

**ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ
ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
РАЙОНА КУРАЙСКО-ЧУЙСКОЙ СИСТЕМЫ
ВПАДИН ГОРНОГО АЛТАЯ
ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

Е.А. Баталева – канд. геол.-минер. наук

А.К. Рыбин – канд. физ.-мат. наук

В.Ю. Баталев – канд. геол.-минер. наук

Г.Г. Щелочков – исполнит. директор

И.В. Сафронов – мл. научн. сотр.

Conductive layer and subvertical conductive structures in deep layers of the Earth crust of the Chy and Kuray (Republic of Altai) basins were obtained as a result of carrying out a magnetotelluric field soundings and 2D modelling experiment. Using both basin deposits conductivity previous data and modern MT-information about deep part of the Earth crust, 3D conductivity model of epicentral zone Altai (2003) earthquake was constructed.

Введение. Изучение горных хребтов и межгорных впадин Алтая для геологов и геофизиков представляет значительный интерес. Особенно актуальными стали работы по геодинамике и глубинной геофизике после произошедшего в 2003 г. в районе Чуйской впадины разрушительного Алтайского землетрясения. Однако несколько десятилетий назад на территории Чуйской впадины уже проводились площадные электромагнитные зондирования методами ВЭЗ и ЗС. Активно изучалась тектоника района [1–4]. Этими работами была заложена основа для предлагаемых в настоящей статье исследований глубинного строения земной коры магнитотеллурическими и магнитовариационными методами, с использованием обширных геотектонических построений и геофизических данных, полученных ранее, но переинтерпретированных при помощи современных компьютерных технологий и геоинформационных систем [5].

Характеристика района исследований. Приведем основные геологические и тектонические характеристики района работ, а также геофизические данные, которые необходимы для интерпретации полученных результатов. Чуйская впадина – часть Курайско-Чуйской системы альпийских межгорных впадин (рис. 1), заложенных на месте раннепалеогеновой денудационной равнины. Основными особенностями новейшей структуры территории являются разломные границы впадин с обрамляющими их с северо-востока и юго-запада горными сооружениями. С северо-востока система впадин обрамляется Курайским хребтом, а с юга – Шавлинским, Северо- и Южно-Чуйским хребтами. Впадины заполнены сложно построенной толщей континентальных отложений палеогена, неогена и плейстоцена. Мощность накопившихся в Чуйской впадине кайнозойских отложений достигает 1200 м [4]. Разломы, отделяющие Курайский хребет от Курайско-Чуйской системы впадин, имеют сдвиговый и взбросо-надвиговый характер. На

содержится значительное количество экспериментальных данных. В то время на территории впадины было проведено около трёх тысяч электрических и электромагнитных зондирований.

Немаловажными данными для планирования работ методами МТЗ и МВЗ являются оценки суммарной продольной проводимости осадочного чехла, а также величины электросопротивления палеозойского фундамента впадин и выходов палеозойских пород на их бортах [5].

Методика выполнения МТЗ и МВЗ.

Исследования глубинного строения эпицентральной зоны Алтайского землетрясения 2003 г. в районе Курайско-Чуйской системы впадин методом магнитотеллурических зондирований были инициированы Научной станцией РАН и Институтом геологии, геофизики и минералогии СО РАН. В 2004 г. сотрудниками Научной станции РАН выполнены МТЗ по двум (рис. 2), региональным профилям длиной более 100 км каждый, секущих эпицентральной зону Алтайских землетрясений и имеющих ориентацию: СВ (I-I, поперечный) и ЗСЗ (II-II, продольный). Причём профили пересекаются в Чаган-Узунском горстовом массиве, вблизи эпицентра Алтайского землетрясения. На продольном профиле магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования выполнены вдоль южного борта Чуйской и Курайской впадин с шагом 8–15 км.

Поперечным профилем с тем же шагом пересечен Курайский хребет, Курайский разлом, Чаган-Узунский блок, Чарышско-Теректинский разлом (рис. 2).

Планирование и разбивка профилей осуществлялись исходя из возможностей и ограничений, накладываемых применяемым двумерным моделированием. Закладка продольного профиля по южному борту Чуйской впадины или по её южным окраинам вызвана необходимостью расположить профиль как можно дальше от “оси” электропроводности осадочного чехла впадины, сосредоточенной в рамповой структуре, располагающейся ближе к северному борту, и от участков повышенной мощности осадочного чехла (до километра и более), располагающихся западнее Чаган-Узунского горста. Определение местоположения поперечного профиля было вызвано, во-первых, необходимостью пересечения эпицентральной зоны Алтайского землетрясения. Во-вторых, при закладке поперечного профиля по направлению на северо-восток в средней части Чаган-Узунского горста при его ширине около 20 км обеспечивается достаточное удаление профиля от заведомо известных проводящих структур осадочного чехла (замыкания Курайской и Чуйской впадин). Северное и южное окончания выбранного таким образом поперечного профиля располагаются в бассейнах рек Башкаус и Джазатор (рис. 1).

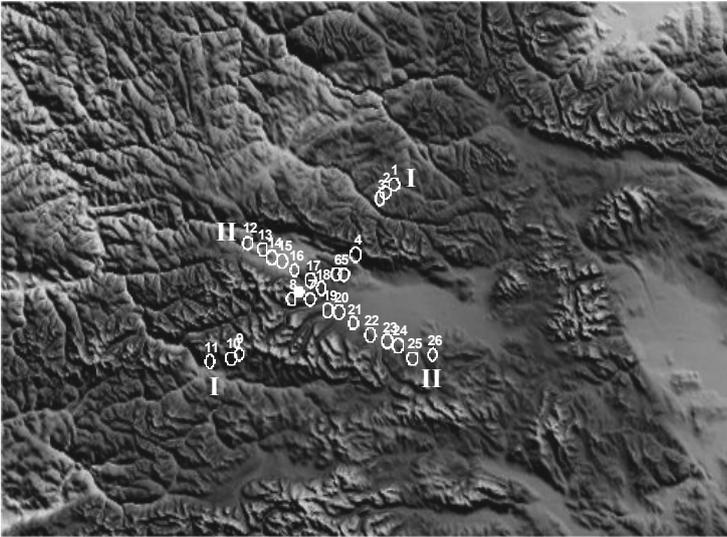


Рис. 2. Схема расположения профилей МТЗ в районе Чуйской впадины, Республика Алтай. Профили МТЗ: I-I – поперечный и II-II – продольный; белыми кольцами показаны пункты МТЗ; кружком – эпицентр Алтайского (сентябрь 2003 г.) землетрясения.

Методика наблюдений МТЗ и аппаратура. Для выполнения зондирований по профилям использовались два магнитотеллурических полевых измерительных комплекса МТ-ПИК, созданные сотрудниками Научной станции РАН. [6]. Частотный диапазон регистрации вариаций магнитотеллурического поля составлял от 0,1 до 1600с. В среднечастотном и высокочастотном диапазонах регистрации измерение компонент магнитного поля выполнялось с помощью стандартных индукционных датчиков ЦЭС-2. Магнитное поле в низкочастотном диапазоне регистрации измерялось с помощью магнитовариационной станции Боброва. Электрические компоненты МТ-поля измерялись во всём частотном диапазоне с помощью “Г”-образной измерительной установки с электрическими диполями длиной от 50 до 100 м. Заземление диполей осуществлялось с помощью неполяризующихся электродов, разработанных и созданных в Научной станции РАН. Ориентация измерительной установки проводилась по азимутам 0° и 90°, что в системе координат магнитотеллурического зондирования соответствует востоку и северу. При этом предусматривалась дальнейшая возможность пересчёта измеренных данных МТЗ на азимут простирания основных структур на исследуемой территории и определения продольных и поперечных направлений.

Обработка полевых данных МТ-ПИК производилась с помощью программы узкополосной фильтрации (ЭПАК) [7].

Результаты 2d-моделирования. Для качественной интерпретации магнитотеллурических данных, полученных в Чуйской впадине, использовалась методика, которая включает в себя анализ полярных диаграмм, анализ поведения векторов Визе, анализ псевдоразрезов, морфологический анализ МТ-кривых, подробно описанная М.Н. Бердичевским в [8] и позволяющая определять на качественном уровне геометрические характеристики структур и их электрическую размерность. Тестирование и уточнение полученной на этом этапе информации осуществлялось с помощью программ автоматизированной двумерной инверсии наблюдаемых МТ и МВ-данных нового поколения П2ДС, разработанных И.М. Варенцовым и Н.Г. Голубевым [9].

В соответствии с ориентацией реальных векторов Визе (ReWxy), показанных на рис. 3 для периода T=1600 с, профиль I-I, поперечный по отношению к Чуйской впадине, является также поперечным и по отношению к более крупным региональным структурам, которые формируют региональное МТ-поле и имеют простирание на СЗЗ-ЮВВ. Поэтому мы предпочитаем его продольному профилю при выполнении двумерного моделирования. В качестве компоненты поля, пригодной для инверсии, выбрана

магнитовариационная, свободная от статических смещений, вызванных действием приповерхностных неоднородностей. Стартовой моделью для первого расчёта являлось однородное полупространство. Инверсия магнитовариационных данных выполнялась в соответствии с рекомендациями [10]. Двумерная структура проводящих объектов, с осью однородности вдоль СЗЗ-ЮВВ, выделенная при инверсии векторов Визе и уточнённая при инверсии фаз импеданса, состоит из корового проводящего слоя с субгоризонтальным залеганием и субвертикальных проводников, распространяющихся от корового проводящего слоя к поверхности (рис. 4). Субвертикальные и наклонные проводящие зоны, выделяемые в геоэлектрической модели, прослеживаются от выходов на дневную поверхность до глубин корового электропроводящего слоя (20 км), причём

наблюдается приуроченность крупных разломных зон, показанных на схеме кайнозойской тектоники Алтая (рис. 1), таких, как Курайская, Чарышско-Теректинская, Толбо-Нурская, а также Кубадринского и Башкаусского разломов к выходам наклонных и субвертикальных электропроводящих зон. Пространственное совпадение электропроводящих зон и крупных разломов на линии профиля, а также совпадение ориентации электромагнитных параметров с азимутами простираения разломов указывает на то, что эти разломные зоны в геоэлектрической модели отображаются как субвертикальные и наклонные проводящие структуры.

Построение стартовой 3d-модели.

Верхняя часть трёхмерной модели составлена по данным малоуглубинных электрических и электромагнитных зондирований – ВЭЗ и ЗС, с помощью которых детально изучен осадочный

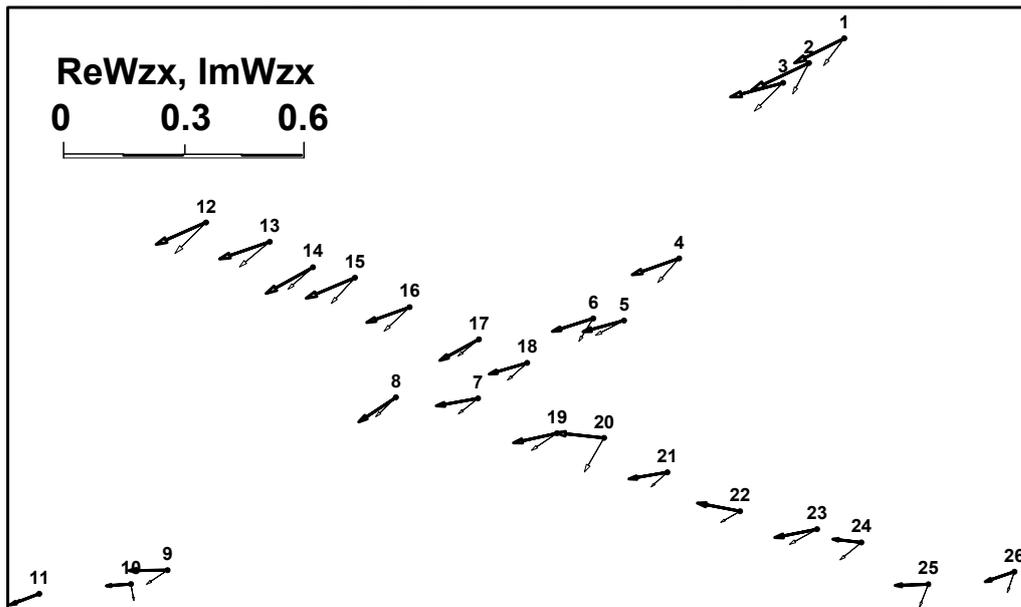


Рис. 3. Вектора Визе на периоде $T=1600$ с. Жирными стрелками показаны ReW , тонкими – ImW .

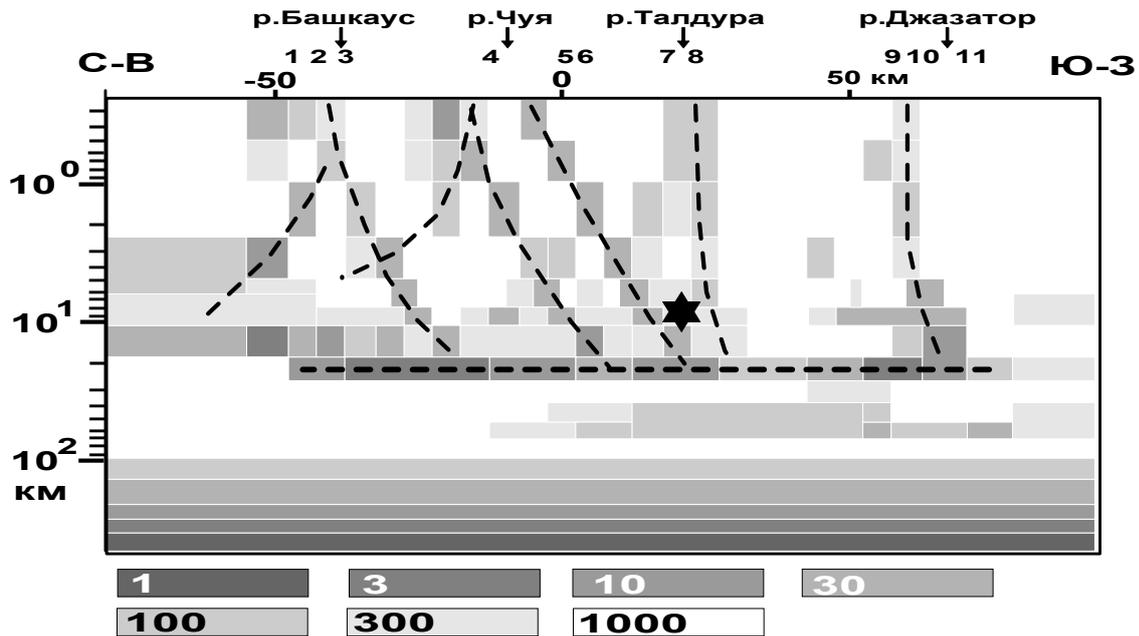


Рис. 4. Геоэлектрическая модель, полученная в результате инверсии фазы импеданса $F_{\text{фаз}}$ на периоде $T=100$ с по профилю I-I, секущему эпицентральной зону Алтайского (2003 г.) землетрясения, с наложением сглаженной структуры проводящих объектов (выделено пунктиром), положение гипоцентра показано звёздочкой.

Значения сопротивлений указаны внутри блоков модели и в условных обозначениях.

чехол Чуйской впадины [5]. Первым шагом при аппроксимации проводящих структур Курайско-Чуйской системы впадин ячейками модели являлось определение размеров ячеек модели в плане и по глубине. Это немаловажная часть составления модели, с помощью которой достигается баланс между “качеством расчетов” (гладкостью получаемых модельных кривых МТЗ), детальностью модели и временем единичного расчёта.

Для Чуйской впадины в центральной (рабочей) части модели составляющей 50×50 ячеек их размер выбран 2.5×2.5 км (общий размер модели 61×61 ячеек). Такая геометрия позволяет с достаточной детальностью аппроксимировать осадочный чехол Чуйской впадины, при этом для фоновой части модели с каждой стороны остается по пять ячеек с размерами, увеличивающимися от 5 до 100 км. Разбиение по вертикали также должно обеспечивать гладкость расчётов и достаточную детальность аппроксимации не только осадочного чехла, но и всего разреза. Для осадочного чехла Чуйской впадины в

рассматриваемой модели задействовано четыре слоя (50 м, 150 м, 200 м и 400 м), при общем их количестве двадцать три. Мощность слоёв плавно возрастает с глубиной от 50 м в верхней части разреза до десятков километров в нижней.

Для построения глубинной части стартовой 3D-модели района Курайско-Чуйской системы впадин использовались результаты 2D-инверсии данных магнитовариационных зондирований и инверсии фазовых кривых магнитотеллурических зондирований. Основные структуры, формирующие двумерное магнитотеллурическое поле, выделенные при 2D-интерпретации, – это коровый проводящий слой и субвертикальные проводящие тела, соответствующие крупным разломным зонам. Глубина залегания корового проводящего слоя около 20 км, а суммарная продольная проводимость – не менее 1000 см.

Ориентация реальных векторов Визе (рис. 3) указывает на то, что теллурические токи имеют направление ССЗ-ЮЮВ. В этом же

направлении простираются крупные разломные зоны. Однако ориентацию теллурическим токам могут задавать не только субвертикальные проводники, соответствующие крупным разломам, но и двумерные неоднородности корового проводящего слоя, как это наблюдается на Тянь-Шане. Решение вопроса о разделении влияния субвертикальных зон и неоднородностей корового проводника остаётся за трёхмерным моделированием. На этапе построения модели эта особенность исследуемого района нами учитывается следующим образом: направление течения токов (ССЗ-ЮЮВ) совмещается с осью "X" модели, т.е. осуществляется поворот карты осадочного чехла Чуйской впадины (восточное направление отклоняется от оси "X" на 60° против часовой стрелки). Разбиение территории Чуйской и Курайской впадин на ячейки по 2.5 км вдоль осей "X" и "Y" для дальнейшей оцифровки значений электросопротивления по слоям, а также привязка пунктов наблюдения МТЗ к ячейкам модели производились после поворота карты. Выполнением этой процедуры достигается следующее – модельные кривые кажущегося сопротивления Roxu и Roxy соответствуют наблюдаемым кривым кажущегося сопротивления, пересчитанным на азимуты 30° и 120°, которые вычисляются при стандартной обработке зондирований. Кроме того, некоторая сложность оцифровки "повёрнутой" карты осадочного чехла Чуйской и Курайской впадин, безусловно, компенсируется простотой создания и дальнейшего редактирования глубинной части модели при подборе элементов модели под экспериментальные данные. Результаты построения стартовой 3D-модели приводятся на рис. 5.

Результаты 3d-моделирования.

Единичный расчёт описанной модели,

производимый на персональном компьютере (Intel Pentium-4, 2800 МГц) имел длительность около часа. При этом использовалась программа расчёта магнитотеллурических параметров для трёхмерной модели, разработанная американским геофизиком Ренди Маки. Для горных пород осадочного чехла и палеозойского фундамента Чуйской и Курайской впадин использовались значения удельных сопротивлений, определённые при повторной интерпретации материалов ВЭЗ и ЗС [5]. Для глубинной части модели значения удельных сопротивлений определялись при расчёте 2D-инверсии магнитотеллурических и магнитовариационных данных по поперечному профилю МТЗ I-I. Результаты расчётов приводятся в виде сопоставления наблюдаемых кривых МТЗ с модельными. Оценка невязки определяется визуально. Особое внимание уделяется характеру поведения кривых и их форме. Очевидно, что, установив для 3D-модели двумерную глубинную часть, мы не вправе ожидать полного соответствия полевых наблюдённых данных и расчётов, так как геологические структуры, характеризующиеся высокой степенью двумерности, особенно на Алтае, весьма редки, но подобие наблюдаемых и модельных кривых кажущегося сопротивления по всем пунктам МТЗ уверенно фиксируется (см. рис. 6 и 7). Необходимо отметить, что хотя программа 3D-моделирования позволяет учитывать влияние приповерхностных неоднородностей (эффект статического смещения кривых МТЗ), в данной работе, при использовании сетки всего лишь 61x61x23 узла, эта возможность не может быть использована, т.е., почти все конформные смещения кривых (рис. 6 и 7), могут быть промоделированы в более детальной модели.

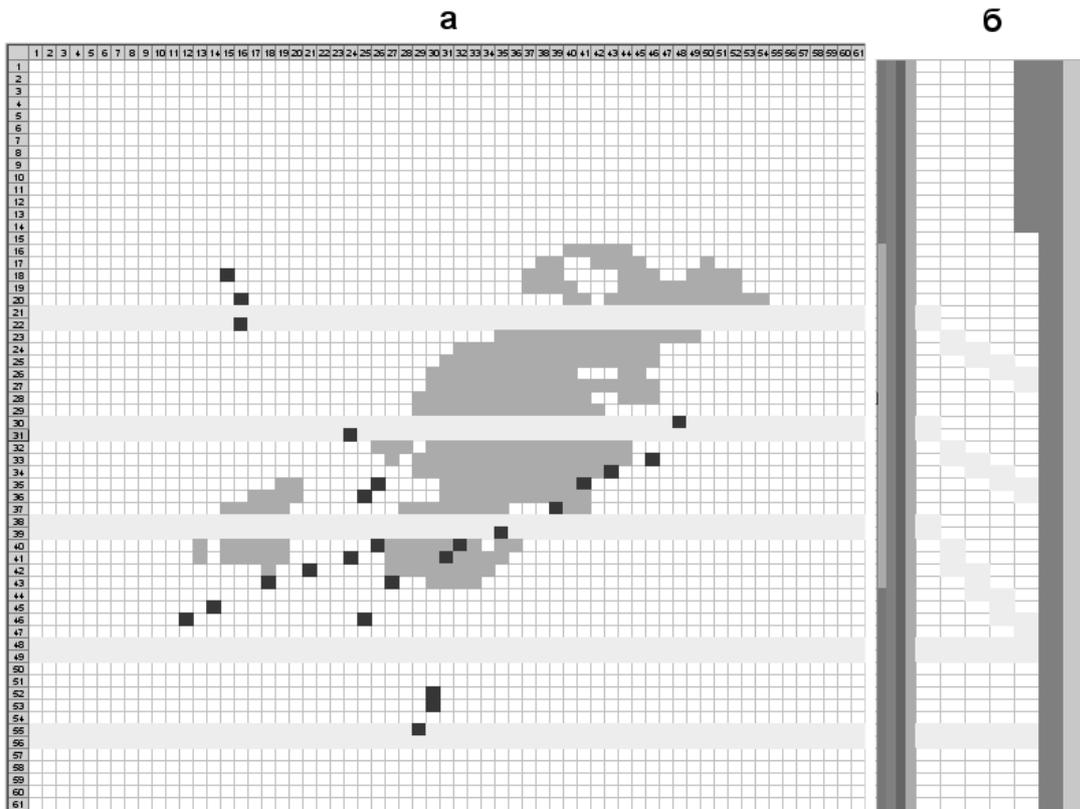


Рис. 5. Схематическое изображение 3D-модели территории Чуйской и Курайской впадин: а – схема разбиения территории, где чёрными квадратами показаны ячейки модели, в которые попадают пункты МТЗ; тёмно-серым выделены Чуйская и Курайская впадины, светло-серыми продольными полосами показаны выходы на поверхность субвертикальных и наклонных проводящих зон; б – схематический разрез модели, расположенный вдоль линии сечения, на котором субвертикальные и наклонные проводящие зоны показаны светло-серым, а коровый проводник на глубине 20 км – тёмно-серым. Размер ячеек на схеме (исключая по 5 крайних) 2.5×2.5 км, шкала глубин разреза произвольная.

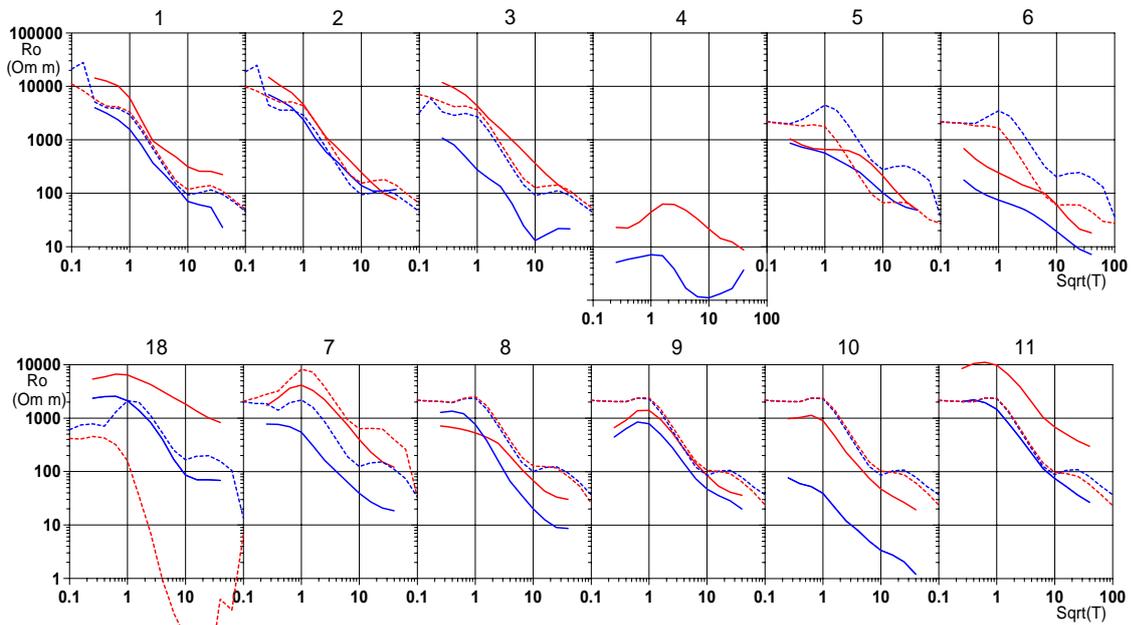


Рис. 6. Сопоставление наблюдаемых кривых кажущегося сопротивления с расчётными по поперечному профилю МТЗ I-I. Сплошными линиями показаны наблюдаемые кривые, пунктиром – расчётные.

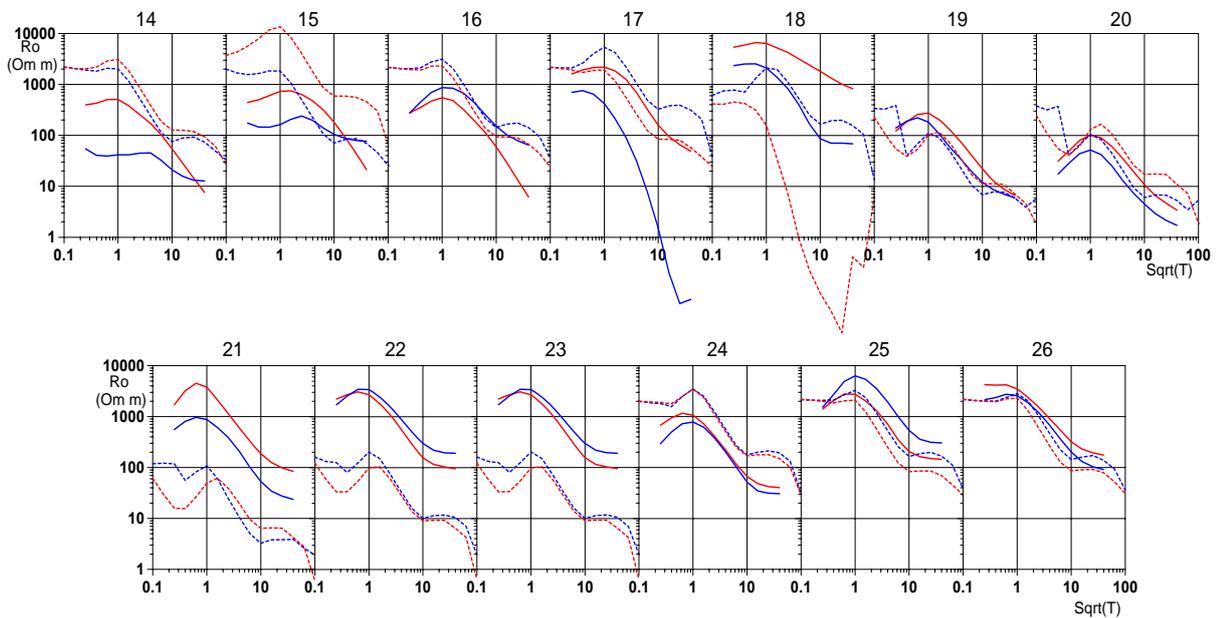


Рис. 7. Сопоставление наблюдаемых кривых кажущегося сопротивления с расчётными по продольному профилю МТЗ II-II. Сплошными линиями показаны наблюдаемые кривые, пунктиром – расчётные.

Выводы. Опыт построения и расчёты первых 3D-моделей глубинного геоэлектрического строения эпицентральной зоны Алтайского (2003 г.) землетрясения являются актуальными и для Тянь-Шаньского региона. Трёхмерное моделирование, детализируя имеющиеся двумерные геоэлектрические модели, существенно расширит границы получаемой с помощью электромагнитных методов информации о глубинной структуре активных регионов.

Литература

1. Буслов М.М., Зыкин В.С., Новиков В.С., Дельво Д. Структурные и геодинамические особенности формирования Чуйской межгорной впадины Горного Алтая в кайнозое // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 12. – С. 1720–1736.
2. Зыкин В.С., Казанский Ю.А. Стратиграфия и палеомагнетизм кайнозойских (дочетвертичных) отложений Чуйской впадины Горного Алтая // Геология и геофизика. – 1995. – № 10. – С. 75–91.
3. Новиков И.С. Геоморфологические эффекты внутриконтинентальной коллизии на примере Горного Алтая // Геология и геофизика. – 1996. – № 11. – С. 52–60.
4. Лузгин Б.Н., Русанов Г.Г. Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая // Геология и геофизика. – 1992. – № 4. – С. 23–29.
5. Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дучков А.Д., Ю.А. Дашевский. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 9. – С. 1399–1416.
6. Ильичев П.В., Рыбин А.К., Бобровский В.В. Глубинные магнитотеллурические зондирования на территории северного Тянь-Шаня // Сб. матер. Второго междунар. симпоз. “Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов”. – Москва–Бишкек, 2003. – С. 190–197.
7. Бердичевский М.Н., Безрук И.А., Сафонов А.С. Магнитотеллурические методы. Электроразведка: Справочник геофизика. – М.: Недра, 1989. – Т. 1. – С. 261–310.
8. Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Вольхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. – 1997. – № 1. – С. 3–20.
9. Варенцов И.М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // Физика Земли. – 2002. – № 11. – С. 11–33.
10. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Мерцикова Н.А. Об обратной задаче зондирования с использованием магнитотеллурических и магнитовариационных данных. – М.: МАКС Пресс, 2000. – 68 с.
11. Буслов М.М. Кайнозойская тектоника и геодинамика Горного Алтая // Геология и геофизика. – 2005 (в печати).