

На правах рукописи

Рыбин Анатолий Кузьмич

**Глубинная геоэлектрическая структура
литосферы Центрального Тянь-Шаня**

**Специальность: 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2011

**Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Научная станция РАН в г. Бишкеке**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент
РАН

Мартышко Петр Сергеевич,
Учреждение Российской академии наук Институт геофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург

доктор физико-математических наук

Федоров Евгений Николаевич,
Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им.
О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Шаров Николай Владимирович,
Учреждение Российской академии наук Институт геологии КарНЦ РАН,
г. Петрозаводск

Ведущая организация:

**Учреждение Российской академии наук Институт нефтегазовой
геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения
РАН (ИНГГСО РАН, г.Новосибирск)**

Защита состоится «20» октября 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.001.01, созданного при Учреждении Российской академии наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) по адресу: 123995, ГСП-
5, г. Москва Д-242, Б. Грузинская ул., 10, ИФЗ РАН, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



О. В. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Представляемая работа является результатом научного поиска возможностей использования естественных электромагнитных геофизических полей для изучения и анализа глубинного строения сложно построенных геологических объектов на примере Центрального Тянь-Шаня. Эта работа берет свое начало с середины 80-х годов прошлого столетия с момента организации и создания на базе Научной станции РАН комплекса глубинных электромагнитных исследований на территории Тяньшанского региона в рамках развернутой тогда союзной программы создания сейсмопрогностических полигонов в Средней Азии с использованием МГД-генераторов. Впервые в Советском Союзе осуществлялся столь широкомасштабный геофизический эксперимент с использованием методов магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования (МТЗ-МВЗ) для изучения глубинного строения такого сложного сейсмоактивного региона, каким является Тянь-Шань. Дальнейшее развитие тяньшанского комплекса глубинных электромагнитных исследований шло по пути создания высокоточной измерительной аппаратуры, позволяющей более точно и устойчиво определять магнитотеллурические и магнитовариационные характеристики, разработки новых программных средств обработки и моделирования результатов электромагнитных зондирований, совершенствования и внедрения новых методик интерпретации данных глубинной геоэлектрики.

Можно считать, что в настоящее время на территории Тянь-Шаня создан и успешно функционирует экспериментально-методический «полигон» электромагнитных зондирований с естественными полями, где российские и зарубежные геофизики имеют все необходимые научно-технические ресурсы для разработки, апробации и внедрения современных конкурирующих методик регистрации, обработки, анализа и интерпретации материалов электромагнитных зондирований активных горных областей. В результате сложилась творческая научная лаборатория для решения этих задач, в состав которой входят сотрудники Научной станции РАН, Центра геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, кафедры геофизики геологического факультета МГУ, Калифорнийского университета в Риверсайде, Центра наук о Земле в Потсдаме.

В создании тяньшанского «электромагнитного полигона» самое активное участие принимал автор (на первом этапе как один из основных исполнителей, а затем в качестве руководителя этих работ).

Объектом исследования данной работы является внутреннее строение литосферы Центрального Тянь-Шаня на различных пространственных масштабных уровнях, определяемое по результатам глубинных электромагнитных зондирований и анализируемое на предмет выявления современных геодинамических процессов, протекающих в земной коре и верхней мантии региона.

Актуальность. В настоящее время глубинная магнитотеллурика, в основе которой лежит анализ вариаций естественного электромагнитного поля Земли, является одним из ведущих разделов общей и прикладной геофизики. Магнитотеллурические исследования дают возможность изучения электрических свойств коры и мантии, тем самым вносят существенный вклад в понимание глубинного строения и физического состояния земных недр. Геоэлектрические образы строения глубинных горизонтов позволяют проследивать разломные зоны, диагностировать области повышенной пористости и флюидонасыщенности (в том

числе, частичного плавления), и, таким образом, дают дополнительные данные для анализа геодинамических гипотез, предлагаемых другими методами. Особая роль изучения электрических свойств земной коры и мантии обусловлена возможностью дополнительного разрешения внутренней структуры Земли в комплексе с сейсмотомографическими и сейсмическими исследованиями.

Геоэлектрические построения, рассматриваемые в работе, опираются, в первую очередь, на материалы комплексного использования метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и метода магнитовариационного зондирования (МВЗ). Автору, совместно с учеными МГУ и ЦГЭМИ ИФЗ РАН, принадлежат пионерские работы в развитии данного направления в современных условиях.

В геоэлектрических условиях горного Тянь-Шаня на первый план выступает задача “борьбы” с горизонтальными геоэлектрическими неоднородностями верхних слоев, существенно искажающих глубинную информацию. Как и в других геофизических полях, ситуация в магнитотеллурике осложнена тем, что на поверхности Земли мы имеем интегральный электромагнитный отклик, включающий в себя совместное влияние неоднородностей как локального, так и регионального масштабов. Разработка и применение методики количественной интерпретации магнитотеллурической информации в условиях сильного искажающего влияния приповерхностных геоэлектрических неоднородностей были первоочередной задачей в глубинных электромагнитных исследованиях Тяньшанского региона.

На первом этапе исследований эту задачу удалось решить с помощью разработанного трехуровневого алгоритма инверсии магнитотеллурических данных с опорой на мало искаженные приповерхностными неоднородностями магнитовариационные параметры. В результате были построены первые геоэлектрические модели вдоль пройденных геотраверсов [Трапезников и др., 1997]. Была показана возможность квазидвумерной интерпретации данных по отдельным профилям на фоне региональной смены простирания геоэлектрических структур от широтного направления в центральной части изучаемой области - к субширотному (80° - 260°) на востоке. Таким образом, были выявлены основные черты глубинного распределения электропроводности - практически повсеместно присутствующий на глубинах 30-50 км слой повышенной проводимости, нарастающей в южном направлении и субвертикальные проводящие зоны, связанные с глубинными разломами. Кроме того, на основании обнаруженной корреляции коровых проводников с зонами пониженных сейсмических скоростей, выявленных сейсмотомографией [Roesker et al., 1993], было сделано предположение об их флюидной природе.

Однако концепция мультидисциплинарной программы исследований современной геодинамики высокогорного Тянь-Шаня потребовала дополнительных усилий по созданию эффективного комплекса электромагнитных зондирований, способного обеспечить детальное разрешение аномальных объектов, как в верхах разреза, так и на нижнекоровых и верхнемантийных глубинах региона Тяньшанского орогена. В результате, на рубеже 2000-х годов, благодаря сотрудничеству российских и американских геофизиков [Bielinski et al., 2000], с помощью измерительной аппаратуры нового поколения были накоплены первые коллекции длиннопериодных синхронных электромагнитных данных и для их интерпретации привлечены современные методики анализа [Рыбин 2001; Баталев, 2002; Bielinski et al., 2003; Sokolova and “Naryn WG”, 2005], что определило начало нового этапа в изучении геоэлектрического строения региона. На этом этапе были привлечены более мощные

средства решения задач инверсии [Rodi, Mackie, 2001; Варенцов, 2002, 2006, 2011], обеспечивающие детальную модельную параметризацию, разнообразные средства стабилизации решения и подавление/учет поверхностных искажений.

Актуальность нового этапа глубинных электромагнитных исследований Тянь-Шаня, представленных в диссертации, связана с научным поиском и определением современных возможностей анализа естественных электромагнитных полей (на базе методов магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования) для создания адекватной модели глубинного строения такого сложно построенного геологического объекта, каким является Центральный Тянь-Шань.

Основной целью работы является идентификация в литосфере Центрального Тянь-Шаня блоков и слоев земной коры с аномальными геоэлектрическими параметрами (т.е. определение ее расслоенности и разломно-блочной структуры), диагностирование областей повышенной пористости и флюидонасыщенности (частичного плавления), прослеживание разломных зон в распределении электропроводности.

Научные задачи исследований:

1. Разработка эффективных подходов к интерпретации данных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований с учетом сильного искажающего влияния локальных приповерхностных неоднородностей на электромагнитный отклик в условиях сложного глубинного строения литосферы Тяньшанского орогена.
2. Исследование регионального распределения электропроводности вдоль выполненных геотраверсов на территории Центрального Тянь-Шаня.
3. Изучение тонкой геоэлектрической структуры земной коры локальных зон, являющихся ключевыми тектоническими элементами геодинамической системы Центрального Тянь-Шаня.
4. Геодинамическое истолкование полученных геоэлектрических моделей различных масштабов, в частности, построение двумерного поля современных деформаций земной коры региона и сопоставление полученной деформационной модели с геоэлектрическими построениями, а также анализ взаимосвязи параметров геоэлектрических структур земной коры с распределением сейсмичности.

Фактический материал, методы исследования и аппаратно-программное обеспечение. В работе использованы результаты магнитотеллурических и магнитовариационных исследований, осуществляемые уже более 25 лет Научной станцией РАН на территории Тяньшанского региона и сопредельных областей. Основная часть полевых материалов зондирования получена с непосредственным участием автора как основного исполнителя и руководителя этих работ.

Информационную основу диссертационного исследования составили: временные ряды магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, проведенных в более чем 600 пунктах на территории Центрального Тянь-Шаня и сопредельных областей; результаты их математической обработки – каталоги передаточных функций импеданса и типпера в широком диапазоне периодов; результаты количественной интерпретации этого массива данных; материалы более 20 отчетов, выполненных с участием автора в течение последних лет по тематике изучения глубинного строения Тянь-Шаня; обобщение геолого-геофизических данных, полученных в регионе исследования; литературные данные по развитию методики и приложениям современных методов магнитотеллурики и геодинамики.

Основой решения задач магнитотеллурики является теория электромагнитной индукции. Базовой моделью служит модель Тихонова-Каньяра, где в качестве

источника рассматривается плоская электромагнитная волна, вертикально проникающая в горизонтально-слоистое полупространство. Модель Тихонова-Каньяра применима в широком классе магнитотеллурических полей со сколь угодно быстрыми, но квазилинейными изменениями горизонтального магнитного поля на расстояниях порядка утроенной длины проникновения поля [Berdichevsky and Dmitriev, 2002]. Дальнейшее развитие общей теории магнитотеллурики получила в работах Т.Маддена, М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна, М.С. Жданова.

Основные методы исследования – численное моделирование и инверсия электромагнитных полей в 2D/3D неоднородных средах. Решения обратной задачи электромагнитных зондирований основаны на методах минимизации функционала невязки в объединенном пространстве инвертируемых данных и оптимизируемых параметров модели с использованием идей тихоновской регуляризации, робастной статистики невязок, нелинейной минимизации Гаусса-Ньютона или сопряженных градиентов. Такой подход реализован в программах двумерной инверсии Макки [Rodi, Mackie, 2001] и Варенцова [2002, 2006, 2011].

Полевые измерения естественных электромагнитных полей в Тяньшанском регионе выполнялись с помощью различной аппаратуры – МТ-ПИК, LIMS и ЕМІ МТ-24, Феникс МТУ-5. В ранних работах (1982-1999 гг.) зондирования проводились измерительными станциями ЦЭС-2 и ИЗМИРАН-5.

В качестве основных программных средств обработки полевых материалов МТ/МВ зондирований использовались три инструмента: стандартный программный комплекс ЭПАК (ВНИИГеофизика, г. Москва), адаптированный и модернизированный автором для персональных компьютеров; программа SSMT2000, входящая в штатный комплект магнитотеллурических измерительных станций геофизической компании Феникс; и программная система PRC_MTMV [Варенцов и др., 2003], реализующая современные подходы к синхронной обработке глубинных и разведочных данных.

Для расчета двумерного регионального поля деформации по результатам GPS наблюдений автор использовал программу GRID_STRAIN (Teza, Pesci, Galgaro, 2008).

Научная новизна и личный вклад автора. Впервые автором на базе современных методов обработки и анализа геофизических данных проведено научное обобщение материалов и методик количественной интерпретации результатов магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, осуществляемых уже более 25 лет Научной станцией РАН в Тяньшанском регионе и сопредельных территориях. На этой основе построена глубинная геоэлектрическая модель литосферы Центрального Тянь-Шаня и выполнено междисциплинарное обобщение результатов геоэлектрических построений с данными других геофизических исследований глубинного строения региона.

Разработкой методов обработки и интерпретации материалов полевых магнитотеллурических и магнитовариационных наблюдений автор занимается более 25 лет в качестве исполнителя и руководителя работ, связанных с практической реализацией силами Научной станции РАН широкомасштабного комплекса глубинных электромагнитных исследований в Тяньшанском регионе.

Автором предложен оригинальный подход к количественной интерпретации МТ/МВ данных, полученных в сложных геоэлектрических условиях горного региона. В основе подхода лежит трехуровневый алгоритм двумерной инверсии магнитовариационных и магнитотеллурических данных с ведущей ролью магнитных откликов [Трапезников и др., 1997; Рыбин, 2001]. Алгоритм инверсии учитывает

различную чувствительность компонент естественного электромагнитного поля к параметрам целевых геоэлектрических объектов и предполагает последовательное выполнение частичных инверсий, включающих по очереди различные характеристики поля. Каждая частичная инверсия обеспечивает пошаговое закрепление параметров для устойчиво определяемых блоков проводимости модели. Приоритет в общем цикле инверсии отдается фазовым и геомагнитным данным, наименее подвержены влиянию трехмерных неоднородностей, которые в горных условиях Центрального Тянь-Шаня особенно часто проявляются в виде локальных геоэлектрических структур в приповерхностном слое. Реализация такого подхода позволила существенно повысить достоверность построения глубинной геоэлектрической модели литосферы Центрального Тянь-Шаня [Бердичевский и др., 2010а].

На следующем этапе исследований при интерпретации нового массива разнородных электромагнитных зондирований [Бердичевский и др., 2010б] вдоль базового регионального профиля NARYN была применена схема многокомпонентной совместной инверсии, основанная на ряде новых возможностей метода Варенцова [2002, 2006, 2007, 2011]. Принципиальными элементами такого подхода стали: учет влияния рельефа поверхности наблюдения на электромагнитные отклики, увеличение используемых в инверсии погрешностей данных пропорционально количественным мерам 3D искаженности и, наконец, робастное осреднение набора приемлемых решений задачи инверсии при построении итоговой модели. По этой методике автором совместно с И.М. Варенцовым и Е.Ю. Соколовой построена региональная геоэлектрическая модель «NARYN-INV2D». Профиль NARYN стал одним из важнейших полигонов развития и апробации данной интерпретационной технологии, а автор диссертационной работы играл значимую роль в постановке и реализации этих совместных исследований.

Впервые исследована тонкая геоэлектрическая структура земной коры отдельных локальных зон на территории Центрального Тянь-Шаня и получены геодинамические следствия, вытекающие из особенностей геоэлектрического строения этих зон. Один из основных результатов данного исследования – это доказательство новых возможностей современных технологий электромагнитных зондирований на базе методов МТЗ-МВЗ в идентификации параметров глубинной структуры разломных зон надвигового и поддвигового типов в орогенных областях.

Автором проведено сопоставление результатов геоэлектрических построений с данными других геофизических исследований, выполненных в регионе. При этом показана особая роль глубинных электромагнитных исследований, позволяющих получить дополнительное разрешения внутренней структуры Земли в комплексе с сейсмическими методами. Впервые в мировой практике глубинных электромагнитных исследований получены количественные оценки взаимосвязи параметров геоэлектрического разреза, на примере геотраверса NARYN, с характеристиками поля современных деформаций земной коры Центрального Тянь-Шаня, построенного автором по данным региональной сети GPS наблюдений. По мнению автора, высокая корреляция между величиной горизонтальной деформации и проводимостью нижнекорового слоя, выявленная в северной части профиля, свидетельствует о том, что деформация, наблюдаемая на земной поверхности с помощью GPS, отражает горизонтальную структуру пластического течения вещества в нижней коре региона.

Впервые для Тяньшанского региона предложены геоэлектрические критерии определения положения зон возможных сильных землетрясений на основе результатов детальных магнитотеллурических исследований территории Бишкекского геодинамического полигона. Автором диссертации установлена приуроченность очагов сильных землетрясений к участкам, характеризующимся наличием нижнекорового проводящего слоя, резко контрастных высокоомных блоков в вышележащей толще и проводящего «канала», соединяющего нижнекоровый геоэлектрический этаж с верхнекоровыми структурами.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты выполненных исследований докладывались на всероссийских и международных конференциях: конференции «Теория и практика решения обратных задач геоэлектрики» (Алма-Ата, 1991), конференции "Теория и практика магнитотеллурического зондирования" (Москва, 1994), международной конференции «Problems of Geocosmos», (Санкт-Петербург, 2000), Первом международном симпозиуме «Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов» (Бишкек, 2000), Втором международном симпозиуме «Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов» (Бишкек, 2002), Втором казахстано-японском семинаре по предотвращению последствий разрушительных землетрясений (Алматы, 2002), международной конференции «Проблемы сейсмологии III-тысячелетия» (Новосибирск, 2003), Всероссийском совещании «Напряженное состояние литосферы, ее деформация и сейсмичность» (Иркутск, 2003), Пятом казахстано-китайском международном симпозиуме «Современная геодинамика и сейсмический риск Центральной Азии» (Алматы, 2003), XXXVII Тектоническом совещании (Новосибирск, 2004), XXXVIII Тектоническое совещание (Москва, 2005), казахстано-российской международной конференции «Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска» (Алматы, 2004), международной научной конференции «Современная геодинамика и геоэкология Тянь-Шаня» (Бишкек, 2004), 23rd General Assembly of the IUGG (Sapporo, Japan, 2003), Fifth International Conference "Problems of Geocosmos" (Saint-Petersburg, 2004), 1st General Assembly European Geosciences Union (Nice, France, 2004), The 10-th Scientific Assembly of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (Toulouse, France, 2005), Третьем международном симпозиуме «Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке» (Бишкек, 2006), III Международной школе-семинаре по электромагнитным зондированиям Земли (Звенигород, 2007), Четвертом международном симпозиуме «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы» (Бишкек, 2008), 19th Workshop, IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth (Beijing, China, 2008), 11th Scientific Assembly IAGA (Sopron, Hungary, 2009), Седьмом казахстано-китайском международном симпозиуме «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии» (Алматы, 2010), The International Workshop in memory of Mark N. Berdichevsky and Peter Weidelt «Electromagnetic soundings: theory and applications» (Moscow, 2010).

По теме диссертации опубликовано 34 работы с участием автора, из которых 19 статей в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК, монография – 1, коллективные монографии – 2, статьи в зарубежных рецензируемых журналах - 2, материалы международных конференций, симпозиумов, совещаний – 10.

Научная и практическая значимость работы. Совершенствование способов анализа и интерпретации результатов измерений естественного электромагнитного поля Земли, выполненных в условиях такого сложно построенного геологического объекта, каким является горный регион Центрального Тянь-Шаня, в первую очередь, определяет научную и практическую значимость выполненного исследования. Использование разработанной методики многокомпонентной совместной инверсии расширяет возможности и повышает надежность интерпретации результатов глубинных электромагнитных исследований в геоэлектрических условиях горной территории Центрального Тянь-Шаня. Данный подход к интерпретации данных МТЗ-МВЗ может быть успешно применен в других регионах со сложным геоэлектрическим строением.

Выводы о природе коровой проводимости и полученные оценки геодинамических показателей среды могут быть использованы при построении комплексных геолого-геофизических моделей земной коры и верхней мантии Центрального Тянь-Шаня, составлении геодинамических и тектонических схем. Полученные геоэлектрические модели отражают степень неоднородности строения земной коры, как по латерали, так и по глубинам, что должно быть учтено при оценке сейсмической опасности. Предложенные критерии (приуроченность сильных землетрясений к градиентным зонам, обусловленным контактом высокоомных блоков и низкоомных проводящих структур) могут быть привлечены для прогноза местоположения возможных сильных землетрясений в Тяньшанском регионе.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из пяти глав, введения, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 276 стр., 103 иллюстрации и список литературы из 253 наименований.

Основные защищаемые положения:

1. Разработан новый оригинальный подход к методике количественной интерпретации данных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, полученных на территории высокогорного региона Центрального Тянь-Шаня в условиях сильного искажающего влияния приповерхностных неоднородностей на глубинный электромагнитный отклик. На этой основе построены двумерные геоэлектрические модели различных пространственных масштабов в различных сечениях земной коры и верхней мантии исследуемого региона.

2. Важнейшими геоэлектрическими структурами в построенных региональных разрезах литосферы Центрального Тянь-Шаня представляются:

- нижнекоровый проводящий слой с удельным сопротивлением 10-20 Ом-м на глубине 30-50 км;

- области пониженного сопротивления, отвечающие зонам основных разрывных нарушений (Линии Николаева, Таласо-Ферганского, Атбаши-Иньльчекского и Южно-Кочкорского разломов);

- крупная субвертикальная коровая проводящая зона под Нарынской впадиной;

- спорадически проявляющиеся верхнекоровые проводники.

3. Доказаны новые возможности современных технологий электромагнитных зондирований на базе методов МТЗ-МВЗ в идентификации параметров глубинной структуры разломных зон надвигового и поддвигового типов в орогенных областях на примере построенных геоэлектрических образов региональных тектонических структур, в зонах сочленения граничных областей Центрального Тянь-Шаня с Казахским щитом и Таримской плитой.

4. Предложены геоэлектрические критерии локализации очаговых зон сильных землетрясений в земной коре Центрального Тянь-Шаня, основанные на приуроченности очагов сильных землетрясений к участкам, характеризующимся наличием нижнекорового проводящего слоя, резко контрастных высокоомных блоков в вышележащей толще и проводящего «канала», соединяющего нижнекоровый геоэлектрический этаж с верхнекоровыми структурами.

Благодарности. Результаты, представленные в диссертации, являются одним из итогов многолетней деятельности геодинамического полигона – Научной станции РАН в г.Бишкеке, организатором и бессменным руководителем которого был Юрий Андреевич Трапезников. К великому сожалению, сейчас его нет с нами. Для автора Юрий Андреевич был и остается образцом творческой личности с феноменальными способностями научного организатора, руководителя и исследователя, а главное, человеком, который все свои силы и возможности сконцентрировал и подчинил бескомпромиссному служению науке.

Автор выражает глубочайшую признательность и благодарность своему учителю и научному руководителю – профессору МГУ Марку Наумовичу Бердичевскому за постоянное внимание, участие и поддержку комплекса глубинных электромагнитных исследований, выполняемых Научной станцией РАН в Тяньшанском регионе. К величайшему сожалению, Марк Наумович ушел из нашей жизни в 2009 году.

Особенно хочется выразить глубочайшую признательность совсем недавно ушедшему из жизни академику Алексею Максимовичу Фридману за его ценные советы и помощь автору во время подготовки диссертации.

За неформальную поддержку и внимание к тематике глубинных электромагнитных исследований автор особо признателен В.А.Зейгарнику и Г.Г.Щелочкову, которые вместе с Ю.А.Трапезниковым заложили «фундамент» как самой Научной станции, так и геодинамических исследований в Тяньшанском регионе.

Особую благодарность автор хотел бы выразить своим ближайшим коллегам: В.Ю.Баталеву, Е.А. Баталевой, И.М. Варенцову, Е.Ю. Соколовой. Тесное и неформальное сотрудничество с этими учеными на протяжении многих лет способствовало появлению на свет научных результатов, обсуждаемых в диссертации.

Во время выполнения исследования автор получал постоянную поддержку и квалифицированную помощь от В.В. Спичака, которому автор выражает свою признательность.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить В.И. Макарова за оказанную поддержку и консультации при подготовке работы.

Автор искренне признателен всем своим коллегам по совместной работе, участвовавшим и помогавшим ему в организации и проведении геофизических исследований, результаты которых обсуждаются в данной работе: Ю.В. Антонову, Р.Белински, П.В. Ильичеву, Л.Н. Лосихину, В.И. Макарову, Е.К. Матюкову, В.Е. Матюкову, В.Н. Пазникову, С. Парку, П.П. Петрову, П.Ю. Пушкареву, Г.Н. Тимонину, Д.Е. Черненко.

Исследования, представленные в диссертации, частично выполнялись при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 04-05-64970, 04-05-65103, 07-05-00594, 08-05-00716, 08-05-00875) и Министерства образования и науки РФ (государственные контракты №02.515.12.5001, №02.740.11.0730).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Геологическая характеристика и геофизическая изученность Центрального Тянь-Шаня

В первой главе, носящей обзорный характер, представлен развернутый геолого-тектонический очерк центрального сегмента Тянь-Шаня. В первой части очерка кратко рассматривается комплекс разновозрастных более или менее древних формаций и структур, которые предшествовали новейшему горообразованию и стали фундаментом горного пояса в целом и отдельных его форм (поднятий-хребтов и опусканий-впадин). Вторая часть очерка посвящена комплексу новейших тектонических структур и связанных с ними отложений так называемого новейшего орогенического комплекса, именуемых также осадочным покровом или чехлом.

Далее в главе рассмотрены основные результаты выполненных в последние годы геофизических исследований Тянь-Шаня. Кратко рассмотрены история создания и отдельные моменты исследовательской деятельности геодинамического полигона в горах Тянь-Шаня, функционирующего на базе Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) и Международного научно-исследовательского центра – геодинамического полигона (МНИЦ-ГП). Глава завершается анализом региональной геоэлектрической изученности, распределения теплового потока и температур, результатов геомагнитных наблюдений, данных гравиметрии, трехмерных сейсмотомографических построений и материалов сейсморазведочных работ.

В третьей части главы рассматриваются результаты анализа распределения сейсмичности на территории Тянь-Шаня. Приведены данные, как о сильных, так и о слабых землетрясениях. Пространственное распределение сейсмичности региона оценивается с помощью карты плотности эпицентров землетрясений. Дополнительно для анализа сейсмичности и сейсмического режима исследуемой территории рассмотрено площадное распределение величин наклона графика повторяемости и вариаций сейсмической активности. Приведены данные о распределении глубин очагов землетрясений в пределах рассматриваемого региона. Отдельно рассмотрен вопрос, отражающий развитие взглядов на проблему объяснения природы сейсмической активности Тянь-Шаня.

Отметим, что многие обсуждаемые в данной главе вопросы, которые по территориальному признаку должны быть отнесены к объекту исследования – центральной части Тянь-Шаня, не могут быть рассмотрены в отрыве от характеристик всего Тяньшанского горного пояса.

Глава 2. Магнитотеллурический метод – геофизический инструмент изучения глубинного строения литосферы

Во второй главе рассматриваются базовые понятия и особенности магнитотеллурического метода в качестве геофизического инструмента для изучения глубинного строения литосферы Тянь-Шаня.

Раздел 2.1 представляет собой введение в теоретические основы магнитотеллурики. Здесь формулируется *магнитотеллурическая задача* и рассматривается вопрос о существовании и природе линейных алгебраических соотношений между горизонтальными компонентами электромагнитного поля в неоднородных средах, лежащими в основе определения основной функции отклика МТЗ – тензора импеданса [Бердичевский, Дмитриев, 1992]. Кратко обсуждаются два

подхода к магнитотеллурической задаче: интегральный и локальный. Примером локального подхода является *магнитотеллурическое зондирование*, использующее алгебраические соотношения между тангенциальными компонентами электрического и магнитных полей в отдельных точках земной поверхности для определения операторов Тихонова-Каньяра.

В разделе 2.2 отмечаются особенности методики проведения магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в горных условиях Тянь-Шаня с помощью различных типов измерительной аппаратуры.

В разделе 2.3 обсуждаются методики обработки материалов магнитотеллурических и магнитовариационных наблюдений, полученных в Тяньшанском регионе. Здесь рассматриваются реализованная автором модификация программного комплекса ЭПАК [Рыбин, 2001] и процедуры обработки полевых данных, регистрируемых с помощью аппаратуры Феникс МТУ-5. Анализируются точностные характеристики получаемых с помощью станций МТУ-5 электромагнитных параметров. Детально обсуждается вопрос количественной оценки смещения элементов тензора импеданса на основе критерия когерентности.

В разделе 2.4 подробно рассматриваются методические аспекты количественной интерпретации материалов глубинных электромагнитных зондирований, полученных на территории Центрального Тянь-Шаня и сопредельных областей. Сложные геоэлектрические условия горного Тянь-Шаня потребовали оригинального подхода к разработке методики построения глубинной модели по данным МТЗ-МВЗ.

Основная трудность, возникающая при двумерной интерпретации кривых кажущегося сопротивления, полученных в горах Тянь-Шаня, связана со статическим смещением низкочастотных ветвей продольных кривых кажущегося сопротивления ρ^{\parallel} под действием приповерхностных трехмерных неоднородностей. Двумерное моделирование учитывает статическое смещение в ТМ-модели и игнорирует его в ТЕ-модели. Формальная инверсия смещенных кривых может серьезно исказить информацию о глубинной электропроводности. Поэтому продольные кривые нуждаются в предварительной нормализации, т.е. необходимо попытаться восстановить нормальное положение их низкочастотных ветвей.

В современной магнитотеллурике известно несколько способов борьбы со статическим смещением, однако, они не позволяют получить эффективное решение этой проблемы в геоэлектрических условиях Тянь-Шаня [Рыбин, 2001].

В создавшейся ситуации лучшее решение – это использовать возможности магнитовариационного зондирования (МВЗ), основанного на изучении вариаций трех компонент магнитного поля Земли. Замечательное свойство МВЗ заключается в том, что магнитное поле на низких частотах освобождается от искажающего влияния приповерхностных неоднородностей. Простая и наглядная иллюстрация этого свойства представлена в работе М.Н. Бердичевского [Бердичевский и др., 1997], где для синтетической двумерной модели Тяньшанского типа убедительно показано, что, начиная с $T=100$ сек, поперечная компонента матрицы Визе-Паркинсона W_{zy} перестает замечать влияние локальной приповерхностной структуры. В то же время МТ-зондирования связаны с вариациями горизонтальных компонент электрического и магнитного полей, поэтому глубинная МТ-информация сильно искажена из-за высокой чувствительности электрического поля к приповерхностным горизонтальным неоднородностям. Отсюда логически следует, что основа для интерпретации сильно искаженной МТ-информации может быть получена по МВ-данным.

Инверсия МВ-данных основана на минимизации тихоновского функционала, содержащего невязку типперов. Тяньшанский опыт подбора двумерной геоэлектрической модели по частотным характеристикам вещественных типперов [Трапезников и др., 1997] свидетельствует о том, что магнитовариационное зондирование не только локализует коровые структуры, но и стратифицирует земную кору. Таким образом, можно предложить новую схему глубинного электромагнитного зондирования, в которой метод МВЗ, свободный от приповерхностных искажений, играет ведущую роль и даёт базисную информацию о среде, а метод МТЗ служит для контроля и детализации результатов МВЗ.

На основе данного подхода был создан **трехуровневый алгоритм двумерной инверсии МВ и МТ-данных** [Трапезников и др., 1997; Рыбин, 2001]. Алгоритм инверсии учитывает различную чувствительность компонент естественного электромагнитного поля к параметрам целевых геоэлектрических объектов и предполагает последовательное выполнение частичных инверсий, включающих по очереди различные характеристики поля. Каждая частичная инверсия обеспечивает пошаговое закрепление параметров для устойчиво определяемых блоков проводимости модели. Приоритет в общем цикле инверсии отдается фазовым и геомагнитным данным, наименее подвержены влиянию трехмерных неоднородностей, которые в горных условиях Центрального Тянь-Шаня особенно часто проявляются в виде локальных геоэлектрических структур в приповерхностном слое. Реализация такого подхода позволила существенно повысить достоверность построения глубинной геоэлектрической модели литосферы Центрального Тянь-Шаня [Бердичевский и др., 2010].

Для описания алгоритма введем некоторые обозначения. Пусть инвертируемые данные задаются вещественным вектором $\mathbf{d}_0 \in \mathbf{R}^{N_d}$, объединяющим значения различных передаточных операторов ЭМ поля (кажущегося сопротивления $\hat{\rho}^K$, импеданса $\hat{\mathbf{Z}}$, типпера \mathbf{W}_z и др.) в разном представлении (Re, Im, Mod, $\log(\text{Mod})$, Arg) для набора пунктов наблюдения и периодов. Неотъемлемым атрибутом данных является вектор \mathbf{d} их погрешностей, задающий диагональную априорную оценку ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{W}}_d : \{W_d\}_{ii} = \{\sigma_0^d\}_i^2$. Инвертируемые передаточные операторы приводятся вращением к системе координат инверсии, либо система координат инверсии задается в соответствии с представлением инвертируемых операторов.

Аналогичный по структуре вектор модельных данных определяется оператором моделирования $\hat{\mathbf{M}}$ (в общем случае нелинейным) для параметров модели \mathbf{p} , лежащих в пределах ограничений \mathbf{p}^- , \mathbf{p}^+ .

Уровень 1. На этом уровне интерпретируется ТЕ-мода, доставляющая информацию о глубинных проводящих зонах в консолидированной коре и верхней мантии. В интерпретации используется поперечная компонента МВ-матрицы. Интерпретация стабилизируется близостью к стартовой модели \mathbf{p}_0 , которая строится на основе априорной информации, опорных длинопериодных зондирований и качественного анализа наблюдаемых данных. ТЕ-инверсия сводится к итерационной минимизации Тихоновского функционала $T(\mathbf{p})$.

$$T^{MV}[\mathbf{p}] = \|\delta\mathbf{d}\|^2 + \lambda \|\delta\mathbf{p}\|^2$$

где: $\delta \mathbf{d} = \widehat{\mathbf{W}}_d^{1/2} [\widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{p}) - \mathbf{d}_0]$, $\delta \mathbf{p} = \widehat{\mathbf{W}}_p^{1/2} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)$ - нормированные («взвешенные») невязки данных и модельных параметров, $\widehat{\mathbf{W}}_d$ и $\widehat{\mathbf{W}}_p$ - весовые матрицы, λ - скалярный параметр регуляризации, $\mathbf{d}_0 = \{\text{Re}W^\perp, \text{Im}W^\perp\}$ - вещественный вектор инвертируемых данных.

Свобода в выборе весов $\widehat{\mathbf{W}}_d$ позволяет нам контролировать вклад реальной и мнимой частей поперечной компоненты Визе-Паркинсона для различных частотных диапазонов измерений. Увеличивая веса $\widehat{\mathbf{W}}_d$ с ростом периода вариаций, мы усиливаем влияние глубинных структур. Задавая больший вес реальной части поперечной компоненты Визе-Паркинсона по сравнению с мнимой частью, мы подчеркиваем вклад реальной части индукционного вектора, связанный с влиянием активных избыточных токов. Завершая итерационный цикл на Уровне 1, мы получаем итоговую модель-решение \mathbf{p}_1 , которая передается на Уровень 2 и служит опорной моделью для коррекции статических смещений продольных кривых кажущегося сопротивления.

Уровень 2. На этом уровне интерпретируется ТЕ-мода, подтверждая и дополняя информацию о глубинных проводящих зонах, полученную на первом уровне. При интерпретации используются продольные МТ-кривые: амплитуды с погашенным статическим смещением и фазы. Инверсия стабилизируется близостью к итоговой модели первого уровня \mathbf{p}_1 . Минимизируется Тихоновский функционал

$$\mathbf{T}^{\text{TE}}[\mathbf{p}] = \|\delta \mathbf{d}\|^2 + \lambda \|\delta \mathbf{p}\|^2$$

где $\delta \mathbf{d} = \widehat{\mathbf{W}}_d^{1/2} [\widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{p}) - \mathbf{d}_0]$, $\delta \mathbf{p} = \widehat{\mathbf{W}}_p^{1/2} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_1)$ - нормированные («взвешенные») невязки данных и модельных параметров, $\widehat{\mathbf{W}}_d$ и $\widehat{\mathbf{W}}_p$ - весовые матрицы, λ - скалярный параметр регуляризации, $\mathbf{d}_0 = \{\rho^\parallel, \varphi^\parallel\}$ - вещественный вектор инвертируемых данных,

ρ^\parallel - нормализованные измеренные значения продольных кажущихся сопротивлений,
 φ^\parallel - измеренные значения фаз продольного импеданса,

Выбирая различные значения весовых коэффициентов в матрицах $\widehat{\mathbf{W}}_d$ и $\widehat{\mathbf{W}}_p$, мы можем контролировать вклад различных участков МТ-кривых в различных частях профиля. Так, целесообразно увеличивать значения весов с ростом периода вариаций (подчеркивая этим влияние глубинных структур). Приняв $\widehat{\mathbf{W}}_d > \widehat{\mathbf{W}}_p$, мы в значительной мере подавляем ошибки кажущегося сопротивления, связанные с неточностью коррекции статического смещения. Завершая инверсию на этом этапе, мы получаем итоговую модель \mathbf{p}_2 , характеризующую глубинную часть исследуемой среды. Эта модель служит стартовой моделью на Уровне 3.

Уровень 3. На этом уровне интерпретируется ТМ-мода, представленная поперечными амплитудными и фазовыми МТ-кривыми. Основная цель ТМ-инверсии - дифференцировать осадочный покров, оценить поперечное сопротивление верхних слоев земной коры, уточнить строение разломных зон. Инверсия стабилизируется близостью к итоговой модели второго уровня \mathbf{p}_2 . Минимизируется Тихоновский функционал

$$\mathbf{T}^{\text{TM}}[\mathbf{p}] = \|\delta \mathbf{d}\|^2 + \lambda \|\delta \mathbf{p}\|^2$$

где $\delta \mathbf{d} = \widehat{\mathbf{W}}_d^{1/2} [\widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{p}) - \mathbf{d}_0]$, $\delta \mathbf{p} = \widehat{\mathbf{W}}_p^{1/2} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_2)$ - нормированные («взвешенные») невязки данных и модельных параметров, $\widehat{\mathbf{W}}_d$ и $\widehat{\mathbf{W}}_p$ - весовые матрицы, λ - скалярный параметр регуляризации, $\mathbf{d}_0 = \{\rho^\perp, \varphi^\perp\}$ - вещественный вектор инвертируемых данных,

ρ^\perp - измеренные значения поперечных кажущихся сопротивлений,

φ^\perp - измеренные значения фаз поперечного импеданса,

Выбирая различные значения весовых коэффициентов в матрице $\widehat{\mathbf{W}}_d$ мы можем контролировать вклад различных участков МТ-кривых в различных частях профиля. Так увеличение значений весов на высоких частотах позволяет усилить влияние локальных приповерхностных структур. Завершая инверсию на Уровне 3, мы получаем итоговую модель \mathbf{p}_3 .

Точность бимодальной инверсии оценивается по невязкам данных $\delta \mathbf{d}$: Если невязки достаточно малы, то модель \mathbf{p}_3 может рассматриваться как окончательный результат двумерной инверсии. В случае больших невязок можно вернуться на Уровень 1 и повторить итерации. Такой внешний итерационный цикл состоит из последовательных возвращений на Уровень 1 и переходов на Уровни 2 – 3. Итерации завершаются тогда, когда невязки становятся достаточно малыми.

Трехуровневый алгоритм двумерной инверсии МВ и МТ-данных был положен в основу расчета моделей геоэлектрического строения земной коры Центрального Тянь-Шаня по региональным профилям и серии локальных профилей [Рыбин, 2001]. Магнитовариационный трехуровневый алгоритм 2-D инверсии был также использован для интерпретации МВ и МТ-данных по локальным профилям, секущих зону Таласо-Ферганского разлома [Баталев, 2002]. С помощью инверсии поперечных кривых МТЗ в зоне Таласо-Ферганского разлома проведены исследования эффекта вытеснения поперечного тока и обнаружена резкая смена характеристик – «разрыв сплошности» корового проводника, происходящий по зоне Таласо-Ферганского разлома.

Для практической реализации трехуровневого алгоритма 2D инверсии была использована программа INV2D [Варенцов, Голубев, 1995]. В ней прямая задача решается методом конечных разностей, причем применяется 5-точечная схема численного дифференцирования и граничные условия Дирихле. Подход к решению обратной задачи, реализованный в этой программе, основан на двумерной кусочно-постоянной (блочной, с фиксированной геометрией) параметризации исследуемой неоднородной среды, состоящей из 40 фиксированных прямоугольных блоков с заданными (20 блоков) и оптимизируемыми (20 блоков) сопротивлениями. Последние оптимизируются посредством минимизации Тихоновского функционала, состоящего из модельной невязки и стабилизатора, обеспечивающего близость инверсии к стартовой модели. При этом согласованное и адаптивное применение разнообразных средств стабилизации решения обратной задачи позволило на практике достигнуть удачного компромисса устойчивости и разрешающей способности.

Дальнейшим практическим шагом развития методики построения глубинной геоэлектрической модели Центрального Тянь-Шаня по данным МТЗ-МВЗ было использование программы Макки, реализующей **алгоритм сглаживающей 2D инверсии** Макки [Rodi and Mackie, 2001]. Прямая задача в программе инверсии Макки решается методом конечных разностей. В основе решения обратной задачи лежит теория регуляризации Тихонова. Реализованная в этой программе процедура

2D инверсии производит совместный подбор наблюдаемых значений импеданса и типпера, при этом осуществляется сглаживание модели сопротивления посредством минимизации Тихоновского функционала: $(\text{наблюдаемые данные} - \text{вычисленные отклики})^2 + \nabla (\text{оптимизируемая модель} - \text{априорная модель})^2$. Второй член функционала “штрафует” гладкие отклонения оптимизируемой модели от априорной. В качестве априорной используется информация о гладкости получаемого распределения сопротивления (за исключением скачков сопротивления, заданных в стартовой модели). Минимизация функционала осуществляется методом нелинейных сопряженных градиентов. Программа Макки подбирает сопротивление каждой ячейки модели по отдельности. При этом на модель накладывается условие гладкости.

На следующем этапе исследований при интерпретации нового массива разнородных электромагнитных зондирований [Бердичевский и др., 2010] вдоль базового регионального профиля NARYN была применена **схема многокомпонентной совместной инверсии**, основанная на ряде новых возможностей метода Варенцова [2002, 2006, 2007, 2011]. Принципиальными элементами такого подхода стали: учет влияния рельефа поверхности наблюдения на электромагнитные отклики, увеличение используемых в инверсии погрешностей данных пропорционально количественным мерам 3D искаженности и, наконец, робастное осреднение набора приемлемых решений задачи инверсии при построении итоговой модели.

Подавление приповерхностных искажений кажущихся сопротивлений достигается широким и приоритетным использованием МВ данных и импедансных фаз, при этом влияние искаженных кажущихся сопротивлений может многократно снижаться путем увеличения их погрешностей. Кроме того, статические искажения могут робастно оцениваться в ходе инверсии и далее компенсироваться [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007]. Оправдано извлечение инвертируемых фазовых данных из фазового тензора импеданса [Caldwell et al., 2004]. Профиль инверсии выбирается ломаным (“слаломным”) с учетом оценок простирающих структур по наименее поверхностно искаженным передаточным операторам – горизонтальному МВ тензору, типперу и фазовому тензору. В модели инверсии отражается рельеф поверхности наблюдения в среднем по окрестности профиля. Данные и их погрешности, подлежащие инверсии, отбираются после преобразования передаточных операторов к направлениям сегментов профиля. При этом погрешности ограничиваются снизу пороговыми величинами (error floors) и затем увеличиваются пропорционально оценкам 3D-искаженности данных, выражаемым факторами трехмерности (skew) и неадекватной двумерности (неперпендикулярности оценок простирающего сегменту профиля) для соответствующих передаточных операторов. Таким образом, приоритет в ходе инверсии получают элементы данных с хорошей двумерностью и лишь по мере их подбора начинают учитываться 3D-искаженные элементы.

При 2D инверсии данных, рассчитанных в моделях с умеренной трехмерностью (например, с 2D глубинными и 3D поверхностными неоднородностями), может наблюдаться [Kouznetsov et al., 2006] наилучшее приближение к искомой 2D структуре в середине итерационного процесса, а далее, по мере учета 3D-искаженных элементов данных, происходит отход от нее. Точка наилучшего 2D приближения в этом случае характеризуется стабилизацией робастных частных невязок МВ данных, далее заметно меняются лишь невязки импедансных компонент. Таким образом, при

2D инверсии 3D-искаженных данных следует тонко анализировать частные невязки данных и внимательно контролировать изменчивость моделей в ходе итераций инверсии [Варенцов и др., 2011].

Априорные геоэлектрические представления входят в начальную модель в виде вектора сопротивлений ячеек инверсии, интервалов их неопределенности и ограничений “здорового смысла”, а также ожидаемых размеров искоемых структур [Варенцов, 2002; Varentsov, 2007]. С учетом возможного изменения состава инвертируемого ансамбля данных и других параметров стабилизации (начального значения тихоновского параметра и т.д.) может быть получен представительный набор решений обратной задачи приемлемого качества. Выбор итогового решения в таком случае затруднителен и заслуживает внимания подход, в котором осуществляется робастное осреднение полученных моделей, дающее не только надежно усредненную геоэлектрическую структуру, но и характеристику ее изменчивости. Результат осреднения (возможно, после некоторого упрощения) становится начальной моделью нового этапа инверсии. Таким образом, возникают внешние циклы решения обратной задачи.

Стратегия многокомпонентной совместной инверсии была применена для интерпретации материалов глубинных электромагнитных зондирований опорного профиля NARYN.

Глава 3. Региональная геоэлектрическая модель Центрального Тянь-Шаня (геотраверсы NARYN и MANAS)

В третьей главе представлены результаты построения региональной геоэлектрической модели Центрального Тянь-Шаня, полученной на основе анализа и количественной интерпретации материалов магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, выполненных силами сотрудников Научной станции РАН по геотраверсам NARYN и MANAS (рис.1).

В разделе 3.1 анализируется комплекс МТ-МВ зондирований на геотраверсе NARYN, секущем Тяньшанский регион от оз. Балхаш до Таримской плиты вдоль меридиана 76°. В результате выполнения такого комплекса зондирований получен многокомпонентный ансамбль оценок передаточных операторов (импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика), сформированный в сводном диапазоне периодов 0.1–16384 с и подлежащий дальнейшей интерпретации. В итоге, на гетерогенной сети наблюдений геотраверса был сформирован многокомпонентный набор одноточечных (локальных) и двухточечных (синхронных) оценок передаточных функций электромагнитного поля в сводном диапазоне периодов 0.003-16000с.

Основу гетерогенной сети электромагнитных наблюдений на профиле NARYN (рис. 1) заложили 42 локальных разведочных зондирования (0.1-1600 с) со станциями ЦЭС-2 (Киргизский Тянь-Шань) и МТ-ПИК (Казахский щит), накопленные за 90-е годы сотрудниками Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Дальнейший прогресс в глубинных электромагнитных исследованиях Тянь-Шаня был достигнут с помощью поставленных в 1999-2000 г.г. длиннопериодных пятикомпонентных зондирований со станциями LIMS (Канада), осуществленных синхронно в группах по 5, 10 и 4 пункта соответственно для южной (северный Тарим), центральной (Киргизский Тянь-Шань) и северной (Казахская плита) частей профиля. Наблюдения LIMS (дискретизация 2с) дополнялись в каждой точке локальными разведочными зондированиями с аппаратурой МТ-24 (ЕМІ, США), что обеспечило покрытие сводного диапазона периодов 0.003-16000с. ограниченной с

севера важнейшей структурной линией региона - разломной зоной Линии Николаева, разделяющей каледониды Северного и каледоно-герцинские структуры Срединного Тянь-Шаня. Для детализации центрального участка профиля с наиболее сложным геоэлектрическим строением (Нарынская впадина) в 2005г. силами Научной станции РАН были проведены 23 широкодиапазонных (0.003-1448с) попарно-синхронных зондирований со станциями Феникс МТУ-5. В силу различий частотного диапазона и неравномерности покрытия пунктами зондирований различных участков профиля в дальнейшем удобно рассматривать результаты анализа отдельно для двух подмножеств всего ансамбля исходных, обозначив их соответственно **ГМТ** (глубинный, длиннопериодный) и **МТ** (разведочный, высокочастотный) ансамбли.

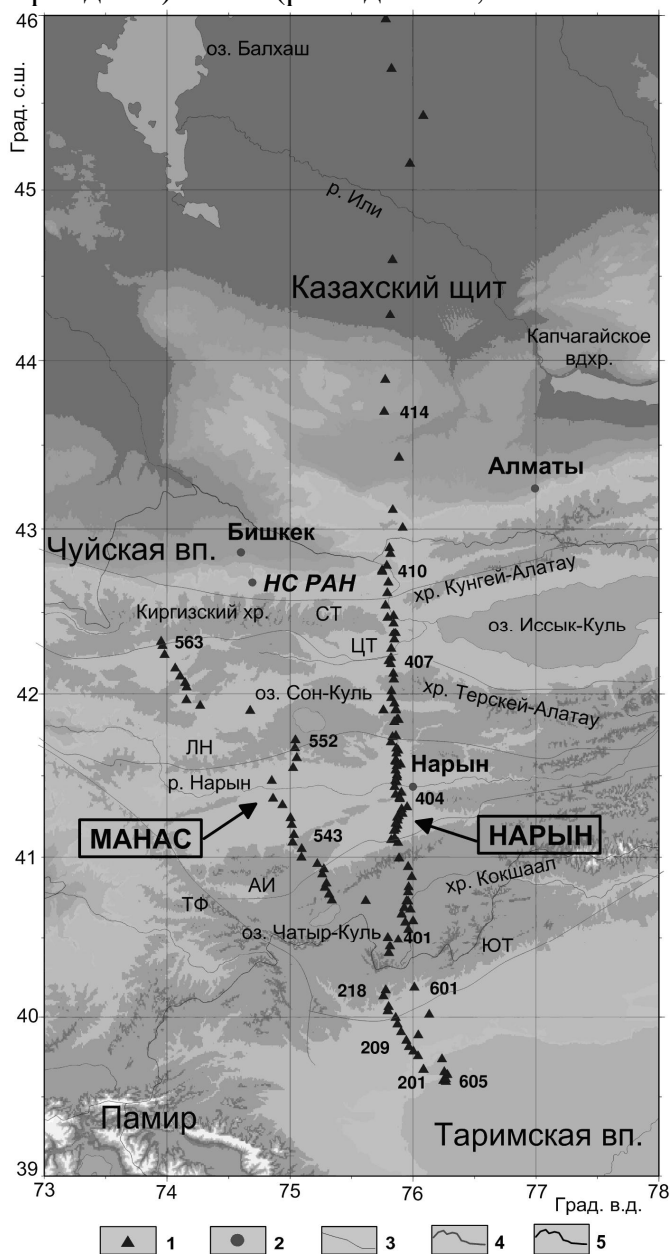


Рис.1. Карта-схема расположения пунктов МТ зондирований вдоль геофизических трансектов NARYN и MANAS:
 1 – пункты МТ-наблюдений; 2 – города; 3 – реки; 4 – основные разломы: СТ – Северо-Тяньшаньский, ЦТ – Центрально-Терскейский, ЛН – Линия Николаева, АИ – Атбаш-Иныльчекский, ТФ – Таласо-Ферганский, ЮТ – Южно-Тяньшаньский; 5 – граница Киргизстана.

Длиннопериодный (ГМТ, 0.1-16000с) набор профильных данных составляют вновь оцененные по данным LIMS локальные операторы и оценки горизонтального магнитного тензора \mathbf{M} в 14 пунктах Киргизской части профиля, дополненные первичными оценками импеданса и типпера на китайском участке.

Кондиционные результаты зондирований ЦЭС-2, МТ-ПИК, а также МТ24 + LIMS и оценки по данным «Феникс» составили объединенный ансамбль оценок \mathbf{Z} и \mathbf{Wz} на профиле NARYN в разведочном (МТ) диапазоне, лимитированном в высокочастотной части периодом 0.1с сообразно задачам исследования. Данные этого ансамбля существенным образом детализируют картину ЭМ откликов геоэлектрической структуры коры (минимальный шаг на интервале сгущения наблюдений – до 3-5км). Наиболее представительная коллекция оценок импеданса собрана в диапазоне 0.1-724с, и в диапазоне 16-724с – для типпера (65 пунктов зондирований по всей длине профиля, от Прибалхашья до северного борта Таримской впадины включительно).

В разделах 3.2 и 3.3 подробно рассмотрено построение двумерной интерпретационной модели геотраверса NARYN с использованием различных подходов при решении обратной задачи электромагнитного зондирования. Первая модель «NARYN-RLM» получена в результате выполнения инверсии в классе дискретных сглаженных структур и представляет собой результат общей (параллельной) инверсии, включающей одновременно все используемые характеристики магнитотеллурического поля. При этом инвертировались материалы ЦЭС-2, LIMS и МТ-24.

Вторая модель «NARYN-INV2D» построена в классе кусочно-непрерывной (блочной) среды с применением подхода последовательности частичных инверсий, включающей по очереди различные характеристики поля. В инверсии участвовали оба ансамбля исходных данных: ГМТ и МТ.

При этом стратегия инверсии данных профиля NARYN была основана на подавлении 3D искажений и сфокусирована на целевые двумерные геоэлектрические объекты. Это предполагало рациональный выбор стартовой модели, приоритет фазовых и геомагнитных данных, встроенных в логику последовательных частичных инверсий, применением априорных весов и/или вычисленных штрафных коэффициентов для определения квази-двумерных ансамблей инвертируемых данных. Цикл инверсии включал в себя последовательные частичные инверсии (начиная с геомагнитных данных и пошаговое закрепление параметров для устойчиво определяемых блоков проводимости) и, параллельно, синхронное взвешивание компонент бимодальные инверсии. Алгоритм регуляризованной 2D инверсии [Varentsov, 2006b], предполагающий блочную и кусочно-непрерывную аппроксимацию распределений проводимости и набор средств для стабилизации решения, был основным инструментом интерпретации.

В пространственной сетке стартовой модели были применены окна для детального сканирования в областях ожидаемых аномалий проводимости. Боковые нормальные разрезы были выбраны по результатам 1D инверсии для МТ кривых пунктов Казахского щита и Таримской плиты. Включение в модель аппроксимации реального рельефа вдоль профиля и осадочных впадин было сделано после модельных экспериментов, которые продемонстрировали их значительное влияние на наблюдаемые МТ-МВ отклики.

Итоговая модель получена в результате робастного усреднения результатов последовательных частичных инверсий (в пространстве параметров проводимости каждой ячейки модели) для обоих ансамблей МТ и ГМТ данных. Результирующая модель показана в логарифмическом масштабе глубин на рис. 2.

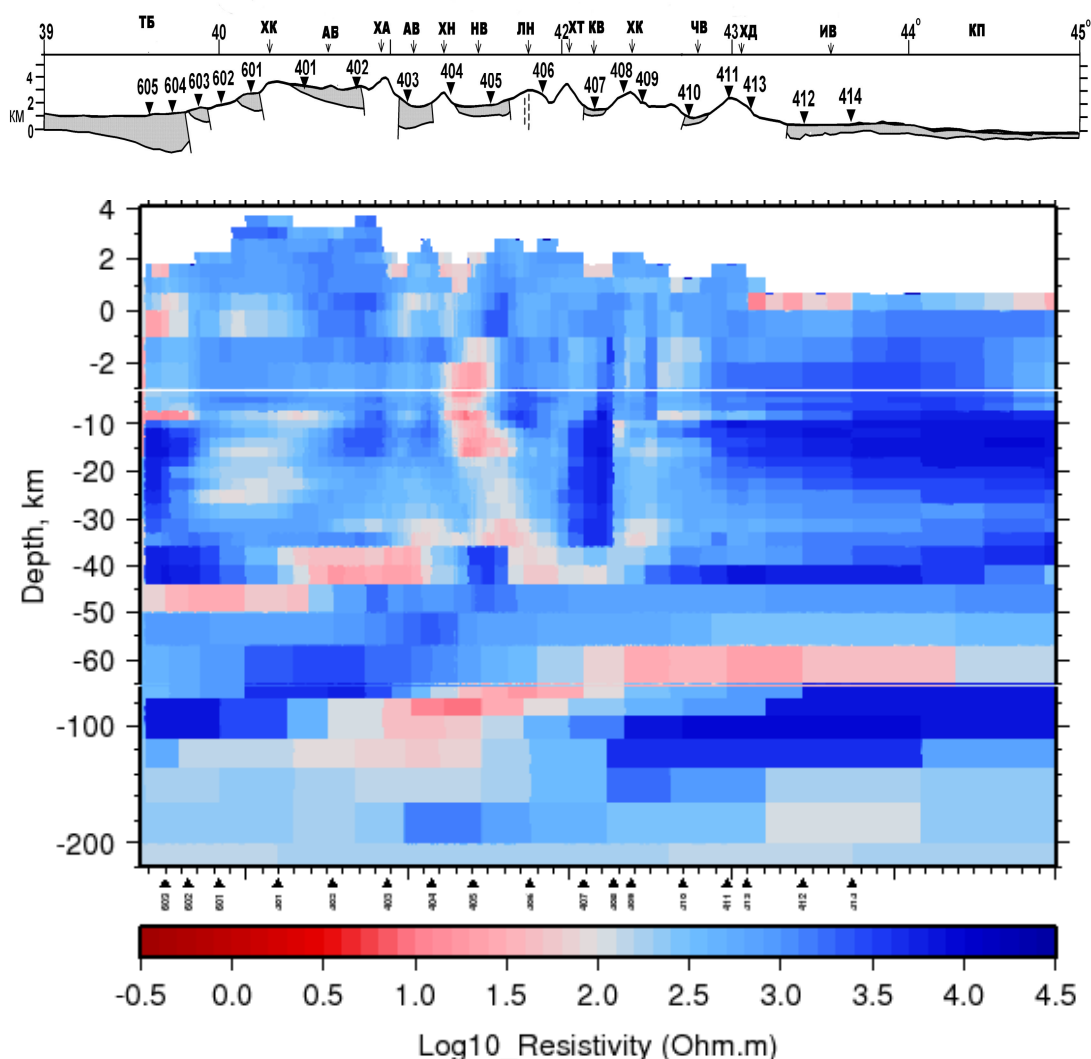


Рис. 2. Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня вдоль профиля NARYN, полученный путем осреднения набора результатов минимально регуляризованных инверсий МТ и LMT данных – модель «NARYN-INV2D». В верхней части рисунка показан профиль рельефа с осадочными отложениями и обозначением геоморфологических структур: ТБ – Таримская впадина; ХК – хребет Кокшаал; АВ – Аксайская впадина; ХА – хребет Атбаши; АВ – Атбашинская впадина; ХН – хребет Нарын; НВ – Нарынская впадина; ЛН – зона Линии Николаева; ХТ – хребет Терскей; КВ – Кочкорская впадина; ХК – хребет Киргизский; ЧВ – Чуйская впадина; ХД – хребет Джетыжол; ИВ – Илийская впадина.

Существенными элементами распределения электропроводности в разрезе геотраверса NARYN, полученного с помощью модели «NARYN-INV2D» (рис.2), являются: ниже-коровый слой пониженного сопротивления на глубинах 30-50 км и субвертикальные проводящие зоны в верхней и средней коре, контролируемые региональными разломами (наиболее мощная и глубинная зона расположена в центральной части профиля, под Нарынской впадиной). Также в разрезе спорадически проявился верхне-коровый проводник на глубинах около 10 км. Применение достаточно мощного инструмента инверсии и репрезентативный

характер набора исходных данных позволили получить большее разрешение распределения проводимости вдоль профиля NARYN в сравнении с более ранними геоэлектрическими построениями регионального масштаба [Трапезников и др., 1997] и более устойчивое решение по сравнению с моделью «NARYN-RLM», представленной в разделе 3.2.

В разделе 3.4 рассматривается построение двумерной региональной геоэлектрической модели вдоль геофизического трансекта MANAS, расположенного на территории Киргизии и Китая и пересекающего Центральный Тянь-Шань по меридиану в полосе 75-76-го градусов восточной долготы.

Для двумерной (2-D) инверсии наблюдаемых данных использовалась программа Макки, реализующая метод нелинейных сопряженных градиентов [Rodi and Mackie, 2001]. Входной ансамбль инвертируемых данных включал в себя скорректированные значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса для двух поляризаций ЭМ поля, заданные в 32 точках на профиле длиной около 220 км для 22 периодов в интервале от 0.01 до 2200 с.

Сеточная аппроксимация модели имеет 130 горизонтальных и 48 вертикальных ячеек с латеральными изменениями по размеру меньшими, чем коэффициент 1.5 между любыми соседними ячейками для того, чтобы удовлетворить ограничениям программы 2D инверсии.

Стартовая модель 2-D инверсии представляет собой горизонтально-слоистую среду. Верхняя (до глубин ~30 км) высокоомная часть стартового разреза содержит слои с удельным сопротивлением 100 Ом-м, 1000 Ом-м, 2000 Ом-м. Величина сопротивления приповерхностного слоя 100 Ом-м близка к среднему значению сопротивления верхней части разреза, полученной на исследуемой территории с помощью малоуглубинных методов электроразведки [Юдахин, 1983]. В нижней части стартовой модели на глубинах 30-45 км присутствует проводящая толща с удельным сопротивлением 30 Ом-м. Нижнекоровый проводящий слой, как основной элемент региональной геоэлектрической модели Центрального Тянь-Шаня, был выделен ранее [Трапезников и др., 1997; Рыбин и др., 2003]. Следует также отметить, что плотность и геометрия сетки разбиения в процедуре автоматизированной инверсии, а также включение всех блоков разбиения в оптимизационный подбор допускают свободный выбор коровых структур, удовлетворяющих различным гипотезам о глубинном геоэлектрическом строении изучаемого сечения литосферы Центрального Тянь-Шаня.

Входной ансамбль инвертируемых данных включал в себя значения кажущегося сопротивления и фаз импеданса для двух поляризаций ЭМ поля, заданных в пунктах наблюдений по профилю MANAS. Для профиля длиной около 400 км инвертировались данные 50 пунктов наблюдений, представленные на сетке из 22-41 периодов в интервале от 0.01 до 2200 с. Пределы погрешностей инвертируемых данных, являющиеся внутренними параметрами процедуры инверсии, были установлены следующим образом: модуль кажущегося сопротивления (TE мода) – 100%, модуль кажущегося сопротивления (TM мода) – 10%, фаза импеданса (TE мода) – 5%, фаза импеданса (TM мода) – 5%.

После нескольких тестовых расчетов инверсии было определено значение параметра регуляризации $\tau=3.0$.

В результате выполненных 207 внутренних итераций в процессе совместной параллельной инверсии всего входного ансамбля погрешность подбора данных по всем компонентам (RMS-невязка) составила 2.858. Результирующая модель профиля

MANAS представлена на рис. 3. Отметим, что полученная модель достаточно хорошо согласуется с результатами наблюдений.

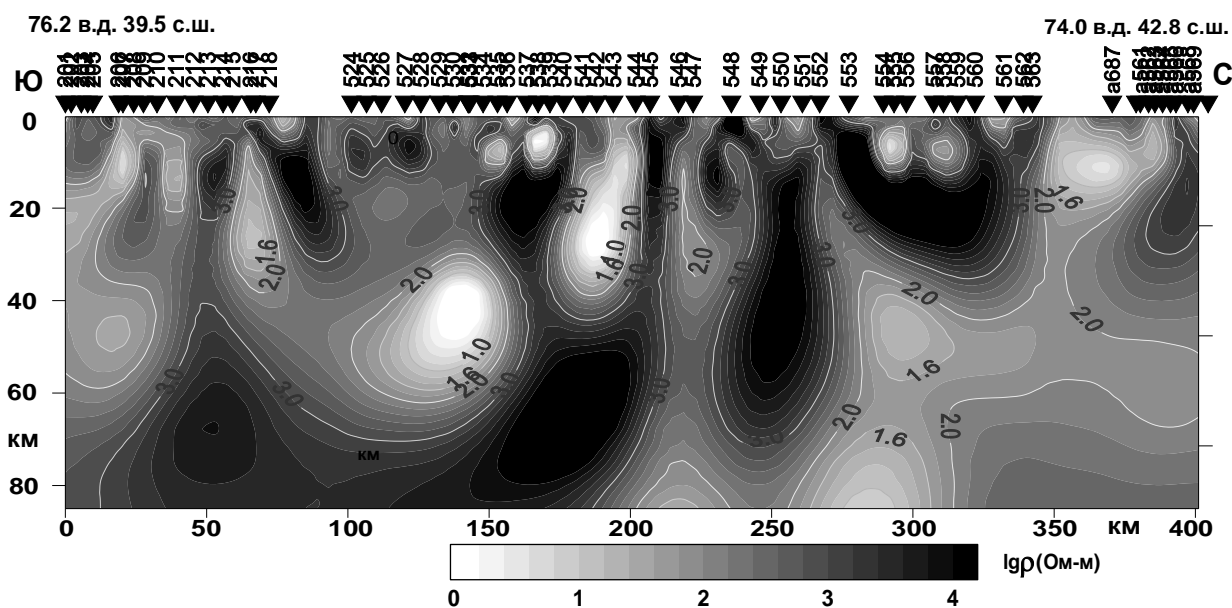


Рис. 3. Геоэлектрический разрез вдоль профиля MANAS, построенный с помощью программы двумерной инверсии Макки. Получен как результат совместной бимодальной инверсии всех компонент тензора импеданса (модули/фазы) и типпера (Re/Im). В верхней части рисунка показаны номера пунктов МТЗ-МВЗ и координаты крайних пунктов наблюдений профиля.

В качестве существенных элементов полученного разреза электропроводности профиля MANAS определяются:

- ниже-корový слой пониженного сопротивления менее 100 Ом-м на глубинах 40 - 60 км, фрагментарно отсутствующий в центральной части разреза;
- субвертикальные проводящие зоны в верхней и средней коре, наиболее мощные и глубинные из них расположены в центральной части профиля под Нарынской впадиной и на севере под Киргизским хребтом;
- спорадически проявляющийся верхне-корový проводник на глубинах около 10 км.

В разделе 3.5 обсуждаются вопросы, связанные с объяснением природы электропроводности земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня. В качестве важнейшего фактора необходимого для обеспечения повышенной проводимости рассматривается тектоническая расслоенность земной коры Тянь-Шаня [Макаров, 1982], где главным горизонтом расслоения, компенсирующим дисгармонию верхнекорových структур и более глубоких – нижнекорových и мантийных, является среднекорový проводящий слой, в котором предполагаются пластичные и квазипластичные деформации и течение вещества. Здесь в создавшихся условиях повышенной пористости высокая проводимость достигается только, если трещины заполнены хорошо проводящими водными растворами и являются сквозными. Рассматриваются два возможных источника появления свободной воды в трещинно-поровом пространстве земной коры Тянь-Шаня. *Первый источник* – высвобождение части связанной воды вследствие химической реакции дегидратации минералов, содержащих связанную воду [Ваньян, 1996; Vanyan and Gliko, 1999]. Количество химически связанной воды по разным оценкам достигает примерно одного весового

процента. В глубоких частях земной коры основными носителями связанной воды являются амфиболиты.

Высвобождение всей воды, химически связанной в породах средней части коры Тянь-Шаня, означало бы обезвоживание этих пород. Поскольку мы не имеем петрологических свидетельств обезвоживания, можно предположить, что работает *второй источник*: параллельно с дегидратацией идет процесс гидратации за счет флюидов, поступающих из верхней мантии. Гипотеза присутствия мантийных флюидов в земной коре Тянь-Шаня и возможные механизмы миграции флюидов из верхней мантии находят поддержку в работах Ю.Ф. Копничева [2002], связанных с исследованием динамики распределения поля поглощения сейсмических волн в нижней коре и верхней мантии Тянь-Шаня.

Таким образом, есть все основания полагать, что именно дегидратация пород в условиях активизации и разогрева до 600°C является источником флюида, создающего высокую электропроводность земной коры Центрального Тянь-Шаня.

Чем выше температура земной коры, тем меньше глубина рассматриваемой границы переходной зоны, отмеченная градиентом проводимости. Однако верхний уровень повышенной электропроводности, по-видимому, будет ограничиваться не только температурой дегидратации, но и уровнем фронта распространения связанной трещиноватости (квазипластичности), образующей сквозные каналы для обеспечения электрического тока. Именно такое механическое состояние пород в фиксированном интервале глубин верхней и средней коры в виде сообщающихся трещин, по которым циркулируют флюиды, благоприятно для резкого увеличения электропроводности. Что может привести к такому состоянию? Здесь нужно рассматривать несколько масштабных процессов и действующих сил. В качестве региональной причины рассматриваются неотектонические коллизионные процессы, создающие макро-реологическую структуру, являющуюся необходимым условием существования повышенной проводимости в региональном масштабе, но это может объяснить открытость только субмеридиональных трещин и разломных зон. В качестве локальных могут быть процессы гидратации и дегидратации, приводящие к переформированию фаций метаморфизма и увеличению пористости пород, а также неравновесное состояние иерархии разномасштабных неоднородностей, которые сами по себе создают градиентные условия для возникновения напряжений. В более глубоких горизонтах (в нижней коре), по-видимому, главенствует тектоническое течение вещества, т.е. деформации реализуются в чисто пластической форме. А это в определенной мере снижает проводимость нижнекоровых горизонтов и затрудняет возможность надежного разделения этого механизма от флюидо-дегидратационного с помощью изучения электрических свойств геосреды.

Глава 4. Использование геоэлектрических моделей для изучения локальных зон земной коры

В разделе 4.1 рассматриваются результаты площадного магнитотеллурического профилирования Северо-Тяньшанской сейсмогенерирующей зоны, расположенной на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) [Рыбин и др., 2008]. Его территория включает в себя большую часть Чуйской впадины и северного склона Киргизского хребта и ограничена простираем на расстояние около 150 км.

В результате проведения полевых измерений точность определения МТ передаточных функций в большинстве из 145 выполненных зондирований составляет 1-2% по модулю и около 0.5-0.8 градуса по фазе. На основе первоначального анализа

массива измеренных данных с целью оценки геоэлектрической размерности среды сделан вывод, указывающий на суперпозицию локальных трехмерных структур и региональной двумерной структуры в земной коре исследуемой территории БГП.

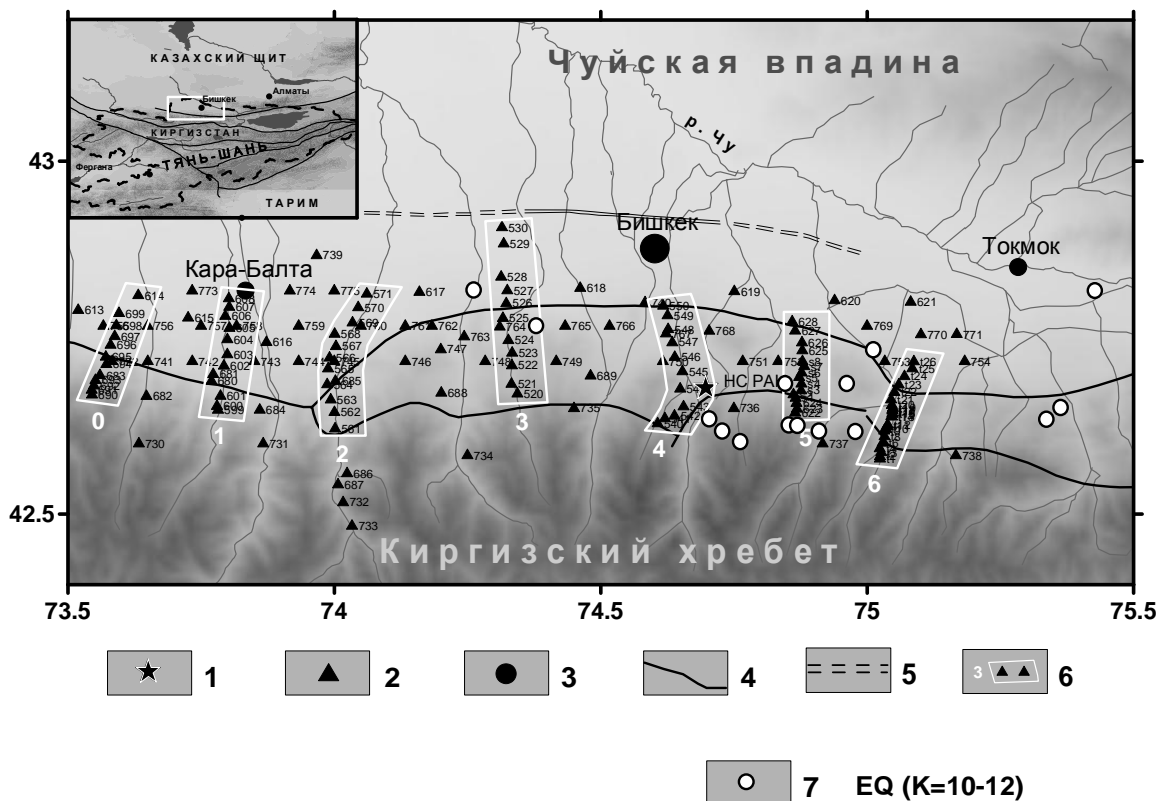


Рис. 4. Карта территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП). 1 – Научная станция РАН; 2 – пункты магнитотеллурического зондирования (МТЗ); 3 – крупные города; 4 – основные разломы; 5 – Центрально-Чуйская флексурно-разрывная зона; 6 – номер МТ профиля; 7 – эпицентры современных сильных землетрясений (энергетический класс $K > 10$). На врезке в левом верхнем углу светлым прямоугольным контуром показано расположение БГП и региональные профили МТЗ (белые линии).

С помощью инверсии нормализованных продольных амплитуд кажущегося сопротивления и исходных фаз импеданса построены квази-двумерные геоэлектрические разрезы вдоль линии каждого из 6 профилей исследования. Для двумерной (2-D) инверсии наблюдаемых данных использовалась программа Макки, реализующая метод нелинейных сопряженных градиентов [Rodi and Mackie, 2001].

В результате выполненных внутренних итераций в процессе совместной параллельной инверсии всего входного ансамбля (кажущегося сопротивления и фазы импеданса) величина погрешности подбора данных по всем компонентам (RMS-невязка) не превысила значения 3.0 для каждого из профилей исследования. Результирующие профильные модели представлены на рис. 5. Полученные модели достаточно хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Выполненные ранее рекогносцировочные зондирования по профилю 6 показали, что верхняя часть полученного геоэлектрического разреза (до глубины 5 км) хорошо согласуется с особенностями структурно-геологического разреза исследуемого участка [Рыбин и др., 2003; Rybin et al., 2004]. На каждом из показанных разрезов на рис. 5 проявляется достаточно закономерное чередование блоков различного

электрического сопротивления. Наклонная низкоомная структура, уходящая своими корнями в среднюю-нижнюю часть земной коры, отражает трещиноватую, механически ослабленную область в зоне надвигания для рассматриваемых сечений земной коры. Напротив, “жесткие” блоки среды, один из которых, например, выразительно проявился как высокоомный объект куполообразной формы в разрезе профиля 6 (интервал глубин 5-15 км), по-видимому, контролируют состояние процессов надвигообразования и распределение сейсмичности на этих глубинах.

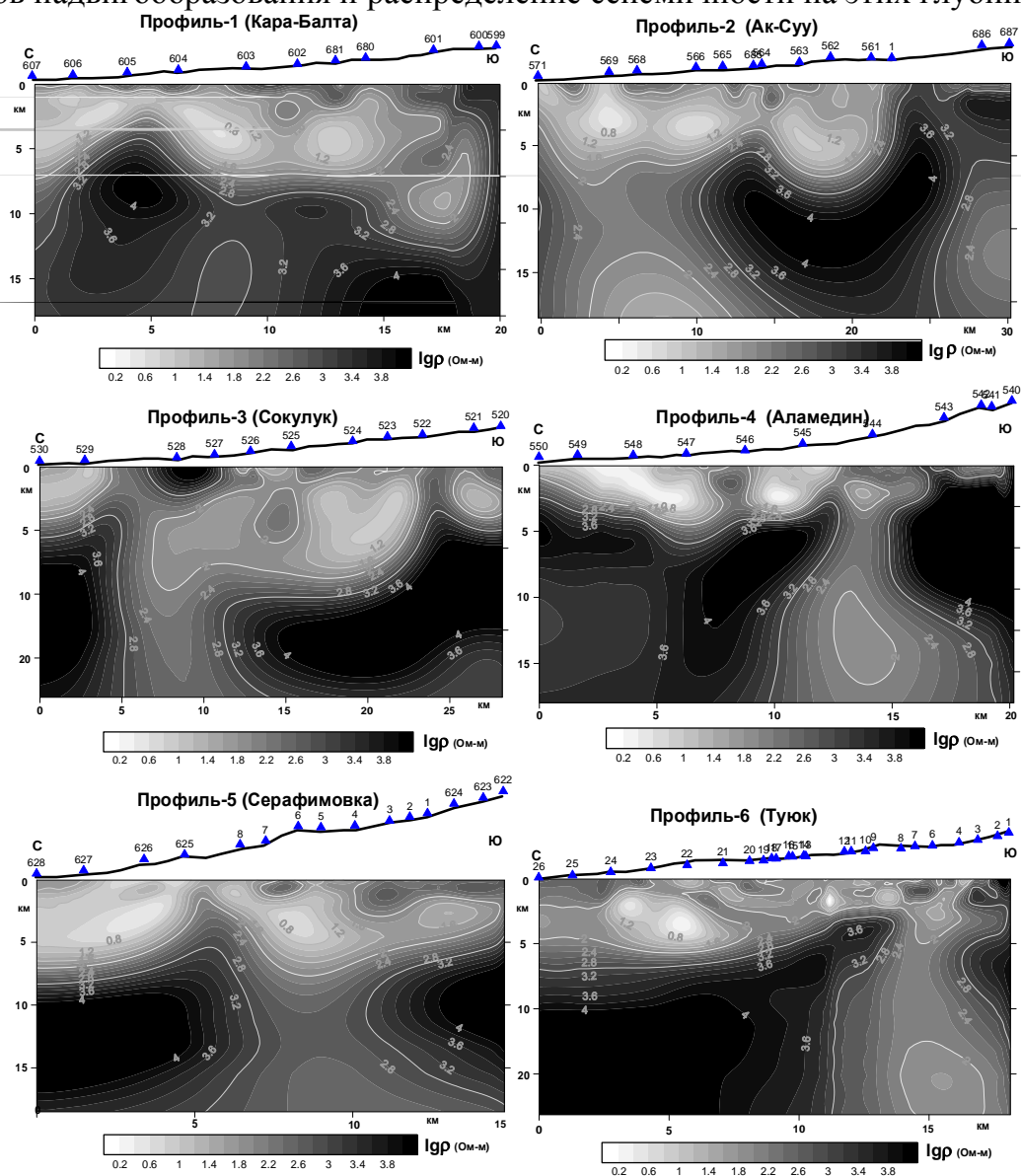


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы, полученные по шести МТ-профилям БГП. Изолинии указывают I_g удельного сопротивления в Ом-м.

В разделе 4.2 рассматривается построение геоэлектрической модели для одной из наиболее активных краевых надвиговых зон Тянь-Шаня - Иссык-Атинского участка Северо-Тяньшанской системы разломов [Рыбин и др., 2003]. Впервые доказана возможность исследования надвиговых структур в орогенных областях с помощью магнитотеллурических методов. В результате анализа геоэлектрического профильного разреза в исследуемом районе Иссык-Атинского участка Северо-Тяньшанской разломной зоны выявлено умеренно-пологое залегание плоскости надвига, подворот основания и частичное тектоническое перекрытие впадины.

В разделе 4.3 рассматриваются особенности геоэлектрической структуры земной коры зоны Таласо-Ферганского разлома [Баталев и др., 2003; Рыбин и др., 2005]. В результате двумерной инверсии данных МТЗ-МВЗ по серии локальных профилей, секущих зону Таласо-Ферганского разлома, во всех полученных сечениях в верхней части наблюдается высокоомное тело шириной от 9 до 20 км, ограниченное с северо-восточной стороны субвертикальным, а с юго-западной стороны наклонным проводящими каналами от средне-нижнекорового проводника к поверхности. В нижней коре в зоне, прилегающей к Таласо-Ферганскому разлому со стороны Западного Тянь-Шаня, определяется наклонный проводящий слой, выполаживающийся на глубине 30-35 км.

В разделе 4.4 представлены результаты изучения структуры зоны надвигания палеозойского основания хребта Терской Ала-Тоо на кайнозойские отложения Кочкорской впадины в районе Южно-Кочкорского краевого разлома с помощью МТ-профилирования [Park et al, 2002; Рыбин и др., 2005]. В полученном геоэлектрическом разрезе отчетливо проявляется проводящая область в диапазоне высот 400-1900 м выше уровня моря с удельным сопротивлением менее 100 Ом-м, находящаяся ниже 500-м слоя с сопротивлением, превышающим 100-300 Ом-м. Предполагается, что эта зона пониженного сопротивления представляет собой неогеновые осадочные отложения, погребенные под палеозоем фронтальной части хребта. Горизонтальная амплитуда надвига здесь может составлять 3-3.5 км.

Последний раздел четвертой главы посвящен результатам детального магнитотеллурического и магнитовариационного профилирования на южном 140 км сегменте геофизического трансекта MANAS [Рыбин и др., 2009]. Рассматриваемый участок профиля показан светлым прямоугольным контуром на рис. 1. Построена двумерная геоэлектрическая модель, характеризующая слоисто-блоковую структуру литосферы в зоне сочленения Центрального Тянь-Шаня и северного борта Таримской плиты (рис. 6). Выявлены низкоомные зоны разупрочнения, предположительно, связанные с поддвижением Тарима под Тянь-Шань. Выделены геоэлектрические неоднородности разреза, указывающие на коровый масштаб современных деформаций в самом Таримском блоке.

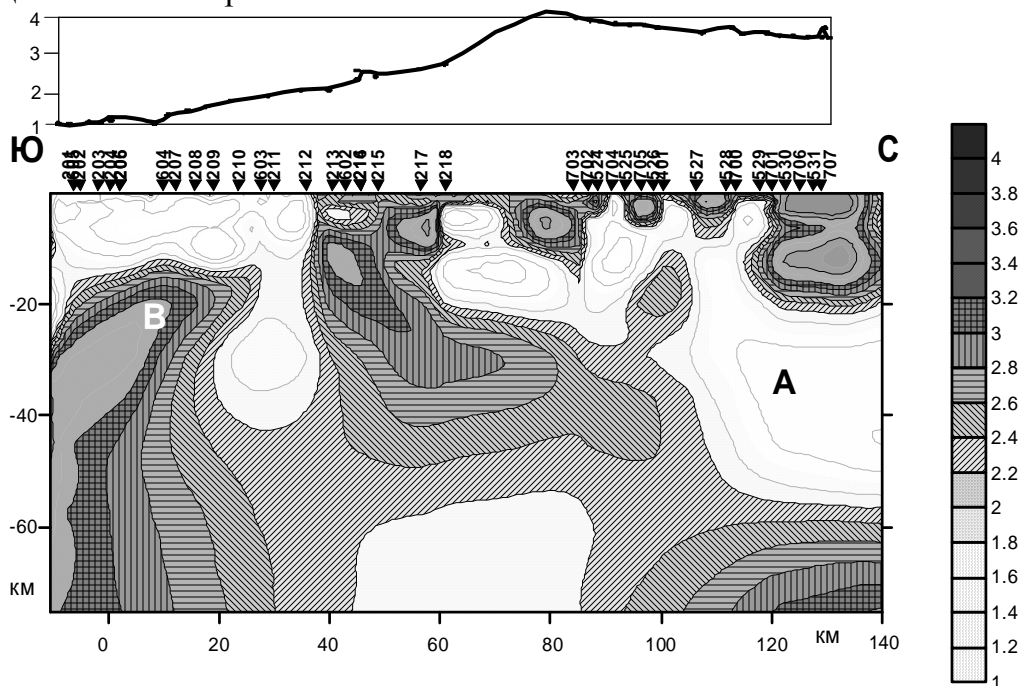


Рис. 6. Геоэлектрический разрез вдоль профиля Аксай-Артуш, построенный с помощью программы двумерной инверсии Макки. Получен как результат совместной бимодальной инверсии всех компонент тензора импеданса (модули/фазы) и типпера (Re/Im). В верхней части рисунка показаны номера пунктов МТЗ. Вертикальный, горизонтальный масштабы – км. Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного электрического сопротивления в Ом·м.

Глава 5. Результаты геоэлектрических построений в сопоставлении с комплексом геофизических, геодезических и сейсмологических данных, полученных в регионе

В разделе 5.1 выполнен сравнительный анализ комплексного сейсмического разреза и геоэлектрического разреза МТЗ по геотраверсу MANAS. Рассматривается построение комплексного сейсмического разреза на основе результатов обработки профильных сейсмических материалов МОВ-ОГТ, МОВЗ и сейсмотомографии [Щелочков и др., 2009], [Макаров и др., 2010].

Сейсмический профиль MANAS (39°-42 с.ш., 75°-76° в.д.) является геотраверсом нового поколения, основанным на многоволновых сейсмических наблюдениях с использованием взрывных источников по системе многократных перекрытий МОВ-ОГТ. Расположение профиля MANAS показано на рис. 1. Дополнительно с помощью широкополосных сейсмических станций, установленных вдоль линии профиля, осуществлялись сейсмические просвечивания с использованием естественных источников (землетрясений).

Возникшие в XX веке сейсмологические и сейсмические методы изучения земной коры и верхов мантии сегодня существенно продвинулись с точки зрения изучения сложно построенных гетерогенных сред. В кристаллической коре неоднородности петрологии, плотности, флюидонасыщенности, изотропии, пористости, проницаемости приводят не только к вариациям сейсмической скорости, но и к дифференциации волновых полей, регистрируемых и обрабатываемых по модели отраженных волн. Сложная «смесь» метаморфических и изверженных пород, очевидная реологическая расслоенность среды (есть волноводы и магматические камеры) и другие факторы приводят к различиям в отражательной и дифрактообразующей способности среды, что выражается в понятии сейсмической «мутности», которая зависит от степени насыщенности волновых полей точками дифракции и отражающими площадками и от положения рефлекторов и дифракторов. Именно анализ сейсмических разрезов МОВ-ОГТ с позиции распределения параметра мутности является на сегодняшний день нетрадиционным подходом, дающим новые результаты по вещественно-структурной дифференциации кристаллической коры и верхней мантии.

На рис. 7 (верхняя панель) представлен «сшитый» (без субширотных участков) комплексный сейсмический разрез по спрямлённой линии профиля MANAS, объединяющий в согласованном масштабе результаты обработки сейсмических данных профиля по всем трем методам. Построенный разрез имеет сложную гетерогенную структуру, определяемую как очевидной горизонтальной расслоенностью земной коры, так и пересечением горизонтально-слоистой среды вертикальными и наклонными деструктивными зонами. При этом в разрезе проявляются следующие слои: осадочный (местами дифференцируемый на комплексы), складчатый, кристаллический и более глубокие комплексы коры - верхней, средней и нижней. На границах складчатого и кристаллического комплексов, а также верхней и нижней коры (т.е. вся средняя кора) фиксируются

горизонты или слои повышенной пластичности, отличающиеся понижением плотности рассеянных волн. В целом горизонтальная расслоенность согласуется с принципом изостатической компенсации по данным плотностного моделирования и достаточно традиционна для вещественно-структурных, реологических и геодинамических моделей земной коры Тянь-Шаня, в которые входят и волноводные слои и линзы повышенной пластичности и/или разупрочнённости [Макаров др., 1982].

В разрезе выделяется также крутопогружающаяся под сооружения Тянь-Шаня деструктивная тектоническая зона, представленная серией гетерогенных пластин. Угол падения этой зоны в общем уменьшается с глубиной, что свидетельствует о ее коллизионной природе и связано с пододвиганием Таримской плиты под складчатые сооружения Тянь-Шаня. Зона поддвига Тарима под Тянь-Шань рассматривается в ряде концептуальных моделей (см., например, [Современная геодинамика..., 2005]), но экспериментально сейсмическими данными зафиксирована впервые.

Вертикальная полосчатость рисунка, характерная для всего разреза, для нижнекорового и более глубоких слоев представляет наиболее интересную особенность и загадку. В разрезе выделяются крупные колонны наиболее “мутных” (темных) сред под Аксайской и Нарынской впадинами, а также в Атбаш-Иныльчекской шовной зоне. Вертикальная полосчатость разреза, может иметь естественную природу и отражать вещественно-структурную и реологическую дифференциацию среды. Также вертикальные структуры могут отражать области (каналы) высокой интенсивности глубинных флюидно-газовых и тепловых потоков. Можно предполагать, что именно они в значительной мере обеспечивают вертикальные перетоки и перераспределение вещества в различных слоях коры, в том числе его нагнетание под системы поднятий с утолщением коры и отток из-под межгорных и предгорных прогибов с утонением коры. По-видимому, эти вертикальные зоны вместе с горизонтальными волноводными каналами повышенной пластичности и текучести формируют геодинамическую систему, концептуально рассмотренную в модельных построениях М.Г.Леонова и В.И.Макарова [Современная геодинамика..., 2005] и позволяющую объяснить структуру и динамику разреза в сечении профиля.

Проведем сравнительный анализ в региональном масштабе и рассмотрим сейсмический и геоэлектрический разрезы по всей длине выполненных профилей МОВ-ОГТ и МТЗ. На рис. 7 в согласованных горизонтальном и вертикальном масштабах показаны комплексный сейсмический разрез и разрез двумерной геоэлектрической модели профиля. Горизонтальная координата геоэлектрического разреза отвечает меридиональному направлению, поэтому для сравнительного анализа выбирались фрагменты временного разреза, соответствующие участкам сейсмического профиля с азимутом близким к меридиональному направлению.

Если говорить о региональной расслоенности исследуемой геосреды, то результаты геоэлектрики, представленные на рис 7, в большей мере демонстрируют присутствие горизонтального (субгоризонтального) проводящего слоя в диапазоне глубин 20-60 км, за исключением, пожалуй, зоны в центральной части профиля, где отмечается сложная картина чередования резко дифференцированных по проводимости вертикальных структур, достигающих своими корнями глубин подошвы нижней коры.

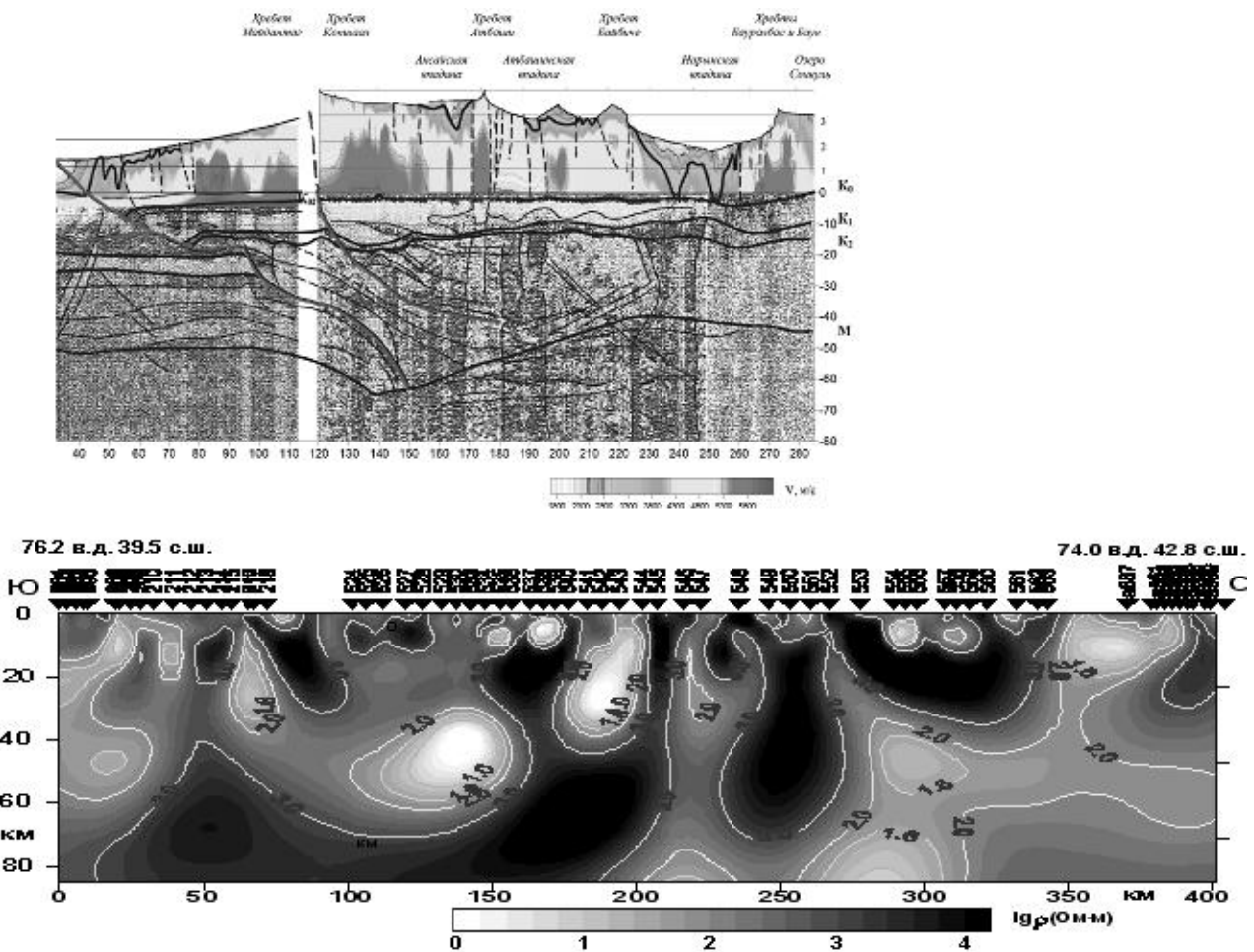


Рис. 7. Сопоставление сейсмического разреза МОВ-ОГТ по [Макарову и др., 2010] (вверху) и геоэлектрического разреза МТЗ (внизу) в согласованном горизонтальном масштабе. Белыми линиями на разрезе МТЗ оконтурены проводящие зоны с удельным сопротивлением < 100 Ом-м.

На сейсмическом разрезе преобладают крутонаклонные структуры и границы, отражающие тонкую структуру распределения неоднородностей в земной коре. В методе МТЗ такие неоднородности сглаживаются в получаемом отклике из-за диффузного распространения зондирующего электромагнитного поля в Земле, т.е. метод МОВ-ОГТ и метод МТЗ по разному «чувствуют» геометрию структурных особенностей земной коры. Поэтому, на данном этапе интерпретации для сравнения результатов МОВ-ОГТ и МТЗ в первую очередь важно выделить крупные блоки геосреды с различной степенью гетерогенности на основе понятий интегральной сейсмической мутности и прозрачности.

Из визуального анализа рис. 7 следует, что в целом на качественном уровне просматривается корреляция отражательных свойств среды с ее электрическими характеристиками, так областям с повышенной плотностью рефлекторов отвечают проводящие области в геоэлектрической модели. Наиболее отчетливо такое соответствие проявляется для наклонных и субвертикальных проводящих структур в средней-нижней коре. Более сложная картина распределения электрических и сейсмических неоднородностей, а также их взаимоотношений наблюдается в центральной части МТ профиля (пункты 543-551) в районе Сон-Кельской и Нарынской впадин. Тонкая расслоенность земной коры более отчетливо видна в

данных ОГТ по сравнению с магнитотеллурическим откликом, где присутствуют сглаживающие эффекты вследствие диффузного распространения зондирующего электромагнитного поля в Земле. Таким образом, каждый из методов решает свои задачи и соответственно оба метода по-разному описывают неоднородную структуру земной коры и верхней мантии. Совместное применение методов дает возможность исследователю получить взаимодополняющую информацию об изучаемых объектах геосреды.

В разделе 5.2 рассмотрены деформации земной коры Центрального Тянь-Шаня, полученные методом расчета двумерного регионального поля деформации по результатам наблюдений средствами глобальной космической геодезии (GPS) [Рыбин, Костюк, 2008]. Остановимся подробнее на результатах совместного анализа рассчитанного двумерного поля деформации с параметрами глубинного геоэлектрического разреза Центрального Тянь-Шаня вдоль профиля NARYN (модель «NARYN-INV2D»).

Для совместного анализа поля деформации с параметрами опорного геоэлектрического разреза использовано профильное сечение регионального распределения горизонтальной деформации вдоль линии меридиана 76° в.д. Выборка для построения такого сечения, пространственно совпадающего с профильным геоэлектрическим разрезом, сформирована из общего массива значений деформационного поля и показана на рис. 8 в виде графика значений среднегодовой скорости дилатации по профилю сравнения.

В качестве геоэлектрического параметра для сопоставления с профильным распределением деформаций выбрана наиболее устойчиво определяемая характеристика геоэлектрических построений - суммарная продольная проводимость земной коры $S(z)$, вычисляемая по формуле:

$$S(z) = \int_0^z \frac{1}{\rho(z)} dz$$

где $\rho(z)$ - удельное электрическое сопротивление, измеряемое в Ом·м, z - вертикальная координата. При расчете проводимости исключены из рассмотрения геоэлектрические неоднородности верхней 10 км толщи разреза вдоль линии профиля, создаваемые, в первую очередь, проводящими структурами осадочного комплекса межгорных впадин.

Полученное распределение интегральной продольной проводимости земной коры в интервале глубин 10-60 км по профилю NARYN показано в нижней части рис. 8. Наблюдаемая на рисунке визуальная пространственная корреляция экстремумов этих распределений может свидетельствовать о взаимосвязи поверхностных деформаций с параметрами проводящего слоя в нижней коре (удельное сопротивление и мощность слоя) в рассматриваемом сечении вдоль линии профиля.

С точки зрения степени геоэлектрической неоднородности и тектонической активности средней-нижней коры профиль NARYN условно можно разделить на два приблизительно одинаковых по длине участка: северный и южный. К северному участку будем относить часть профиля, которая расположена к северу от разломной зоны Линия Николаева, пересекает геологические структуры Северного Тянь-Шаня и выходит на юго-восточную окраину Казахского щита. Южный участок профиля находится в пределах Срединного и Южного Тянь-Шаня. Маркер, разделяющий профиль на две части, показан на рис. 8 звездочкой.

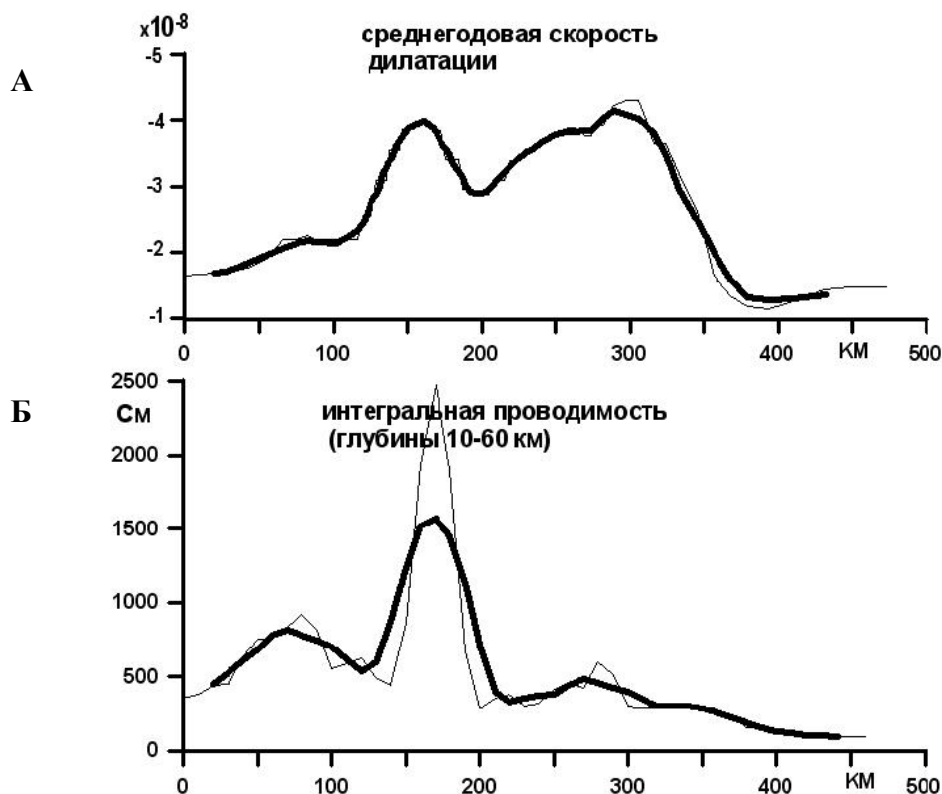


Рис. 8. Сопоставление интенсивности среднегодовых горизонтальных деформаций на дневной поверхности ($n \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$) по данным GPS (1995-2005 гг.) вдоль профиля NARYN (А) с распределением интегральной продольной проводимости земной коры $S(z)$ в интервале глубин 10-60 км по профилю (Б).

Отметим высокую степень корреляции ($\kappa=0.84$) между интенсивностью горизонтальной деформации на поверхности земной коры и интегральной проводимостью нижнекорового электропроводящего слоя в северной половине профиля. В южной части профиля отсутствует значимая корреляция этих параметров ($\kappa=0.48$). Попробуем объяснить этот факт.

Ранее в работах [Трапезников, 1997; Брагин и др., 2001; Рыбин и др., 2003] были обоснованы флюидонасыщенность регионального электропроводящего слоя и возможность тектонического течения в виде пластической деформации в средней-нижней коре Центрального Тянь-Шаня. При этом изменения параметров проводящего слоя (мощность и сопротивление) могут реализовать градиент скорости латерального потока пластичного нижнекорового материала. Например, увеличение мощности (толщины) пластичного слоя будет сопровождаться соответствующим уменьшением скорости потока пластичного материала в нем, а уменьшение мощности - увеличением скорости потока. Уменьшение скорости потока в коровом слое приводит к уменьшению скорости движения поверхности Земли, что проявляется на деформационном графике в виде ниспадающих участков. Таким образом, можно говорить о том, что деформация в северной части профиля, наблюдаемой на земной поверхности с помощью метода GPS, отражает горизонтальную структуру пластического течения вещества в нижней коре региона.

Более сложные связи между деформационными и геоэлектрическими параметрами присутствуют в южной части профиля, распределение деформационного процесса по глубине и соотношение между хрупкой и пластичными деформациями имеют здесь более неоднозначный характер. Соответственно, усложняется картина регионального деформационного поля, наблюдаемого на поверхности, и отражающая

суммарную хрупко-пластичную деформацию земной коры. В качестве главного фактора здесь можно рассматривать присутствие жестких слоев в средней-нижней коре южной части профиля, подверженных хрупким деформациям, в сочетании с пластическими слоями и такое строение коры отличается от северной половины профиля, где нижняя кора оказывается пластичной. В геоэлектрическом разрезе земной коры на южном участке также выявляется более неоднородное распределение электропроводности, чем в северной части профиля. Отметим, что геоэлектрический разрез профиля NARYN характеризует две разные неотектонические области: с севера – область **надвиговых** деформаций коры (надвиг на север), с юга – область **поддвиговых** дислокаций, структурно и энергетически существенно различных.

В разделе 5.3 сделана попытка исследования взаимосвязи параметров геоэлектрических неоднородностей земной коры с пространственным распределением современных сильных землетрясений (энергетического класса $K > 10$) в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) [Рыбин, 2011]. На основе данных детальных магнитотеллурических зондирований построены двумерные геоэлектрические модели вдоль профилей 1 и 6, расположенных в западном и восточном сегментах зоны БГП и пересекающих линии региональных разломов (рис.4).

Для двумерной инверсии наблюдаемых профильных данных использовалась программа Макки. Результирующие профильные модели представлены на рис. 9.

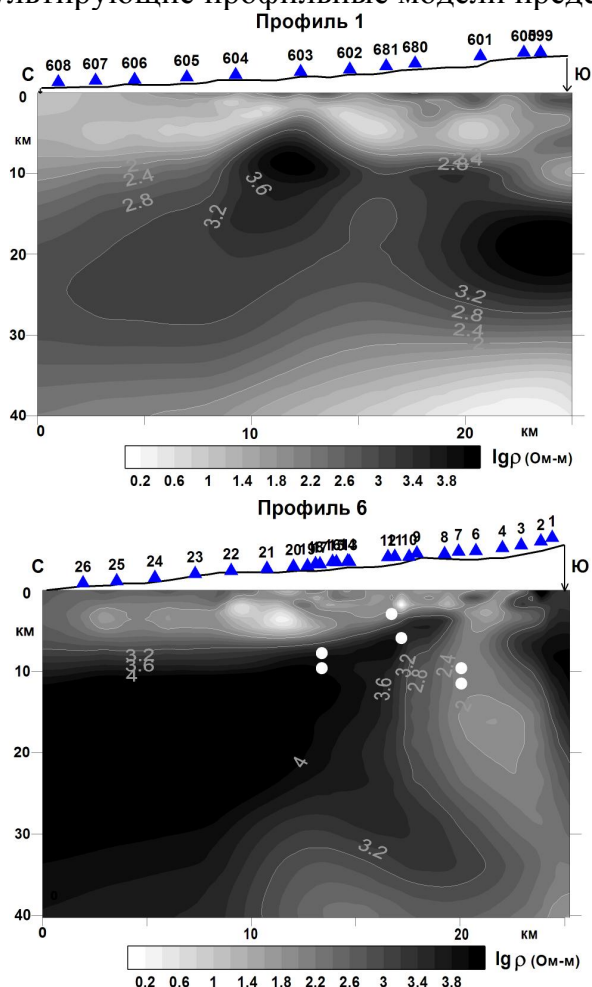


Рис. 9. Геоэлектрические разрезы, полученные по МТ-профилям 1,6 на территории БГП. Изолинии указывают десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом-м. Белые кружки – гипоцентры сильных землетрясений энергетического класса $K > 11$.

Выявленные в геоэлектрических моделях проводящие зоны, пространственно приуроченные к выходу на поверхность Шамси-Тюндюкского разлома, по-видимому, представляют собой механически ослабленные области повышенной трещиноватости, заполненные флюидом. По этой причине различия в величинах и распределении сопротивлений этих проводящих зон в рассматриваемых разрезах могут отражать различный уровень концентрации флюида или разную степень связности порово-трещинного пространства.

Анализ временных вариаций сейсмичности Северного Тянь-Шаня, выполненный в работе [Пономарев, Макаров, 2005], показал резкий рост числа землетрясений, начиная с 10 энергетического класса, к концу XX века. Так, по данным сейсмологической сети KNET за период 1994-2008 гг. для той части территории БГП, где были выполнены детальные магнитотеллурические зондирования, произошло 15 сейсмических событий энергетического класса $K > 10$. Большинство эпицентров землетрясений приурочено к восточной части зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта в окрестности МТ-профилей 4, 5, 6 (см. рис. 4) и при этом проявляется их группирование в некоторой полосе пространственно расположенной вблизи линии выхода Шамси-Тюндюкского разлома на земную поверхность. Шамси-Тюндюкский разлом на поверхности отделяет горную часть Киргизского хребта от предгорий и служит границей палеозойских образований южного и неоген-четвертичных отложений северного крыльев. На основании такого неоднородного распределения сейсмичности вдоль линии разлома можно выделить восточный сегмент разлома с высоким уровнем “сильной” сейсмичности и, соответственно, относительно слабо сейсмичные центральный и западный сегменты. Глубины очагов этих землетрясений распределены неравномерно и наибольшее их число таких приурочено к интервалу глубин 7-20км.

Рассмотрим более подробно основные элементы построенных двумерных геоэлектрических моделей, отражающих глубинную структуру западного и восточного сегментов зоны БГП, существенно отличающихся друг от друга по уровню “сильной” сейсмичности. Итоги сопоставления этих профильных геоэлектрических моделей приведены в Таблице-1.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа характеристик электрической структуры профильных разрезов БГП

	Профиль 1 (западный сегмент БГП) – (в период 1994-2008 гг. сильные землетрясения отсутствовали)	Профиль 6 (восточный сегмент БГП) – (в период 1994-2008гг. произошло 6 сильных землетрясений с $K > 11$)
Верхняя кора	Более протяженная в горизонтальном направлении низкоомная зона, глубже расположена подошва проводника, ниже сопротивление проводящей зоны	Более протяженная и мощная высокоомная зона
Средняя кора	Интегрально более проводящая и более контрастная среда	Менее проводящая и более однородная среда Есть субвертикальный канал, соединяющий нижнекоровый проводник с верхнекоровым
Нижняя кора	Более мощная проводящая зона, имеет практически повсеместное распространение в нижней части разреза. Очень низкое сопротивление по сравнению с нижней частью разреза профиля 6	Проводник локализован в южной части разреза

Неоднородность распределения проводимости в нижней коре рассматриваемых разрезов, достаточно близко расположенных друг к другу, может показаться загадочной. Однако, исходя из флюидной природы пониженного электрического сопротивления и низких скоростей сейсмических волн в нижней коре региона [Vanyan and Gliko, 1999; Рыбин и др., 2005], неоднородное распределение проводимости можно объяснить особенностями и различиями протекающих процессов диффузии флюида из нижнекорового горизонта к земной поверхности. Так наблюдаемое понижение нижнекоровой проводимости в разрезе профиля 6 по отношению к разрезу профиля 1 можно объяснить присутствием в средней коре разреза профиля 6 достаточно мощного проводящего субвертикального канала, который в значительной мере способствует диффузии флюида вверх, тем самым уменьшая концентрацию флюида в нижней коре. Такой процесс приводит к изменению поля напряжений в сейсмогенерирующей области и в некоторых случаях к землетрясениям. Отметим также, что проекция субвертикальной проводящей зоны на земную поверхность маркируется минеральными источниками вдоль всего Киргизского хребта. В этой зоне пробурено несколько скважин, которые характеризуются выходом углекислых термальных (до 80°C) минерализованных вод.

Необходимо отметить влияние другого фактора на величину проводимости среды – степени дробления (трещиноватости) среды и связности трещин между собой. Земная кора на территории БГП испытывает региональное силовое давление с юга, как результат влияния дальней зоны коллизии. В первом приближении это силовое поле можно считать однородным вдоль широтного простирания зоны БГП, о чем косвенно может свидетельствовать одинаковый характер поведения северной компоненты скорости движения земной поверхности вдоль серии профилей, построенных по результатам региональных GPS наблюдений и секущих зону БГП в меридиональном направлении на различных участках ее простирания близких к рассматриваемым МТ профилям [Рыбин, 2011]. В таких условиях ключевую роль в формировании поля напряжений, особенности которого, в конечном счете, определяют наблюдаемое пространственное распределение сейсмичности в зоне БГП, начинают играть реологические и структурные неоднородности земной коры. Можно предположить, что высокоомный блок в средней-нижней коре разреза профиля 6, занимающий большой объем среды и более жесткий в сравнении с высокоомной зоной в разрезе профиля 1, при передаче регионального давления с юга на север служит своеобразным упором в такой динамической системе и, соответственно, в этом месте создаются условия для длительного накапливания упругих напряжений и их разрядки в виде сильных землетрясений. Таким образом, подтверждается высокий уровень "сильной" сейсмичности восточного сегмента зоны БГП, где за период 1994-2008 гг. в окрестности профиля 6 произошло 12 сильных землетрясений энергетического класса $K > 10$.

Анализ взаимосвязи местоположения гипоцентров рассматриваемых сильных землетрясений и геоэлектрических неоднородностей выявил преимущественную приуроченность очагов землетрясений к зонам вертикального и горизонтального градиентов электрических свойств среды (рис. 9). Однако, хотя в разрезе профиля 1 присутствуют градиенты сопротивления, обусловленные высокоомными телами и зонами низких сопротивлений, сильных землетрясений энергетического класса $K > 10$ там не происходит. По-видимому, магнитуда рассматриваемых землетрясений зависит от площади контакта геоэлектрических аномалий, обусловленной размерами

высокоомных тел, и, возможно, величины вертикального или горизонтального градиентов сопротивления, создаваемых высокоомными телами с зонами низких сопротивлений. В таких областях земной коры создаются благоприятные условия для длительного накапливания тектонических напряжений, их дальнейшая разрядка происходит в краевых частях высокоомных тел, являющихся концентраторами энергии. Источниками тектонических напряжений могут быть перемещения верхнекоровых блоков по разупрочненному астенослою средней-нижней коры в обстановке субмеридионального сжатия, а также процессы пластического течения вещества и его пространственного перераспределения на уровне нижней коры и верхней мантии региона [Макаров, 1982; Макаров, 2005].

Таким образом, положение землетрясений энергетического класса $K > 10$, произошедших на территории БГП, может быть объяснено геоэлектрическими особенностями земной коры и в первую очередь наличием высоких градиентов сопротивления, обусловленных высокоомными телами и зонами низких сопротивлений. При этом разрядка напряжений происходит в краевых частях высокоомных тел, являющихся накопителями энергии. Интенсивность землетрясений, по-видимому, зависит от размеров, положения и упругих параметров высокоомных тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований создан методический, программный и аппаратный комплекс для глубинных электромагнитных зондирований Центрального Тянь-Шаня и предложено решение крупной научной проблемы в области наук о Земле, связанной с развитием геофизических методов, использующих естественное электромагнитное поле Земли для изучения внутреннего строения литосферы сложно построенных регионов.

Главным итогом диссертационной работы является выполненное автором научное обобщение материалов и методик количественной интерпретации данных глубинных электромагнитных зондирований, осуществляемых уже более 25 лет Научной станцией РАН в Тяньшанском регионе и сопредельных территориях. На этой основе построена глубинная геоэлектрическая модель литосферы Центрального Тянь-Шаня и выполнено междисциплинарное обобщение результатов геоэлектрических построений с данными других геофизических исследований глубинного строения региона. Автором детально исследованы распределения электрических свойств земной коры Центрального Тянь-Шаня вдоль двух опорных комплексных геотраверсов NARYN и MANAS, пересекающих в субмеридиональном направлении весь горный пояс с выходом на Казахский щит и Таримскую плиту, и ряда отдельных локальных зон, представляющие собой ключевые элементы современной геодинамической системы Тянь-Шаня, и поэтому интересных с точки зрения понимания их глубинной структуры и протекающих процессов.

Наиболее важные результаты проведенных автором исследований сводятся к следующему.

1. Модифицированы стандартные программные средства обработки полевых материалов магнитотеллурических и магнитовариационных наблюдений, полученных в Тяньшанском регионе (раздел 2.3).

2. Последовательно реализованы несколько оригинальных подходов к количественной интерпретации данных МТЗ-МВЗ с учетом сложного

геоэлектрического строения литосферы горного региона Тянь-Шаня и сильных приповерхностных искажений (раздел 2.4), прежде всего:

- трехуровневый алгоритм 2D инверсии магнитовариационных и магнитотеллурических данных с ведущей ролью магнитных откликов и импедансных фаз, наименее подверженных влиянию 3D неоднородностей;

- алгоритм сглаживающей 2D инверсии Макки [Rodi, Mackie, 2001];

- новая концепция 2D интерпретации 3D искаженных данных в рамках метода многокомпонентной совместной инверсии Варенцова [2002, 2006, 2011] с возможностью учета влияния рельефа поверхности наблюдения, взвешивания данных на основе количественных мер их 3D искаженности и робастного осреднения всего набора приемлемых решений инверсии.

3. Наиболее полно и последовательно методика 2D интерпретации применена при построении геоэлектрической модели «NARYN-INV2D» вдоль геотраверса NARYN (раздел 3.3). Геоэлектрическая модель «MANAS» вдоль одноименного геотраверса построена в классе сглаженных геоэлектрических структур (раздел 3.4).

На основе региональных моделей «NARYN-INV2D» и «MANAS» выявлена слоисто-блоковая геоэлектрическая структура литосферы Центрального Тянь-Шаня, проявляющаяся в чередовании зон повышенного и пониженного сопротивления, что свидетельствует об ее высокой гетерогенности и тектонической расслоенности. В этих разрезах земной коры выявлены проводящие слои с удельным сопротивлением 10-20 Ом-м в нижней коре на глубине 30-50 км, крупная проводящая область под Нарынской впадиной и спорадически проявляющиеся верхнекоровые проводники. В разрезах выделяются структуры пониженного сопротивления, пространственно приуроченные к зонам основных разрывных нарушений в зонах Линии Николаева, Северо-Тяньшанского, Южно-Кочкорского, Таласо-Ферганского, Атбаш-Иныльчекского и Южно-Тяньшанского разломов (разделы 3.3 и 3.4).

4. Предложена флюидо-дегидратационная гипотеза, объясняющая физическую природу проводящих объектов в земной коре и возможно верхней мантии Центрального Тянь-Шаня. В рамках этих представлений фактор тектонической расслоенности средней и нижней коры Тянь-Шаня обеспечивает необходимые условия для повышения пористости и проницаемости среды. В таких условиях высокая проводимость достигается лишь, если трещины заполнены хорошо проводящими водными растворами и являются сквозными. Возможны два источника появления свободной воды в трещинно-поровом пространстве земной коры Тянь-Шаня: химическая реакция дегидратации минералов и процесс гидратации за счет флюидов, поступающих из верхней мантии (раздел 3.5).

5. Доказана возможность детального исследования надвиговых структур в орогенных областях с помощью методов МТЗ-МВЗ. Построены двумерные геоэлектрические разрезы вдоль серии из шести субмеридиональных и субширотных детализационных профилей на территории Бишкекского геодинамического полигона. В результате определены глубинные части активных тектонических надвиговых структур в зоне сочленения северной граничной области Центрального Тянь-Шаня с Казахским щитом (раздел 4.1). Проведено построение и анализ характеристик геоэлектрического разреза одной из наиболее активных краевых надвиговых зон Тянь-Шаня - Иссык-Атинского участка Северо-Тяньшанской системы разломов. Здесь выявлено умеренно-пологое залегание плоскости надвига, подворот основания и частичное тектоническое перекрытие Чуйской впадины (раздел 4.2).

В геоэлектрической структуре зоны сочленения Центрального Тянь-Шаня и Таримской плиты определена протяженная низкоомная зона разупрочнения, начинающаяся южнее Аксайской впадины и полого погружающаяся под Тянь-Шань до глубин 50-60 км. Предполагается, что положение этой зоны отражает процесс пододвигания литосферы Тарима под Тянь-Шань (раздел 4.5).

6. В результате проведенного сравнительного анализа сейсмического разреза МОВ-ОГТ с профильным геоэлектрическим разрезом «MANAS» установлена на качественном уровне корреляция отражательных свойств среды с ее электрическими характеристиками: зонам с повышенной плотностью рефлекторов отвечают проводящие области. Тонкая расслоенность земной коры более отчетливо видна в сейсмических данных МОВ-ОГТ по сравнению с магнитотеллурическим откликом, сглаженным вследствие диффузного распространения электромагнитного поля в Земле, в то же время диапазон изменения электрических сопротивлений заметно выше. Каждый из методов решает свои задачи, и оба метода по-разному описывают неоднородную структуру земной коры и верхней мантии, но их совместное применение позволяет получить взаимодополняющую информацию об изучаемых геофизических объектах (раздел 5.1).

7. Получены количественные оценки взаимосвязи параметров геоэлектрического разреза по геотраверсу NARYN, с характеристиками поля современных деформаций земной коры Центрального Тянь-Шаня, построенного автором по данным региональной сети GPS наблюдений. Сделано следующее предположение: высокая корреляция между величиной горизонтальной деформации и проводимостью нижнекорового слоя, полученная в северной части профиля, может свидетельствовать о том, что деформация, наблюдаемая на земной поверхности с помощью GPS, несет в себе информацию о горизонтальной структуре пластического течения вещества в нижней коре региона (раздел 5.2).

8. Предложены геоэлектрические критерии определения положения зон возможных сильных землетрясений на основе результатов детальных магнитотеллурических исследований территории Бишкекского геодинамического полигона. Критерий базируется на приуроченности гипоцентров сильных землетрясений (энергетического класса $K > 10$) к участкам земной коры, характеризующимся, в первую очередь, наличием градиентов сопротивления, обусловленных высокоомными телами и зонами низких сопротивлений, а также присутствием нижнекорового проводящего слоя и проводящего «канала», соединяющего нижнекоровый геоэлектрический этаж с верхнекоровыми структурами (раздел 5.3).

Автору представляются перспективными следующие направления будущего развития глубинных электромагнитных исследований в составе комплекса по изучению современной геодинамики Тянь-Шаня и сопредельных областей Центральной Азии:

- дальнейшее совершенствование методического обеспечения различных аспектов проведения глубинных электромагнитных исследований и более широкое применение разработанных методик на практике;
- реализация «площадной» региональной системы электромагнитных наблюдений с целью перехода от двумерной к трехмерной интерпретации магнитотеллурических и магнитовариационных данных;

- построение комплексной геофизической модели литосферы региона на основе геолого-геофизических данных, новых численных моделей и алгоритмов решения обратной задачи геофизики.

Основные публикации по теме диссертации

1. Баталев В.Ю., Волыхин А.М., **Рыбин А.К.**, Трапезников Ю.А., Финякин В.В. Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ // Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М., Наука, 1993, с.96-113.
2. **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю., Макаров В.И., Баталева Е.А., Сафронов И.В. Структура земной коры по данным магнитотеллурических зондирований // Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). - М.: Научный мир, 2005, с. 79-96.
3. **Рыбин А.К.** Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических зондирований // М.: Научный мир, 2011, 272с.
4. Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Волыхин А.М., Голубцова Н.С., **Рыбин А.К.** Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. 1997. №1, с. 3-20.
5. **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня// Геология и геофизика, 2001, т.42, №10 с.1566-1173.
6. Брагин В.Д., Баталев В.Ю., Зубович А.В., Лобанченко А.Н., **Рыбин А.К.**, Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г. О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и распределением сейсмичности // Геология и геофизика, 2001, т.42, №10 с.1610-1621.
7. Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И. Щелочков Г.Г., **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю. Поле деформации, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня// Геология и геофизика, 2001, т.42, №10 с.1634-1640.
8. Park, S. K., S. C. Thompson, A. **Rybin**, V. Batalev, and R. Bielinski, Structural constraints in neotectonic studies of thrust faults from the magnetotelluric method, Kochkor Basin, Kyrgyz Republic, Tectonics, 22(2), 1013, doi:10.1029/2001TC001318, 2003.
9. Bielinski, R. A., S. K. Park, A. **Rybin**, V. Batalev, S. Jun, and C. Sears, Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies, Geophysical Research Letters, 30(15), 1806, doi:10.1029/2003GL017455, 2003.
10. Баталева Е.А., **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю., Сафронов И.В. О возможности использования магнитотеллурического зондирования для исследования тектонических нарушений в массивах горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2005, №3, с.38-45.
11. Баталева Е.А., Буслов М.М., **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Сафронов И.В. Аномалии электропроводности Таласо-Ферганского разлома и геодинамическая интерпретация глубинной структуры юго-западного Тянь-Шаня// Геология и геофизика. - № 9.- 2006. – С. 1026-1033.
12. Сафронов И.В., **Рыбин А.К.**, Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А. Новые геофизические данные о глубинном строении зоны сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины // Вестник КРСУ.- 2006.- №3.- С.95-103.

13. Баталева Е.А., **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Сафронов И.В. Опыт построения трехмерной геоэлектрической модели района Курайско-Чуйской системы впадин горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Вестник КРСУ.- 2006.- №3.- С.104-112.
14. Матюков В.Е., Мамбетов Ш.А., **Рыбин А.К.** Применимость геоэлектрических моделей для исследования природных геомеханических явлений Тянь-Шаня// Вестник КРСУ.- 2006.- №3.- С.36-42.
15. Захарова О.К., Спичак В.В., **Рыбин А.К.**, Баталев В.Ю., Гойдина А.К. Оценка корреляции магнитотеллурических и геотермических данных на Бишкекском геодинамическом полигоне // Физика Земли, 2007, №4, с.35-42.
16. **Рыбин А.К.**, Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2008, т.49, №5, с. 445-460.
17. Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., **Рыбин А.К.**, Баталева Е.А. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика, 2008, 49, №11, с.1139-1149.
18. **Рыбин А.К.**, Костюк А.Д. О связи поля современных деформаций и глубинной структуры электропроводности Центрального Тянь-Шаня по данным GPS и МТЗ // Вестник ВГУ, Серия Геология, 2008, №2, с.165-175.
19. **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, 2009, т. 183, с.272-276.
20. Бердичевский М.Н., Голубцова Н.С., Варенцов Ив.М., Пушкарев П.Ю., **Рыбин А.К.**, Соколова Е.Ю. Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: последовательная инверсия магнитовариационных и магнитотеллурических данных вдоль профиля НАРЫН // Физика Земли, 2010, №8, с. 54-61.
21. Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов Ив.М., **Рыбин А.К.**, Баглаенко Н.В., Баталев В.Ю., Голубцова Н.С., Матюков В.Е., Пушкарев П.Ю. Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ магнитотеллурических и магнитовариационных откликов вдоль геотраверса НАРЫН // Физика Земли, 2010, №8, с. 36-53.
22. **Рыбин А.К.** Магнитотеллурические и сейсмические исследования по трансекту MANAS // Вестник ВГУ, Серия Геология, №1, 2010, с. 218-228.
23. Макаров В.И., Д. В. Алексеев, В. Ю. Баталев, Е. А. Баталева, И. В. Беляев, В. Д. Брагин, Н. Т. Дергунов, Н. Н. Ефимова, М. Г. Леонов, Л. М. Мунирова, А. Д. Павленкин, С. В. Рёкер, Ю. В. Рослов, А. К. **Рыбин**, Г. Г. Щелочков Поддвиг Тарима под Тянь-Шань и глубинная структура зоны их сочленения: основные результаты сейсмических исследований по профилю MANAS (Кашгар–Сонкель) // Геотектоника, 2010, № 2, с. 23–42.
24. **Рыбин А.К.** Геоэлектрическая модель земной коры Северо-Тяньшанской сейсмогенерирующей зоны по данным магнитотеллурических зондирований // Вестник КРСУ, 2011, №4, с. 8-15.