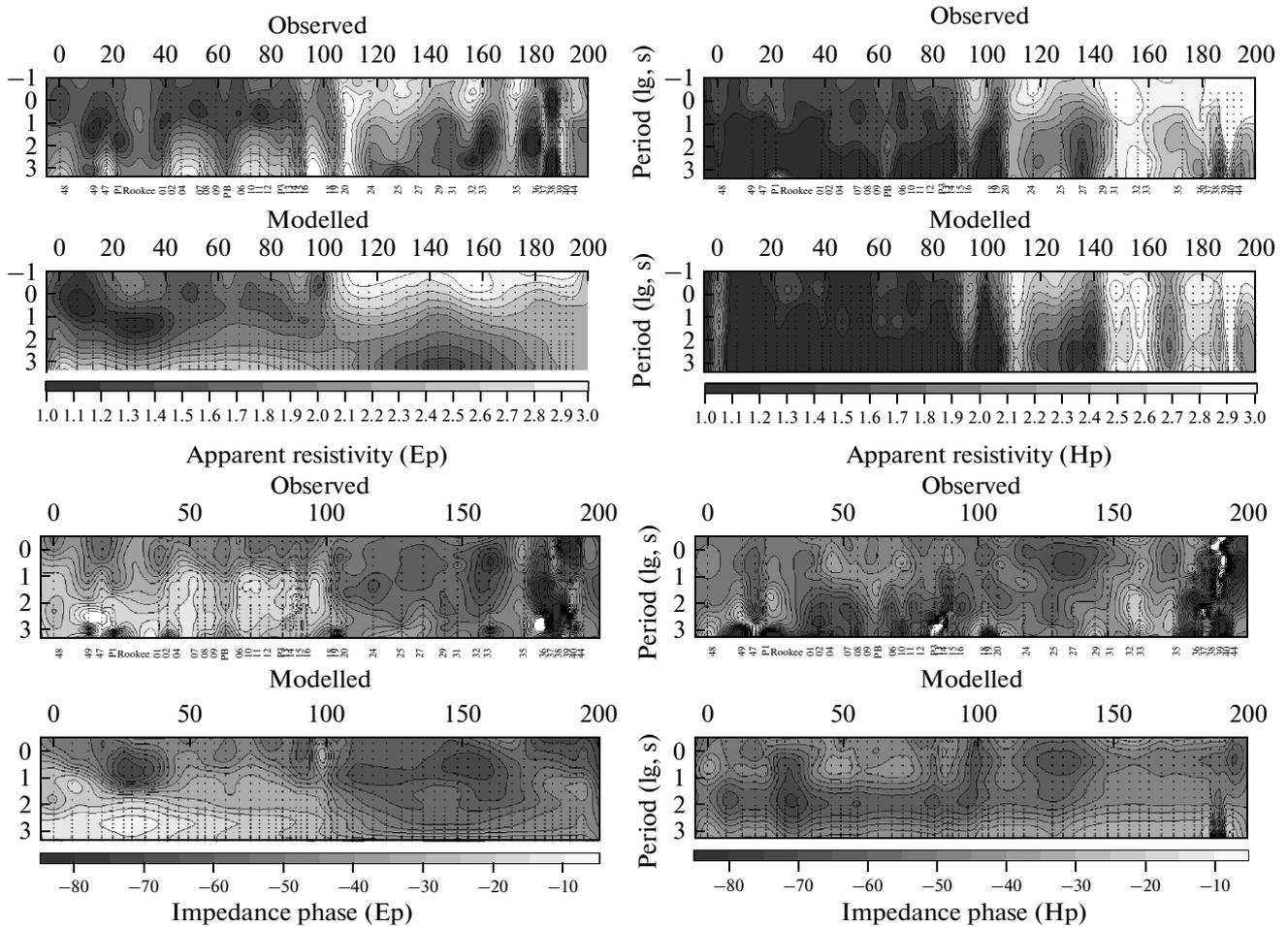


Рис. 6. Сопоставление псевдоразрезов наблюдаемых (ось X в направлении линии интерпретационного профиля RG) и расчетных МТ откликов (вверху – R_o , $\lg \text{ Ом м}$; внизу – $\text{Arg}Z$, градусы; EP – левый столбец; HP – правый столбец) для итоговой модели геоэлектрического разреза (рис. 7), обеспечивающей по 37-точечному бимодальному ансамблю МТ данных в диапазоне (0.125–2048) с робастное $\text{RMS} = 1.219$ и следующие взвешенные покомпонентные невязки: $\text{MF } R_o_{xy}/\text{Arg}Z_{xy} = 0.434/11.3^\circ$; $\text{MF } R_o_{yx}/\text{Arg}Z_{yx} = 0.349/10.7^\circ$.

разрезу $\text{Arg } Z_{det}$ все же достаточно явно усматривается продолжение в этом направлении нижнекоровой аномалии низких значений (рис. 36). МСТ2 отмечен инверсией векторов на высоких частотах, вызванной, по-видимому, концентрацией токов в верхнекоровой части этой структуры. Далее к северу действительные вектора индукции возвращаются к своему региональному СВ направлению, вероятно отражая удаленное влияние токов в чехле IGP.

Статистически значимые оценки азимутов простирания региональных геоэлектрических структур были получены с помощью секторных диаграмм главных направлений рассмотренных МТ и МВ операторов (рис. 4). Одномодальное распределение азимутов малых осей эллипсов фазовых тензоров своим экстремумом определяет доминанту простирания проводящих структур $\sim 100^\circ$ СВ. В то же время, направления действительных индукционных векторов, определяющие направление “в крест”

структур, продемонстрировали распределение с двумя экстремумами: $8\text{--}10^\circ$ СВ (соответствующее оценками простирания по МТ данным) и $15\text{--}20^\circ$ СЗ (обусловлено влиянием проводящих структур, протягивающихся в СВ направлениях).

Результаты инвариантного анализ МТ откликов на профиле RG отражают региональную двумерность геоструктур (простирание основных разломов и линейность Гарвальского сейсмического коридора, рис. 1) и, в целом, допускают 2D-интерпретацию, однако требуют введения поправок за трехмерную искаженность части данных. Использование МВ откликов для численной интерпретации на этапе профильной инверсии было признано нецелесообразным как из-за ограниченного объема кондиционных оценок, так и из-за существенно большего влияния на них проводящих структур вне профиля.

Итоговый ансамбль 2D-инвертируемых передаточных операторов был составлен по материа-

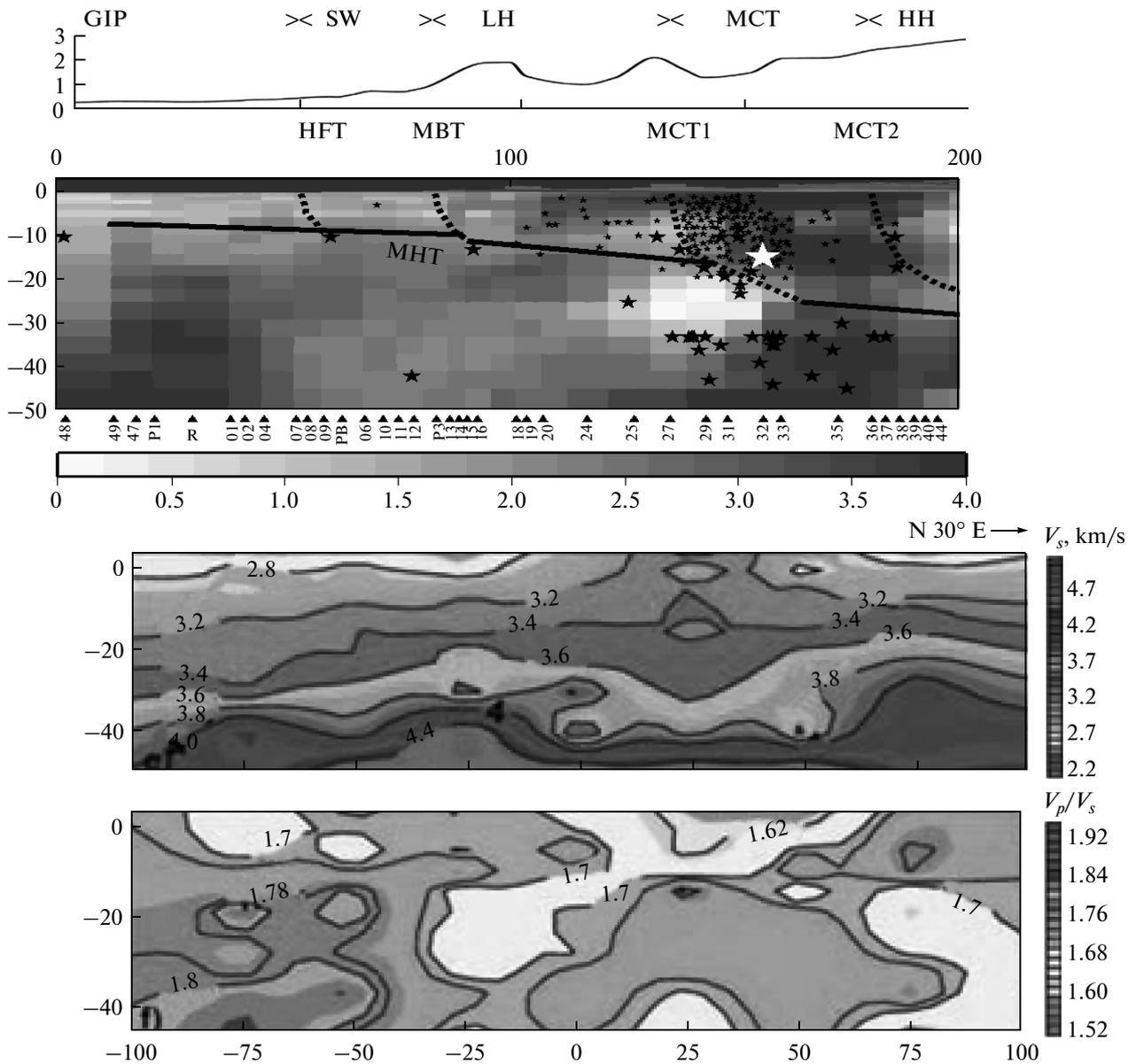


Рис. 7. Геоэлектрическая модель Гарвалльских Гималаев по линии Рурки—Ганготри (верхняя панель) в сопоставлении с сейсмографическими разрезами по линии АВ (рис. 8) для V_s и отношения V_p/V_s по материалам региональных землетрясений ([Mukhopadhyay et al., 2008]) (две нижние панели соответственно). Разрезы совмещены по линии МСТ1. Структурно-тектонические линии Гималайского Пояса Надвигов нанесены на геоэлектрический разрез в интерпретации авторов, а гипоцентры сейсмических событий (черные звездочки) — по легенде рис. 5. Белая большая звезда — проекция на плоскость профиля гипоцентра землетрясения Chamoli, Шамоли (m_b 6.3, 1999 г.) в Гарвалльском тектоническом коридоре.

лам 37 пунктов зондирования из амплитудных и фазовых компонент тензора импеданса, его детерминанта и фазовых тензоров в диапазоне 0.125–2048 с в соответствии с глубинной направленностью исследования. Учитывая определенное расслоение азимута полосы точек наблюдения на профиле ($\sim 30^\circ$ СВ, в крест структур Гарвалльских Гималаев) и направления, ортогонального к магнитотеллурическому страйку ($\sim 10^\circ$ СВ), в ансамбль

включены продольные (E_p) и поперечные (H_p) проекции его компонент для обоих вышеуказанных направлений.

4. СТРАТЕГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОФИЛЬНОЙ МТ ИНВЕРСИИ

Многокомпонентная инверсия МТ данных на профиле RG проводилась с помощью регуляри-

зированной робастной 2D-процедуры [Varentsov, 2007] по методике в публикации [Варенцов, 2011] и хорошо отработанной на тяньшаньских материалах [Sokolova et al., 2007; Рыбин, 2011]. Адаптивные свойства используемого алгоритма (робастные метрики минимизируемых невязок модельных и наблюдаемых данных, расширение доверительных интервалов последних в зависимости от степени их трехмерной искаженности, априорное взвешивание компонент) подавляли влияние отскоков и неадекватных двумерному подходу данных на процесс поиска решения, способствовали восстановлению в ходе инверсии квазидвумерных структур. Кусочно-непрерывная модельная аппроксимация задавалась на детальной сетке с учетом топографии (рис. 5а). При инверсии допускалась взаимная корреляция подбираемых параметров сопротивления ячеек, а ее радиусы определялись согласно представлениям о размерах ожидаемых аномальных структур. Стартовое нормально-слоистое распределение сопротивлений отвечало модели [Israil et al., 2008].

Стратегия профильной интерпретации предполагала на первом этапе проведение двумерных инверсии различных подмножеств полного ансамбля данных. Таким образом исследовалась специфика их разрешающей способности и чувствительности к трехмерным эффектам, анализировалась взаимная согласованность и выявлялись устойчивые элементы разреза электропроводности. Во всех раундах инверсии веса кажущихся сопротивлений, подверженных статическим искажениям, были занижены по отношению к фазовым данным в пропорции 1 : 15. Для подавления локальных 3D-эффектов на оба типа данных накладывались “пенальти” – пропорциональные оценкам Skew расширение их доверительных интервалов, первоначально определяемых погрешностями оценивания. Цикл инверсий завершался оценкой итогового распределения сопротивлений по результатам робастного осреднения в пространстве параметров модели всех решений, полученных с требуемой, достаточно малой, нормой невязки, по итогам которой проводился анализ степени разрешения аномальных объектов.

Инверсия МТ данных профиля RG стартовала с подбора одной из наиболее устойчивых к локальным гальваническим эффектам и выбору поляризации компонент ансамбля МТ данных – фазы детерминанта фазового тензора. Результат этой инверсии (представлен на рис. 5а с укрупненным вертикальным масштабом 1 : 4 для части модели, отвечающей рельефу) очертил осадочные комплексы Сивалика и Индо-Гангской плиты, проводящий объект в ее коре на юге профиля, проводящие структуры в верхней и (менее интенсивные) в средней коре под Низкими и Высокими Ги-

малаями и наиболее крупную проводящую область – в средней и нижней коре под МСТ1.

Инверсия импедансных фаз и кажущихся сопротивлений квази-продольной (E_p) поляризации подтвердила устойчивое простирание в направлении $\sim 110^\circ$ СВ близповерхностных проводящих структур и яркого корового проводника у подножья Высоких Гималаев, одновременно определив крайне низкую проводимость в этом направлении литосферы на участке от IGP до области МСТ1 (рис. 5б).

Более высокая электропроводность нижней коры на центральном и южном отрезках профиля (рис. 5в) была получена в результате бимодальной инверсии (одновременный подбор продольных и поперечных относительно линии RG компонент фаз и кажущихся сопротивлений с указанной выше пропорцией априорных весов), что было обусловлено, в первую очередь, необходимостью подбора низких импедансных фаз поперечной поляризации (H_p), наблюдаемых здесь на периодах 200–800 с. Эта аномалия H_p -фаз (рис. 6б), а соответственно, также и фаз эффективного импеданса (рис. 3а), может отражать присутствие в изучаемом глубинном разрезе проводящей структуры, простирающейся в ССВ румбах (в крест Гималаев). Однако ряд факторов подтверждает большую вероятность расположения этого проводника вне профиля (а именно, к востоку от него) и индукционного искажения ансамбля Н-поляризованных данных на линии RG. Об этом свидетельствуют: полное отсутствие соответствующего отклика в фазах Е-поляризации; повышенные Skew между НFT и MBT; уменьшение протяженности вышеупомянутой аномалии поперечных фаз для данных в проекции на направление ортогональное геоэлектрическому страйку (10° СВ) по сравнению с результатами для данных в направлении профиля (30° СВ); и, наконец, наиболее очевидное свидетельство – согласованный разворот длиннопериодных векторов индукции к западу (рис. 3в, рис. 8).

В то же время добавление данных поперечной моды, имеющих повышенную чувствительность к изолирующим объектам и латеральным неоднородностям верхней части разреза, улучшило разрешение верхнекоровых структур в окрестностях МСТ1: субвертикального проводника (\sim т. 27) и крупного изолирующего блока к северу от него. Об этом объективно свидетельствует сопоставление полученных моделей электропроводности с данными по региональной сейсмичности (рис. 5б, 5в): в случае (в) блок-изолятор между МСТ1 и МСТ2 совпал с областью концентрации гипоцентров микро-землетрясений Гарвальского тектонического коридора (звездочки), а коровый проводник углубился и закономерно сместился к югу – в асейсмичную область.

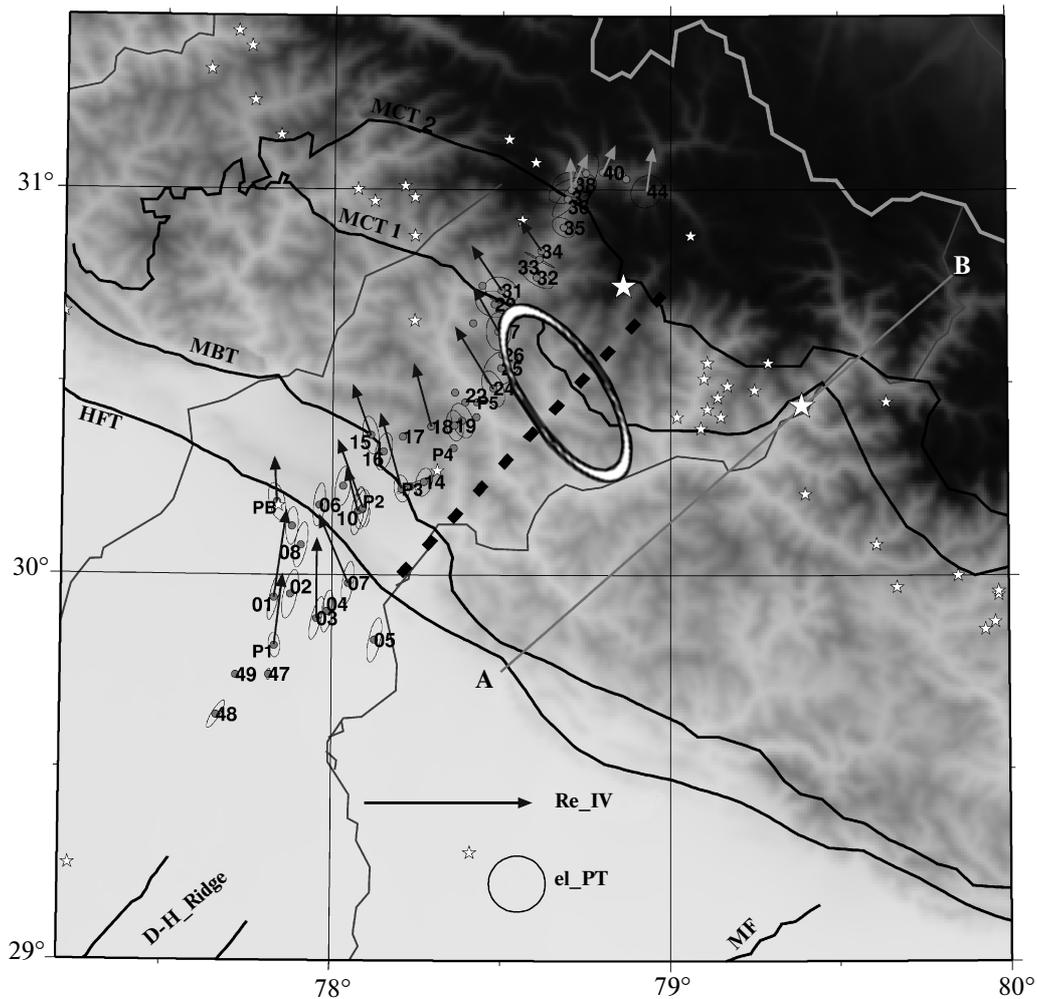


Рис. 8. Пространственное распределение действительных векторов индукции (в конвенции Wiese) и экстремальных эллипсов фазового тензора (по схеме СВВ) на периоде 724 с по материалам расширенного ансамбля МТ/МВ данных профиля Рурки–Ганготри. Масштабы векторов и осей фаз фазового тензора заданы единичной стрелкой и радиусом круга 90°. В дополнение к тектоническим линиям и сейсмичности HSB (по легенде рис. 1) показаны структуры плиты, идущие в крест к Гималаям: древний хребет Дели-Харидвар (D-H Ridge) и Морабадский разлом (MF). К востоку от профиля черной штриховой линией обозначено предполагаемое положение оси нижнекорового “транс-гималайского проводника”, Trans-Himalayan Conductor, ТНС (по [Aroa, Mahashabde, 1987]) и поведению индукционных векторов на профиле RG), а также линия сейсмомографических разрезов АВ, приведенных на рис. 7. Белым овалом обозначена предполагаемая область расположения эпицентра катастрофического ($M = 7-8$) Кумаюнского землетрясения 1803 г. между г. Шринагар и г. Уттаркаши.

Дальнейшие эксперименты с инверсиями различных подмножеств полного ансамбля данных в подобной “bootstrap”-манере предоставили ряд решений с близким удовлетворительным качеством подбора и высветили наиболее устойчиво определяемые геоэлектрические структуры. Результат осреднения на единой сетке 11-ти лучших решений сфокусировал эти аномалии, а его завершающая оптимизация на материалах полного бимодального ансамбля амплитудных и фазовых МТ данных (37 точек) обеспечила получение итогового распределения сопротивлений по линии профиля RG (рис. 7) с взвешенной (с учетом расширенных доверительных интервалов) оценкой

$RMS = 1.219$. Дальнейшее увеличение точности совместного подбора обоих подмножеств в рамках 2D-подхода ограничивала выявленная ранее несогласованность данных продольной и поперечной поляризации, по-видимому, обусловленная большей трехмерной искаженностью последних. Принятый компромиссный вариант итогового решения обеспечил им близкое удовлетворительное качество подбора (рис. 6) и наследовал преимущества инверсии данных каждой поляризации при разрешении принципиально важных двумерных структур – глубинного проводника изометричного сечения под МСТ (Ер) и верхнекорового изолятора над ним (Нр).

Анализ разрешения элементов геоэлектрического разреза Гарвальских Гималаев, проводившийся с помощью дополнительных частичных инверсий, стартующих от построенной итоговой модели, подтвердил вышеприведенные выводы. Поочередное использование данных каждой поляризации для дальнейшей оптимизации модели привело в обоих случаях к незначительным изменениям структуры приповерхностных структур и коровой аномалии под МСТ1, однако давало существенные различия в результатах инверсий на нижнекоровых горизонтах в центральной части профиля.

Можно заключить, что в полученном геоэлектрическом разрезе зоны субдукции Индийской плиты вдоль линии Рурки—Ганготри (рис. 1, рис. 7) уверенно выявляются: область приповерхностных проводящих (700 до 200 См) осадочных толщ южного участка профиля, секущего бассейн Ганга и Сивалик (вплоть до МВТ); подстилающее изолирующее основание на глубинах от 6 до 15 км с сопротивлениями от первых сотен до тысячи Омм; высокоомный массив в верхней коре Гарвальского Сейсмического Коридора (зона МСТ) и Высоких Гималаев с сопротивлениями 10000 Ом м и более, а также яркая проводящая область в средней-нижней коре под МСТ1 (интегральная проводимость 3000—4000 См), на глубине 25 км характеризующаяся наиболее низкими сопротивлениями (до 1 Ом м). Недостаточно разрешены намечающиеся коровые суб-вертикальные проводящие структуры на южном и северном концах профиля (разломные зоны?) и в областях присутствия трехмерно-искаженных данных (относительно слабый, полого погружающийся проводник на глубинах 25—30 км в Высоких Гималаях). Субгоризонтальную область относительно повышенной электропроводности в нижней коре под Сиваликом и Низкими Гималаями согласно вышеперечисленным доводам следует признать артефактом, порожденным влиянием проводящих структур коры к востоку от RG.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. Природа геоэлектрических аномалий

Анализ особенностей, выявленных в разрезе электропроводности по линии Рурки—Ганготри, будем вести в сопоставлении с имеющимися аналогичными построениями для других частей орогена, а также региональными сейсмическими данными по Гарвалу.

За последнее десятилетие в рамках комплексных международных геофизических проектов INDEPTH и HIMPROBE проводились исследования геоэлектрического строения Гималаев (главным образом, НН и ТН) и области их сочленения с Тибетским плато (шовная зона Индус-

Тсангпо, ITSZ). Их результаты, обобщенные в статьях [Unsworth et al., 2005; Arora et al., 2007], наряду с результатами ряда других экспериментов по МТ/МВ зондированиям (например, [Jin et al., 2007; Bai et al., 2010]) указывают на распространение в коре вышеуказанных областей и Тибетского плато слоя пониженных сопротивлений, маркируемого отражающими сейсмическими горизонтами и/или областями пониженных скоростей (по данным параллельных сейсмических исследований [Nelson et al., 1996; Caldwell et al., 2008; и др.]). Эти признаки в сочетании с обширной аномалией теплового потока в пределах плато [Hochstein, Regenauer-Liebr, 1998] и данными по составу базальтовых вулканитов с наибольшей вероятностью свидетельствуют о частичном расплаве коры [Li et al., 2003]. Процесс корового плавления, а также преобладание горизонтального растяжения в поле современных напряжений коры Тибета [Ni, Barazangi, 1984; Molner et al., 1993; Rebetzky, Alekseev, 2014] служат сильными аргументами в поддержку распространенной геодинамической гипотезы “*Channel flow*” [Tapponnier et al., 1982; Clark, Royden, 2000; и др.]. Согласно этой гипотезе, в формировании Тибетского плато на протяжении последних ~13 млн лет., главная роль принадлежит пластическому течению нижней коры, которое в совокупности с интенсивной муссонной денудацией южного склона НН служит также и главным механизмом эксгумации метаморфитов GHC, т.е. роста Гималаев [Beamont et al., 2001].

Менее представительны исследования геоэлектрического строения фронтальной зоны индийской субдукции, включающей Гималайские предгорья и Пояс Надвигов (НТВ): это результаты пионерского МТ профилирования в Центральном Непале [Lemonnier et al., 1999], аналогичного эксперимента в Сиккиме [Patro, Harinarayana, 2009], а также предшествующий нашему опыт воссоздания разреза сопротивлений по линии Рурки—Ганготри в Гарвальских Гималаях, представленный в статье [Israil et al., 2008].

В разрезе сопротивлений, полученном по данным 15 МТ зондирований в Непале, наряду с низкоомными приповерхностными толщами IGP и SW, впервые был обнаружен проводящий маркер МНТ под Низкими Гималаями, а также обширная аномалия низких сопротивлений на глубинах 15—35 км, непосредственно в пределах рамповой структуры поверхности детачмента [Lemonnier et al., 1999]. В работе [Patro, Harinarayana, 2009] описаны результаты анализа материалов 13 широкополосных зондирований в Восточных Гималаях, выявившего геоэлектрические отклики МФТ, МВТ и МНТ (под ЛН), а под геологически картируемым положением МСТ — яркую, но недостаточно разрешенную аномалию в верхней-нижней коре. Наконец, результаты [Israil et al., 2008] явно засвидетельствовали присутствие и в Гарвале

мощной зоны высокой электропроводности под топографическим фронтом Высоких Гималаев, тяготеющей к верхней коре зоны МСТ.

Имеющиеся различия в результатах этих профильных зондирований могут быть обусловлены как различиями в количестве и качестве материала, разрешающей способности примененных методов инверсии, так и вполне вероятной [Yin, 2006] локальной спецификой глубинных геоэлектрических разрезов трех областей Гималаев. Важны черты их объективного сходства, а также единая трактовка авторами всех трех исследований природы проводников в области пологого склона МНТ и его рампа как проявления концентрации водных флюидов, высвобождающихся сначала благодаря процессу уплотнения вовлеченных в субдукцию осадков, а затем – вследствие метаморфических реакций, протекающих в погружающейся плите.

Наиболее существенной для настоящего исследования чертой сходства трех разрезов представляется интенсивная аномалия электропроводности под зоной МСТ. Ее локализация на глубинах от 18–30 км в разрезе Непала [Lemonnier et al., 1999] в наибольшей степени соответствует новым результатам интерпретации расширенного ансамбля МТ данных по линии RG и допускает близость не только трактовки природы этой аномалии, но и возможных сейсмотектонических следствий. Хотя истинные размеры корового проводника остались в Непале недостаточно разрешенными, также как и в последней гарвальской модели его центр попадает в пределы рамповой структуры, а кластер микро- и умеренных ($m_b < 4$) сейсмических событий, в связи с которым в статье [Pandey et al., 1995] и была выдвинута гипотеза существования рампа МНТ, также закономерно приурочен к верхней кромке аномалии электропроводности (~15–18 км).

Локализация и размеры аномалии под МСТ на профиле Рурки–Ганготри хорошо верифицируются распределением сейсмичности Гарвальского Тектонического Коридора [Khattari, 1992; Wason et al., 1999; данные Геологической службы USA] (рис. 7). Асейсмичность (или относительно слабая сейсмичность) коровых проводников флюидной природы и тяготение землетрясений к пограничным областям соседних блоков-изоляторов – широко распространенное явление ([Gürer, Bayrak, 2007; Wang, Zhao, 2006; Sass et al., 2014; Nata et al., 2015; и др.], которое может быть связано в первую очередь с механической ослабленностью этих зон. Как правило, подобным проводящим зонам соответствуют аномалии пониженных сейсмических скоростей. Например, по Тянь-Шаню это видно при сопоставлении геоэлектрических [Sokolova et al., 2008; 2011; Рыбин, 2011] и сейсмических [Винник и др., 2006; Zhiwei et al., 2009] результатов.

В силу квазидвумерности морфоструктурных особенностей Гарвала результаты МТ зондирования на профиле RG могут быть соотнесены с результатами наблюдений широкополосных сейсмостанций по линии в крест Гималаев в 80 км к востоку (рис. 8). Глубинные распределения V_p , V_s и V_p/V_s , полученные в [Mukhopadhyay, Sharma, 2010] в процессе томографических инверсий данных региональной сейсмичности, демонстрируют инверсию скоростей от роста их значений на глубинах 0–18 км – к понижению на 18–35 км, где также наблюдается положительная аномалия V_p/V_s с экстремумом под линией МСТ1 (рис. 7). Обширная зона отрицательного контраста сейсмического импеданса выделена на этом профиле здесь же, под МСТ1, на глубинах 18–30 км по материалам томографии приемных функций для удаленных землетрясений [Calldwel et al., 2010, 2013]. В статье [Ashish et al., 2009] по данным того же массива сейсмостанций получены оценки сейсмического затухания по поверхностным Lg-волнам от региональных землетрясений, демонстрирующие падение Q на порядок под всей зоной МСТ и Высокими Гималаями. Авторы сейсмографических исследований трактуют свои результаты как свидетельства присутствия свободного водного флюида под поверхностью детачмента. [Ashish et al., 2000] высказывается предположение о связи аномального затухания с частичным плавлением корового вещества. Последнее нельзя исключить для средней коры под Высокими Гималаями (НН), принимая во внимание геодинамическую модель [Beamont et al., 2001], находящиеся с ней в согласии геоэлектрические данные по Тибетскому плато [Jin et al., 2007], а также проводящий (хоть и плохо разрешенный) характер разреза на СВ сегменте линии RG (рис. 7). Однако для недр зоны МСТ, плавление маловероятно: субдукция “холодной” плиты понижает геотермический градиент и термические модели [Cattin et al., 2001; Bollinger et al., 2006; Herman et al., 2010] оценивают температуру недр в области рампа в 300–450°, что недостаточно даже для “влажного” плавления.

Многочисленные горячие минеральные источники МСТ зоны Гарвала, а также изучение термометрии и флюидных включений в характерных для ее глубин метаморфитах [Sachan et al., 2001] свидетельствуют о том, что главную роль в формировании всех вышеперечисленных аномалий играют дегидратационные карбонатные флюиды. Накапливаясь по мере метаморфических преобразований в погружающейся плите, они могут значительное время оставаться на среднекоровых глубинах под непроницаемыми покрывками blastomylonites сдвиговой зоны и высвобождаются в моменты крупных сейсмических событий, как, например, во время исторического 1803 г. Кумаюнского землетрясения (рис. 1, рис. 8), когда на громадную территорию Гарвала-Кумаюна вода из глубин

изливалась в течение длительного времени [Rajendran et al., 2013].

Принимая эту правдоподобную гипотезу и заданные итоговой геоэлектрической моделью Гарвала (рис. 7) геометрию, размеры и величину интегральной проводимости аномалии под МСТ1 ($H \approx 10$ км, $S \approx 4000$ См), можно оценить удельную электропроводность в аномальной области как $\sigma^{уд} \approx 0.4$ См/м, а на ее основе — некоторые физико-механические параметры литосферы. Так, с опорой на приведенные в [Li et al., 2003] данные об электропроводности различных коровых флюидов при характерных для Гарвала температурах на глубинах 20–30 км и зависимость удельной электропроводности $\sigma^{уд}$ двухфазного агрегата “флюид–вмещающая порода” от связанной пористости η , при $\rho^{породы} = 2000$ Ом м минимальная величина η оценивается диапазоном значений 0.5–2%. Полученные значения могут быть верифицированы оценками η по падению сейсмических скоростей и приняты во внимание при уточнении расчетов потери прочности плиты в области ее крутой флексуры под топографической ступенью НН. Ранее падение прочности плиты на изгиб (*flexural rigidity*), выявленное на этом участке Гималайского Пояса Взбросов по гравиметрическим и сейсмологическим данным, объяснялось только за счет потери литосферой ее эффективной эластической мощности под воздействием повышающейся температуры [Lyon-Caen, Molnar, 1985; Caldwell et al., 2013].

5.2. Структурная приуроченность геоэлектрических аномалий

и сейсмотектонические следствия их анализа

На разрезе электропроводности Гарвала по профилю RG (рис. 7) представлен обоснованный с позиций геоэлектрики вариант проведения глубинных тектонических линий этого сегмента Гималайского Пояса Надвигов. Образы НФТ, МВТ, МСТ1 выделяются по контрастам электропроводности на глубине или же начиная с поверхности (для МВТ, надвигающего метаосадки ЛН на молассу SW). МСТ2 слабо проявлен из-за недостаточного разрешения МТ инверсии на высокогорном участке профиля, однако намечен по поведению индукционных векторов (рис. 3в). Подтверждается “flat-ramp-flat” геометрия МНТ, принятая и для других сегментов дуги [Pandey et al., 1995; Nelson et al., 1996; Cattin et al., 2001; и др.]. Первый пологий участок МНТ на глубинах от 6 до 15–17 км проводится по кровле изолирующего основания под осадочными комплексами Индо-Гангской плиты, Внешних и Низких Гималаев, а второй — на глубинах ~25–30 км под зоной МСТ и НН — по нижней кромке намеченного проводящего маркера сдвиговой зоны, по-видимому, содержащей флюиды. Выделяющиеся пологие участки соединяют-

ся рамповой структурой, в которую МСТ1 уходит своими корнями, отмеченными крутопадающим проводником в верхах разреза. Крупная аномалия, обсуждаемая выше, приурочена к области рампа, что переключается с геоэлектрическим разрезом Непала [Lemonnier et al., 1999]. Рисовка разломных структур на глубине синтезирует идеи [Seeber et al., 1981] (*Basement Thrust*) и [Pandey et al., 1995] (*Ramp*) и, скорее, соответствует кинематической модели взброса по активной зоне МСТ, “нарушающего последовательность” (*Out-of-Sequence Thrusting*), чем дает какие-либо свидетельства в пользу другой дебатированной неотектонической модели — аккреции материала поверхности плиты к висящему крылу МНТ (*Duplexing*) [Herman et al., 2010].

Как показывают актуальные исследования региональной сейсмичности [Roy, Mondal, 2012; Mahesh et al., 2013] главные сейсмогенерирующие структуры Гарвала связаны с мегавзбросами НТВ в их сопряжении с активными разломами меньшего масштаба. Верхний пологий участок МНТ, кровля изолирующего основания (рис. 7), практически совпадает и с сейсмологически определяемой поверхностью детачмента, т.к. именно к нему в местах сопряжения с неотектоническими структурами НФТ и МВТ приурочены гипоцентры землетрясений $m_b > 3$. Эта участок взбросовой зоны (“*locked part*”), на котором упругая энергия фрикционного сцепления высвобождается средними и крупными землетрясениями, заканчивается проводником рамповой структуры, угол наклона которой в геоэлектрической трактовке оказался близок к углам падения плоскостей смещения землетрясений под МСТ [Ni, Barazangi, 1984]. К рамповой структуре — “мега-шероховатости” МНТ — приурочен кластер микросейсмичности, обусловленный накоплением напряжений на нижнем окончании “зажатого” участка МНТ в период между крупными землетрясениями [Bollinger et al., 2004; Pandey et al., 1995].

Разрез сопротивлений RG выявляет ассоциацию кластера микросейсмичности Гарвальского Тектонического Коридора с верхнекоровым изолирующим жестким блоком (метаморфиты зоны МСТ). Он расположен непосредственно над асейсмичной зоной в средней коре, ниже которой находится кластер гипоцентров сейсмических событий большей магнитуды ($m_b > 3$). Уточненная локализация крупного проводника флюидной природы, помещающая его в область между двумя пологими участками МНТ, объясняет относительную асейсмичность зоны рампа. Эта характерная особенность рампа отмечается также и на других участках орогена [Monsalve et al., 2006; Schulte-Pelkum et al., 2005] и может объясняться комплексом причин, вызывающих резкое ослабление прочности плиты в области ее крутой флексуры [Lyon-Caen, Molnar, 1985; Cattin et al., 2001], включая возможную флюидизацию. Последнее для Не-

пальского сегмента Гималаев подтверждается данными по электропроводности [Lemonnier et al., 1999].

Результаты зондирований Рурки–Ганготри позволяют судить также и о некоторых специфических особенностях модели сейсмогенерации Гарвала за пределами линии профиля. Напомним, что ранние магнитовариационные исследования [Lilley et al., 1981; Agora, Mahashabde, 1987] намечали аномальнопроводящий коровый объект, Транс-Гималайский проводник (ТНС), на траверсе хребта Дели-Харидвар к востоку от линии современного профиля RG (рис. 8). Была выдвинута гипотеза о его генетической связи с активизацией раннепротрозойского складчатого пояса Аравали. Процесс активизации подтверждается рядом фактов, включая данные о повышенном тепловом потоке и существование линейно-упорядоченного вдоль хребта кластера горячих источников [Roy, Rao, 2000; Hochstein, Regenauer-Lieb, 1998]. Свидетельства неотектонической переработки литосферы СЗ кратона находят и в аномалиях низких V_s для верхней мантии при анализе приемных функций [Kosarev et al., 2013].

Мобилизированные структуры хребта Дели-Харидвар (СВ продолжение Аравали) можно сегодня проследить под Гангским предгорным прогибом и далее в зону Гималайского Пояса Надвигов по материалам о распределении сейсмичности [Lyubushin et al., 2010; Roy, Mondal, 2012; Mahesh et al., 2013г]. О кластеризации сейсмичности на флангах выявляемого ТНС говорилось уже в статье [Agora, Mahashabde, 1987], где подчеркивалась важность учета этой структуры при сейсмостектонических построениях, однако дальнейшее ее изучение так и не получило развития. Предположение о локализации ТНС (рис. 8) осталось на уровне гипотезы; и на первом этапе интерпретации МТ данных профиля RG ([Israil et al., 2008]) соседство с этим проводником не анализировалось, а след проводника на глубине 30 км под Низкими Гималаями не был объяснен.

Недавнее пополнение ансамбля данных зондирований профиля RG коллекцией магнитовариационных откликов позволило выявить западную девиацию действительных векторов индукции на длинных периодах (рис. 3в, рис. 8) и идентифицировать область повышенной электропроводности средней коры в центральной части разреза как артефакт, вызванный 3D искажениями от объектов вне профиля. Эти факты можно признать дополнительными свидетельствами в поддержку гипотезы существования Транс-Гималайского Проводника. Ее подтверждают также и современные сейсмологические данные. Продемонстрированное в статье [Mukhopadhyay, Sharma, 2010] существование относительно асейсмичного участка, прерывающего на интервале 78.5° – 79° ВД полосу концентрации эпицентров в Гарвальском Текто-

ническом Коридоре, хорошо согласуется с материалами сейсмического каталога GS USA (рис. 1) и может свидетельствовать об ослабленной (флюидизированной/частично расплавленной, пониженного сопротивления?) зоне, секущей HSB на глубине. Выделение линеамента концентрации эпицентров землетрясений, уходящего по траверсу Дели–Харидвар–Шамоли (близкому к направлению ТНС) в Тибетские Гималаи через STD и включающего землетрясения со сдвиговой компонентой механизма очага [Mahesh et al., 2013], говорит об активизации в Гарвале транс-гималайской тектоники, что согласуется с геологическими выводами [Khattri, Tyagi, 1983]. Наконец, представляется неслучайной приуроченность к области ТНС великого Кумаюнского землетрясения 1803 г., предполагаемое положение эпицентра которого (рис. 8) согласно обобщениям [Rajendran et al., 2013] лежит между Шринагаром и Уттаркаши.

Достоверная локализация ТНС и изучение его параметров важны для построения адекватной модели региональной сейсмогенерации Гарвала, так как уже сегодня ясна роль активизированных трансгималайских структур в подготовке сегментации дуги Гималаев на этом участке “сейсмической брешии” [Mahesh et al., 2013]. Упомянутые выше материалы, говорящие о зарождении этого процесса в Гарвале, находят определенные соответствия с сейсмологическими свидетельствами “разрыва” дуги Гималаев в Восточном Непале, где единым кластером сейсмичности выделяется крупный разлом, секущий мегавзбросы НТВ, сопряженный с ним линеament в Гималаях Тетиса и рифт ССВ простираения в Тибетском плато [Vin, 2006; Monsalve et al., 2006].

Изучение сложной 3D-геоэлектрической структуры Гарвальских Гималаев будет углубляться по мере поступления материалов новых зондирований IRT на начатом субширотном профиле через зону ТНС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электромагнитные зондирования на профиле Рурки–Ганготри осуществлялись в сложных условиях высокогорья Гарвальских Гималаев и плотно заселенной Индо-Гангской равнины. С помощью современных методов обработки, анализа и адекватной интерпретации этого уникального материала удалось получить достоверные сведения о квазидвумерных геоэлектрических структурах Гарвала, а также начальные представления о некоторых трехмерных чертах распределения глубинной электропроводности региона. Проведенная кросс-верификация геоэлектрических и сейсмических образов глубинного разреза Гарвала, выявившая хорошую корреляцию их наиболее ярких особенностей, приводит к следующим выводам, важным для изучения процессов сейсмогенерации на изучаемом отрезке горной

дуги и моделирования субдукции Индийской плиты.

1. Построенный разрез сопротивлений Гарвала позволяет представить обоснованный с позиций геоэлектрики вариант проведения глубинных тектонических линий Пояса Надвигов: подтверждается гипотеза “*flat-ramp-flat*” геометрии Главного Гималайского Надвига (МНТ), локализуется положение резкого увеличения угла его падения (области рампа), а также Фронтального, Граничного и Центрального Надвигов (МВТ, МСТ1,2).

2. Накопление карбонатных растворов, продуктов дегидратации пород погружающейся плиты, является наиболее вероятным объяснением геоэлектрической и сейсмической аномалий, ассоциированных с рамповой структурой МНТ. Как свидетельствует пример обширного излияния во время исторического Кумаюнского землетрясения 1803 г., длительность резиденции флюида на среднекоровых глубинах может быть оценена временными интервалами между крупными землетрясениями (порядка десятков-сотен лет).

3. В разрезе идентифицируются сейсмогенерирующие зоны: верхний пологий участок МНТ и изолирующие, жесткие, блоки в зоне МСТ над и под асейсмичной областью флюидизированной, механически ослабленной средней коры. Таким образом, вероятное присутствие флюида в средней коре является фактором, с которым в том числе может быть связано бимодальное глубинное распределение коровой сейсмичности, наблюдаемое и на других сегментах Сейсмического Пояса Гималаев.

4. В данных расширенного ансамбля МТ/МВ передаточных функций на профиле Рурки–Ганготри проявлены отклики корового проводника, расположенного на его восточном фланге, вероятно, Транс-Гималайского Проводника, обнаруженного первыми магнитовариационными съемками в Гарвале. Предстоит дальнейшее изучение этой важной, но еще неразрешенной структуры, связываемой с процессами активизации трансгималайских структур кратона и готовящейся сегментацией дуги орогена. В результате 3D-ЭМ моделирования получены первые указания, подтверждающие гипотезу ТНС [Sokolova et al., 2014]. Продолжение этих исследований становится особенно актуальным после представления китайскими геоэлектриками первых результатов инверсии данных массива МТ зондирования проекта “SinoProbe”, выявляющих доминанту региональных проводников ССВ простирания в распределении электропроводности нижней коры Тибетского плато [Wei et al., 2015].

5. Сопоставление построенных моделей электропроводности Гарвальских Гималаев с актуальными геоэлектрическими моделями находящегося на периферии Индо-Евразийской коллизии

Тянь-Шаня [Sokolova et al., 2007; 2011; Бердичевский и др., 2010; Рыбин, 2011], служащего для российских исследователей главным полигоном изучения областей активного горообразования, позволило сделать ряд важных структурных и сейсмотектонических обобщений. В их числе — отмеченная в обоих регионах связь аномалий повышенной электропроводности с зонами пониженных сейсмических скоростей (механически ослабленной коры); кластеризация гипоцентров землетрясений в изолирующих блоках вблизи их контактов с соседними проводниками. Методически важным также стало полученное обобщение представлений о характере 3D искажений МТ/МВ данных неоднородностями за пределами профиля и о способах их диагностики.

Авторы глубоко благодарны школе М.Н. Бердичевского — пионера и вдохновителя российских исследований высокогорных регионов геоэлектрическими методами, полевым геофизикам ПТР и ООО “МГУ Геофизика” за их большой труд по постановке зондирований в тяжелых условиях Гималаев, участнику ранней стадии российско-индийского проекта, И.М. Варенцову, внесшему основной вклад в разработку программных продуктов, использованных при анализе МТ/МВ данных на профиле RG, а также глубокоуважаемым рецензентам за ценные замечания.

Исследования проводились при поддержке двусторонних грантов РФФИ-DST (Индия) №10-05-92661, 13-05-92699.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 679 с.
- Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов И.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 МТ и МВ откликов вдоль геотраверса НАРЫН // Физика Земли. 2010. № 8. С. 36–53.
- 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., 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 И.М.* Прагматическая 2D инверсия синхронных ансамблей МТ/МВ откликов. Мат-лы V Всерос. школы-семинара им. Бердичевского М.Н., Ваньяна Л.Л. по ЭМ зондированию Земли. Т. 2. СПб.: СПбГУ. 2011. С. 17–21.

- Винник Л.П., Алешин И.М., Кабанов М.К., Киселев С.Г., Косарев Г.Л., Орешин С.И., Райгбер К.* Кора и мантия Тянь-Шаня по данным томографии приемных функций // *Физика Земли*. 2006. № 8. С. 14–26.
- Иванов П.В., Пушкарев П.Ю.* Возможности интерпретации магнитотеллурических данных, полученных на одиночном профиле при изучении трехмерно-неоднородной среды // *Физика Земли*. 2010. № 9. С. 3–10.
- Рыбин А.К.* Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. М.: Научный мир. 2011. 252 с.
- Arora B.R., Mahashabde M.V.* A transverse conductive structure in the northwest Himalaya // *PEPI*. 1987. 45. P. 119–127.
- Arora B.R., Unsworth J.M., Rawat G.* Deep resistivity structure of the northwest Indian Himalaya and its tectonic implications // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L04307 (1–4).
- Ashish P.A., Rai S.S., Gupta S.* Seismological evidence for shallow crustal melt beneath the Garhwal High Himalaya, India: implications for the Himalayan channel flow // *Geophys. J. Int.* 2009. 177(3). P. 1111–1120.
- Bai D., Unsworth M.J., Meju M.A., Ma X., Teng J., Kong X., Sun Y., Sun J., Wang L., Jiang C., Zhao C., Xiao P., Liu M.* Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging // *Nature Geoscience Lett.* 2010. DOI: 10.1038/NCEO830
- Baumont C., Jamieson R.A., Nguyen M.H., Lee B.* Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation // *Nature*. 2001. 414. P. 738–742.
- Bilham R., Gaur V.K., Molnar P.* Himalayan Seismic Hazard // *Science*. 2001. V. 293. P. 1442–1444.
- Bollinger L., Avouac J.P., Cattin R., Pandey M.R.* Stress build-up in the Himalaya // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109 (November (B11)). B11405. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002911>
- Bollinger L., Henry P., Avouac J.* Mountain building in the Nepal Himalaya: thermal and kinematic model // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 244(1–2). P. 58–71.
- Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown.* The magnetotelluric phase tensor // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 158. P. 457–469.
- Caldwell W.B., Klemperer S.L., Rai S.S., Lawrence J.F.* Partial melt in the upper-middle crust of the northwest Himalaya revealed by Rayleigh wave dispersion // *Tectonophysics*. 2009. 477. P. 58–65.
- Caldwell W.B., Klemperer S.L., Lawrence J.F., Rai S.S.* Receiver function imaging in the western Himalaya. Proceedings for the 25th Himalaya-Karakoram-Tibet Workshop: U.S. Geological Survey. 2010. Open-File Report 2010–1099. 2 p.
- Caldwell W.B., Klemperer S.L., Rai S.S., Lawrence J.F., Ashish.* Characterizing the Main Himalaya Thrust in the Garhwal Himalaya, India with receiver function CCP stacking // *E.P.S. Lett.* 2013. V. 367. P. 15–27.
- Cattin R., Martelet G., Henry P., Avouac J.P., Diament M., Shakya T.R.* Gravity anomalies, crustal structure and thermo-mechanical support of the Himalaya of Central Nepal // *GJI*. 2001. V. 147. № 2. PP. 381–392. DOI: 10.1046/j.0956-540x.2001.01541.
- Clark M.K., Royden L.H.* Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow // *Geology*. 2000. V. 28. P. 703–706.
- Gupta G., Gokarn S.G., Singh B.P.* Thickness of the Siwalik Sediments in the Mohand-Ramnagar region using magnetotelluric studies // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1994. V. 83. P. 217–224.
- Gürer A., Bayrak M.* Relation between electrical resistivity and earthquake generation in the crust of West Anatolia, Turkey // *Tectonophysics*. 2007. V. 445. P. 49–65.
- Hata M., Oshiman N., Yoshimura R., Tanaka Y., Uyeshima M.* Three-dimensional electromagnetic imaging of upwelling fluids in the Kyushu subduction zone, Japan // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2015. V. 120. DOI: 10.1002/2014JB011336.
- Herman F., Copeland P., Avouac J.-P., Bollinger L., Maheo G., Le Fort P., Rai S., Forster D., Pecher A., Stuwe K., Henry P.* Exhumation, crustal deformation, and thermal structure of Nepal Himalaya derived from inversion of thermochronological and termobarometric data and modeling of the topography. 2010 // *JGR*. V. 115. B06407. DOI: 10.1029/2008JB006126.
- Hochstein M.P., Regenauer-Liebr K.* Heat generation associated with collision of two plates: the Himalayan geothermal belt // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 1998. V. 83. P. 75–92.
- Hyndman R.D., Shearer P.M.* Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results // *GJI*. 1989. V. 98. P. 343–365.
- Jin Sheng, Ye Gaofeng, Wei Wenbo, Deng Ming, Jing Jian'en.* Electrical Structure and Fault Features of Crust and Upper Mantle beneath the Western Margin of the Qinghai-Tibet Plateau // *J. China University of Geosciences*. 2007. V. 18. № 4. P. 326–333.
- Israil M., Tyagi D.K., Gupta P.K., Sri Niwas.* Magnetotelluric investigations for imaging electrical structure of Garhwal Himalayan corridor, Uttarakhand, India // *J. Earth Syst. Sci.* 2008. V. 117. № 3. P. 189–200.
- Kayal J.R.* Microearthquake seismology and seismotectonics of South Asia. Capital Publishing Company. New Delhi. 2008. 503 p.
- Khattri K.N., Tyagi A.R.* The transverse tectonic features in Himalaya // *Tectonophysics*. 1983. V. 96(1/2). P. 19–29.
- Khattri K.N.* Great EQs, seismicity gaps and potential for EQ disaster along the Himalaya plate boundary // *Tectonophysics*. 1987. V. 138. P. 79–92.
- Khattri K.N.* Local seismicity investigations in the Garhwal-Kumaon Himalaya // *Mem. Geol. Soc. India*. 1992. V. 23. P. 45–66.
- Kirbi S.H.* Rheology of the lithosphere // *Rev. Geophys. Space Phys.* V. 21(6). 1983. P. 1458–1487.

- Kohlstedt D.L., Evans B., Mackwell S.J.* Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments // *J. Geophys. Res.* V. 100(B9). 1995. P. 17587–17602.
- Kosarev G.L., Oreshin S.I., Vinnik L.P., Kiselev S.G., Datatrayam R.S., Suresh G., Baidya P.R.* Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent // *Tectonophysics*. 2013. V. 592. P. 175–186.
- Kurtz R.D., De Laurier J.M., Gupta J.C.* A Magnetotelluric Sounding across Vancouver Island Detects the Subducting Juan de Fuca Plate // *Nature*. 1986. № 321. P. 596–599.
- Lemonnier C., Marquis G., Perrier F., Avouac J.P., Chitrakar G., Kafle B., Sapkota S., Gautam U., Tiwari D., Bano M.* Electrical structure of the Himalaya of central Nepal: high conductivity around the midcrustal ramp along the MHT // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 3261–3264.
- Li S., Unsworth M.J., Booker J.R., Wenbo W., Tan H., Jones A.G.* Partial melt or aqueous fluids in the Tibetan crust: constraints from INDEPTH magnetotelluric data // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 153. P. 289–304.
- Lilley F.E.M., Singh B., Arora B.R., Srivastava B.J., Prasad S.N., Sloane M.N.* A magnetometer array study in northwest India // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1981. V. 25. P. 232–240.
- Lyon-Caen H., Molnar P.* Gravity anomalies, flexure of the Indian plate, and the structure, support and evolution of the Himalaya and Ganga basin // *Tectonics*. 1985. № 4(6). P. 513–538.
- Lyubushin A.A., Arora B.R., Kumar Naresh.* Investigation of seismicity in western Himalaya // *Geophy. Research*. 2010. V. 11(1). P. 27–34.
- Mahesh P., Rai S.S., Sivaram K., Paul A., Sarma P.R., Gaur V.K.* One dimensional reference velocity model and precise location of earthquake hypocentres in Central Himalaya // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2013. V. 103. DOI: 10.1758/0120110328.
- Molnar P., Tapponnier P.* Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // *Science*. 1975. V. 189. P. 419–426, doi:10.1126/science.189.4201.419.
- Molnar P.* A review of the seismicity and the rate of active underthrusting and deformation at the Himalaya // *J. Himalayan Geol.* 1990. № 1(2). P. 131–154.
- Molner P., Ingrand P., Martinod J.* Mantle dynamics, Tibetan uplift and Monsoon // *Review of Geophysics*. 1993. V. 31. № 4. P. 357–397.
- Monsalve G., Sheehan A., Schulte-Pelkum V., Rajaure S., Pandey M.R., Wu F.* Seismicity and one dimensional velocity structure of the Himalayan collision zone: Earthquakes in the crust and upper mantle // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. B10301, DOI: 10.1029/2005JB004062.
- Mukhopadhyay S., Sharma J.* Crustal scale detachment in the Himalayas: a reappraisal // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 183. P. 850–860.
- Nabelek J., Hetenyi G., Vergne J., Sapkota S., Kafle B., Jiang M., Su H., Chen J., Huang B.* The Hi-CLIMB Team. Underplating in the Himalaya–Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment // *Science*. 2009325 (September (5946)). P. 1371–1374.
- Nelson K.D. et al.* Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH results // *Science*. 1996. V. 274. P. 1684–1687.
- Nesbitt B.* Electrical resistivities of crustal fluids // *JGR*. 1993. V. 98. № B3. P. 4301–4310.
- Ni J., Barazangi M.* Seismotectonics of the Himalayan collision zone: geometry of the underthrusting Indian Plate beneath the Himalaya // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 9 (B2). P. 1147–1163.
- Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L., Prakasam K.S., Rai S.S., Makeyeva L., Savvin Y.* Crust and mantle beneath Western Himalaya, Ladakh and Western Tibet from integrated seismic data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. V. 271(1–4). P. 75–87.
- Pandey M.R., Tandukar R.P., Avouac J.P., Lavé J., Massot J.P.* Interseismic strain accumulation on the Himalayan crustal ramp (Nepal) // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22 (7). P. 751–754.
- Patro P.K., Harinarayana T.* Deep geoelectric structure of the Sikkim Himalayas (NE India) using magnetotelluric studies // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2009. V. 173. P. 171–176.
- Paul J., Burgmann R., Gaur V.K.* The motion and active deformation of India // *G.R.L.* 2001. V. 28. P. 647–650.
- Rajendran C.P., Rajendran K., Sanwal J., Sandiford M.* Archeological and Historical Database on the Medieval Earthquakes of the Central Himalaya: Ambiguities and Inferences // *Seismological Research Letters* V. 84. № 6. 2013. P. 1098–1108. DOI: 10.1785/0220130077.
- Rebetsky Yu.L., Alekseev R.S.* The field of recent tectonic stresses in Central and South Eastern Asia // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. V. 5(1). P. 257–290. DOI: 10.5800/GT201450127.
- Roy P.N.S., Mondal S.K.* Multifractal analysis of earthquakes in Kumaun Himalaya and its surrounding region // *J. Earth syst. Sci.* 2012. V. 121. № 4. P. 1033–1047.
- Roy S., Rao R.U.M.* Heat flow in the Indian shield // *JGR*. 2000. V. 105. № B11. P. 25.587–25.604.
- Sachan H.K., Sharma R., Sahai A., Gururajan N.S.* Fluid events and exhumation history of the main central thrust zone Garhwal Himalaya (India) // *J. Asian Earth Sci.* 2001. V. 19. P. 207–221.
- Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu.* Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tian Shan // *Geophys. J. Int.* 2014. V. 198. P. 564–579. DOI: 10.1093/gji/ggu146.
- Seeber L., Armbruster J., Quittmeyer R.C.* Seismicity and continental subduction in the Himalayan arc // In: *Zagros–Hindukush–Himalaya Geodynamic Evolution* (eds.) Gupta H. and Delany F. American Geophysical Union, Geodynamics Series. 1981. V. 3. P. 215–242.
- Schulte-Pelkum V., Monsalve G., Sheehan A., Pande M.R., Sapkota S., Bilham R., Wu F.* Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya // *Nature*. 2005. V. 435(7046). P. 1222–1225.

- Smirnov M.Yu.* Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 152. P. 1–7.
- Srivastava P., Mitra G.* Thrust geometries and deep structure of the outer and lesser Himalaya, Kumaon and Garhwal (India): implications for evolution of the Himalayan fold-and-thrust belt // *Tectonics*. 1994. V. 13(1). P. 89–109.
- 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”*. Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam, Germany. 2007. P. 132–141.
- Sokolova E.Yu., Naryn W.G.* Deep geoelectrical images of distant and frontal effect zones of the India-Eurasia collision. Proc. of “International Seminar on Recent Advances in Geosciences”, ISM, Dhanbad (India). 2011. P. 305–308.
- Sokolova E., Israil M., Golubtsova N., Gupta P., Pushkarev P., Cherevatova M., Smirnov M.* Contribution of crustal conductivity data on Garhwal Himalaya to the understanding of regional seismogenic and geodynamic patterns. Abstract 134I, 22nd EM Induction Workshop Weimar, Germany, August 24–30, 2014.
- Tapponnier P., Peltzer G., Le Dain A., Armijo R., Cobbold P.* Propagating extrusion tectonics of Asia, new insights from simple experiments with plasticine // *Geology*. 1982. V. 10. P. 611–616.
- Tullis J., Yund R., Farver J.* Deformation-enhanced fluid distribution in feldspar aggregates and implication for ductile shear zones // *Geology*. 1996. V. 24. № 1. P. 63–66.
- Unsworth M.J., Jones A.G., Wei W., Marquis G., Gokarn S.G., Spratt J.E.* INDEPTH-MT Team. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data // *Nature*. 2005. V. 438. P. 78–81.
- Wang Z., Zhao D.* Seismic evidence for the influence of fluids on the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake in southwest Japan // *PEPI*. 2006. V. 155. P. 313–324.
- Wason H.R., Kumar J., Walia S.K.* Local seismicity of the Garhal Himalaya subsequent to the Uttarakashi earthquake of October 20 (1991) // *Gondawana Research Group Mem.* 1999. № 6. P. 335–340.
- Wei W., Zhang L., Ye G., Jin S., Jing J., Dong D., Xie C., Yin Y., Wang G., Guo Z.* Three dimensional electrical structure of the crust and upper mantle of the Tibetan plateau – preliminary results from SinoProbe Magnetotelluric Array Data. 12th China Int. Geo-EM Workshop (Proceedings). Changsha, China. 2015. P. 346.
- Valdiya K.S.* Geology of Kumaun Lesser Himalaya. Wadia Institute of Himalayan Geology, Dehradun. 1980. 291 p.
- Varentsov I.V., 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 I.V.* Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data. Electromagnetic sounding of the Earth’s interior. Methods in geochemistry and geophysics. V. 40. / Ed. Spichak V.V. Elsevier. 2007. P. 189–222.
- Yin A.* Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation // *Earth-Sci. Rev.* 2006. V. 76(1–2). P. 1–131.
- Zhiwei Li, Steve Roecker, Li Zhihai b, Wei Bin, Wang Haitao, Gennady Schelochkov, Vitaly Bragin.* Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from the MANAS broadband deployment: Possible evidence for lithospheric delamination // *Tectonophysics*. V. 477. 2009. P. 49–57.