

УДК 550.372, 550.837(575.2)(04)

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ТЯНЬШАНСКОЙ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

А.К. Рыбин

Рассматриваются вопросы, связанные с построением двумерных геоэлектрических разрезов вдоль серии профилей магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, выполненных на территории Бишкекского геодинамического полигона силами Научной станции РАН в г. Бишкеке. Основными элементами в полученной геоэлектрической модели являются проводящие структуры в верхней и средней коре зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование; моделирование; инверсия; распределение электропроводности; Тянь-Шань; земная кора; надвиг; деформация.

Введение. Результативность магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) исследований на территории Тяньшанского региона связана, прежде всего, с появлением новых возможностей современной измерительной аппаратуры для осуществления полевого эксперимента, более эффективных методик обработки и интерпретации магнитотеллурических данных. Поэтому важнейшей задачей является уточнение и детализация имеющихся геоэлектрических построений, а также более строгая оценка и учет трехмерности распределения электромагнитных свойств изучаемой геосреды при проведении количественной интерпретации МТ-МВ данных, полученных в Тяньшанском регионе. С целью изучения тонкой геоэлектрической структуры одной из наиболее сейсмоактивных и сложно устроенных разломных зон Тянь-Шаня выполнено детальное МТ-МВ профилирование (рис. 1) по серии субмеридиональных и субширотных профилей на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП).

Характеристика этой сети профильных детальных МТЗ-МВЗ наблюдений, описание и результаты обработки полученных материалов приведены в работе [1]. Проведенный анализ наблюдаемых МТ данных позволил оценить размерность и положение изучаемых структур. С помощью разложения Бара, которое позволяет погасить влияние локальных трехмерных неоднородностей, были определены азимуты главных

направлений, тяготеющие к субмеридиональной ориентации для низкочастотного интервала периодов. По этим результатам решение обратной геоэлектрической задачи можно искать в классе двумерных сред с широтной осью однородности. При таком подходе широтные и меридиональные кривые кажущегося сопротивления могут рассматриваться как продольные и поперечные по отношению к поверхностным геологическим структурам.

При анализе магнитотеллурических параметров неоднородности и асимметрии авторы [1] была отмечена общая тенденция в поведении анализируемых индикаторов размерности среды. Области повышенных или пониженных значений параметров N , $Skew_s$, $Skew_b$, выделяемые на различных периодах, пространственно практически совпали, что отражает их слабую зависимость от частоты. Была обнаружена связь искажения низкочастотного магнитотеллурического поля с гальваническим влиянием приповерхностных неоднородностей, что подтверждает предположение о суперпозиции локальных трехмерных структур с региональной двумерной структурой. Исключение, по-видимому, составляет глубинное распределение электропроводности в южной части региона, где возможны трехмерные эффекты.

На основе анализа площадных МТ-МВ данных была определена геоэлектрическая зональность (сегментация) исследуемой территории



Рис. 1. Карта Северного Тянь-Шаня – территория Бишкекского геодинимического полигона (БГП).

1 – Научная станция РАН; 2 – пункты МТЗ; 3 – крупные города; 4 – основные разломы;
5 – Центральнo-Чуйская флексурно-разрывная зона; 6 – номер МТ профиля.

На врезке в левом верхнем углу светлым прямоугольным контуром показано расположение БГП и региональные профили МТЗ-МВЗ (белые линии).

БГП, отражающая основные элементы блочной структуры и поверхностной геометрии разломов в зоне сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта. Выявлены существенные изменения электромагнитных свойств земной коры в широтном направлении, т.е. вдоль простираения основных тектонических элементов в изучаемой зоне. Все ранее построенные геоэлектрические модели этой зоны представляли собой двумерные структуры электропроводности с широтной осью однородности.

Результаты анализа массива МТ-измерений позволили получить необходимые данные для формирования надежного стартового приближения в процессе инверсии при создании объемной геоэлектрической модели исследуемого региона.

Построение профильных геоэлектрических разрезов. Для двумерной (2-D) инверсии наблюдаемых данных, полученных на 6 профилях на территории БГП, использовалась программа Rodi-Mackie, реализующая метод нелинейных сопряженных градиентов [2]. Осуществляемая в этой программе процедура 2-D инверсии про-

изводит совместный подбор наблюдаемых значений импеданса и типпера, при этом осуществляется сглаживание модели сопротивления посредством минимизации следующего функционала: (наблюдаемые данные – вычисленные отклики)² + ∇ (оптимизируемая модель – априорная модель)². Второй член функционала штрафует гладкие отклонения оптимизируемой модели от априорной.

Сеточная аппроксимация профильной модели имеет 90/98 горизонтальных и 48 вертикальных ячеек с латеральными изменениями по размеру меньшими, чем коэффициент 1.5 между любыми соседними ячейками для удовлетворения 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, 1000, 2000 Ом·м. Величина сопротивления приповерхностного слоя 100 Ом·м близка к среднему значению сопротивления верхней части разреза, полученной на исследуемой территории с помощью малоглубинных методов

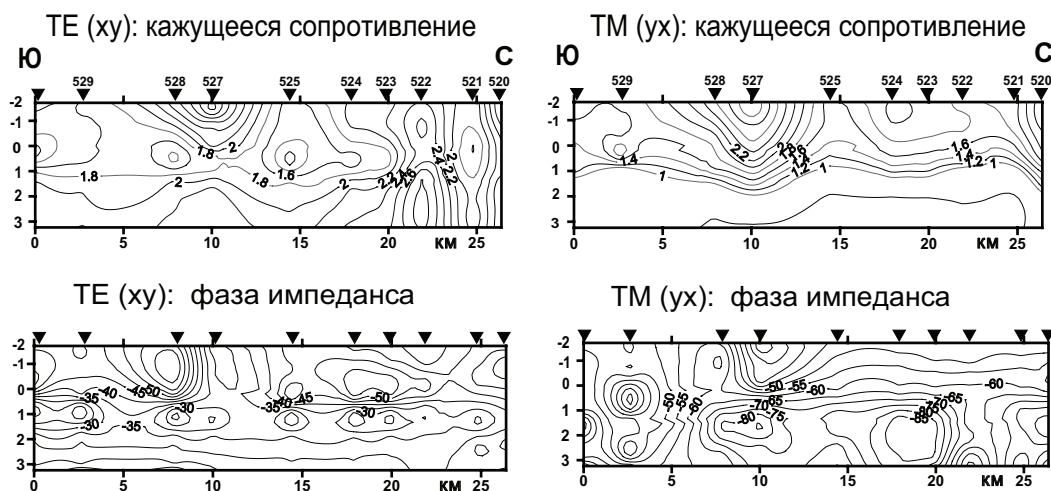


Рис. 2. Псевдоразрезы модуля кажущегося сопротивления и фазы импеданса по профилю 3. Вертикальная ось – десятичный логарифм периода, с; горизонтальная – расстояние, км. Изолинии: десятичный логарифм модуля кажущегося сопротивления в Ом·м; фазы в градусах.

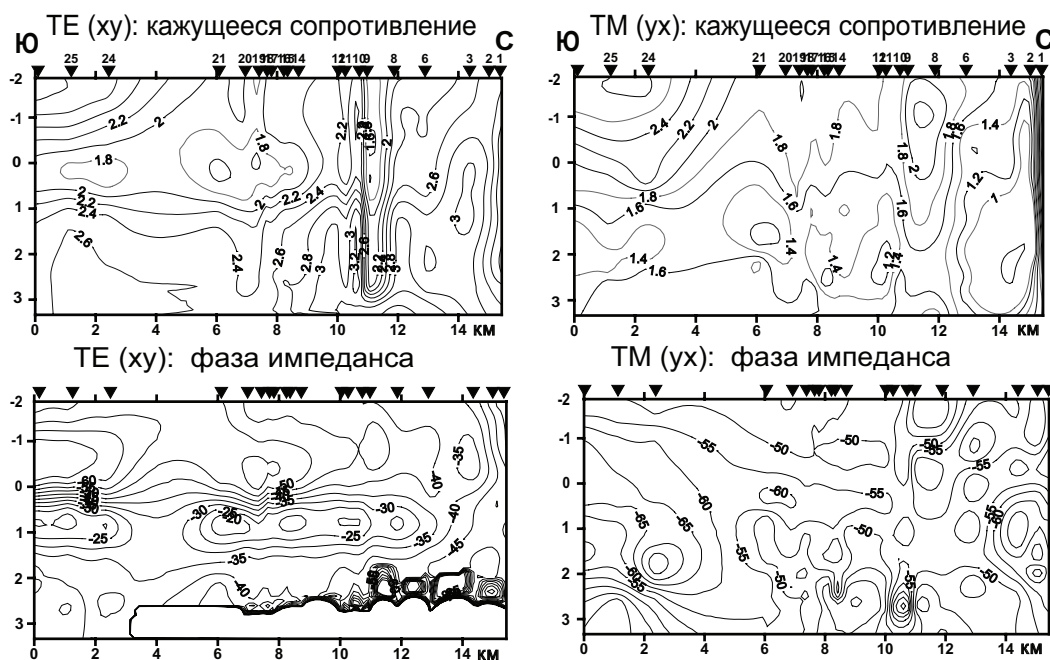


Рис. 3. Псевдоразрезы модуля кажущегося сопротивления и фазы импеданса по профилю 6. Вертикальная ось – десятичный логарифм периода, с; горизонтальная – расстояние, км. Изолинии: десятичный логарифм модуля кажущегося сопротивления в Ом·м; фазы в градусах.

электроразведки [3]. 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 геоэлектриче-

ской модели Центрального Тянь-Шаня, был выделен нами ранее [4–6]. Следует отметить, что плотность и геометрия сетки разбиения в процедуре автоматизированной инверсии, а также включение всех блоков разбиения в оптимиза-

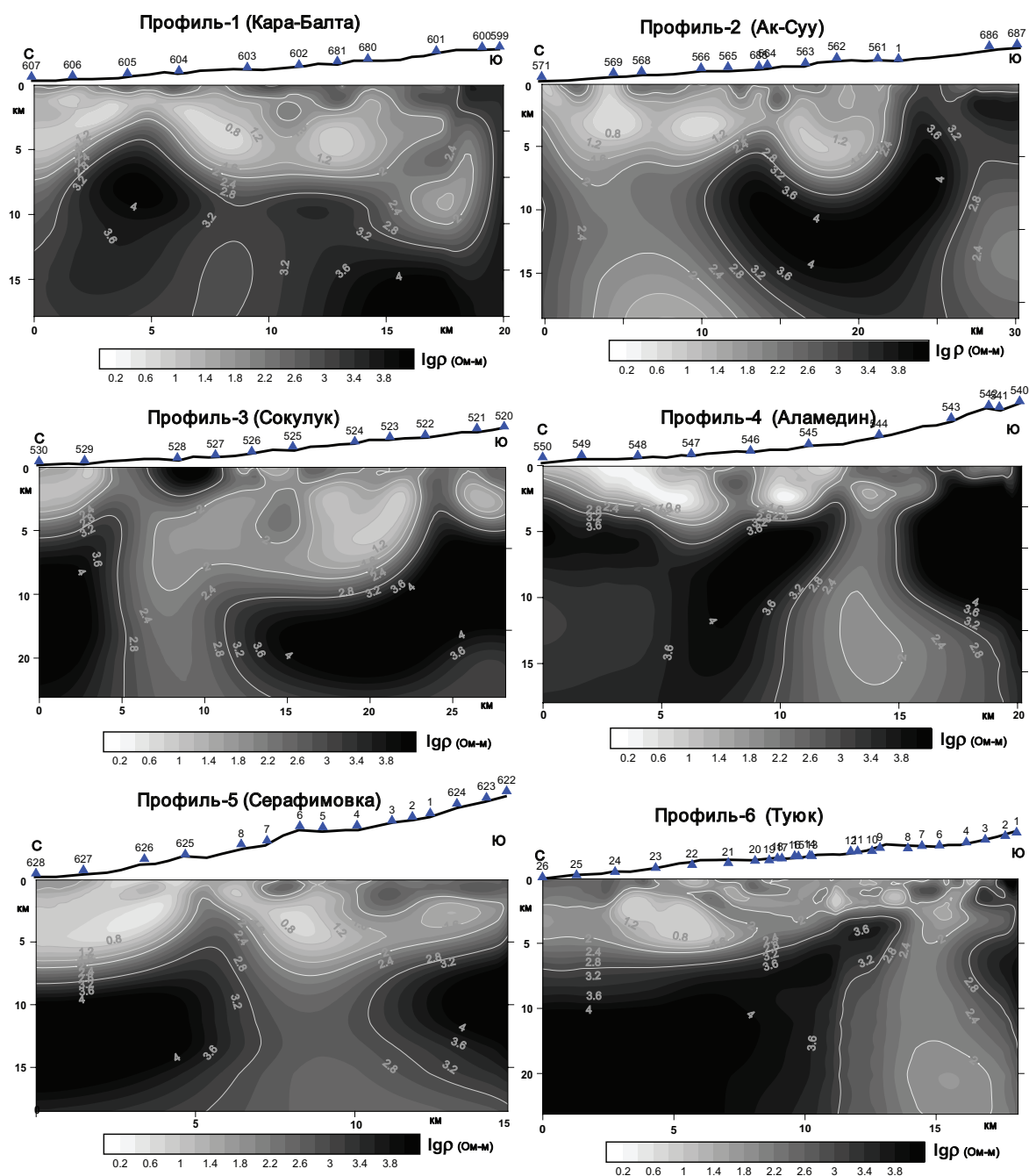


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы, полученные по шести МТ-профилям.
Изолинии указывают lg удельного сопротивления в Ом-м.

ционный подбор, допускают свободный выбор коровых структур, удовлетворяющих различным гипотезам о глубинном геоэлектрическом строении изучаемой зоны сочленения Чуйской впадины с Киргизским хребтом.

Входной ансамбль инвертируемых данных включал в себя значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса для двух поляризаций ЭМ поля, заданные в пунктах наблюдений по каждому из 6 профилей. На рис. 2, 3 показаны

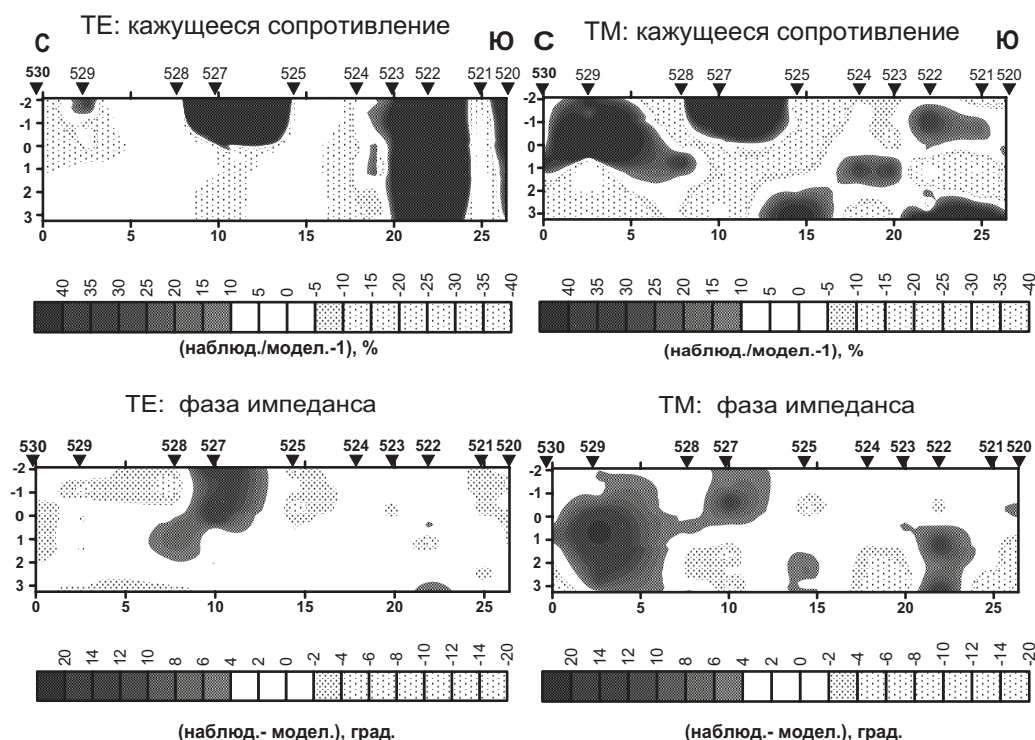


Рис. 5. Пример распределения невязок между кажущимися сопротивлениями и фазами импеданса модельных и наблюдаемых данных (профиль 3).
Вертикальная ось – десятичный логарифм периода, с; горизонтальная ось – расстояние, км.

псевдоразрезы модуля кажущегося сопротивления и фазы импеданса по профилям 3 и 6. Пределы погрешностей инвертируемых данных, являющиеся внутренними параметрами процедуры инверсии, были установлены следующим образом: модуль кажущегося сопротивления (ТЕ мода) – 100%, модуль кажущегося сопротивления (ТМ мода) – 10%, фаза импеданса (ТЕ мода) – 5%, фаза импеданса (ТМ мода) – 5%. Значение параметра регуляризации (τ) в процедуре инверсии было выбрано равным 3.0.

В результате выполненных внутренних итераций в процессе совместной параллельной инверсии всего входного ансамбля 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. 4. Невязки между модельными и экспериментальными данными по профилям 3 и 6 показаны на рис. 5, 6. Следует отметить, что полученные модели достаточно хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Обсуждение результатов и заключение.

Рассмотрим полученные профильные геоэлектрические разрезы, представленные на рис. 4. В северных и центральных сегментах всех разрезов очевидно присутствие низкоомного слоя (20–50 Ом·м) с подошвой на глубине около 4–6 км. Он может целиком отвечать отложениям новейшего орогенического комплекса, выполняющего предгорный прогиб и саму впадину. Ранее в этой тектонической зоне приблизительно на тех же глубинах был установлен скачок скоростей продольных сейсмических волн от $V_p=5,2$ до 5,8 км/с [7], который отвечает, по-видимому, границе кайнозойских отложений и палеозойского основания. Последнее было вскрыто бурением в районе Серафимовского ущелья р. Норус на глубине 4100 м в ядре Серафимовского антиклинального поднятия [8].

Верхние части южных участков разрезов несколько отличаются друг от друга. Верхний проводящий слой в южной части разрезов профилей 2, 4, 6 достаточно резко обрывается и обрамляется высокоомными породами Кир-

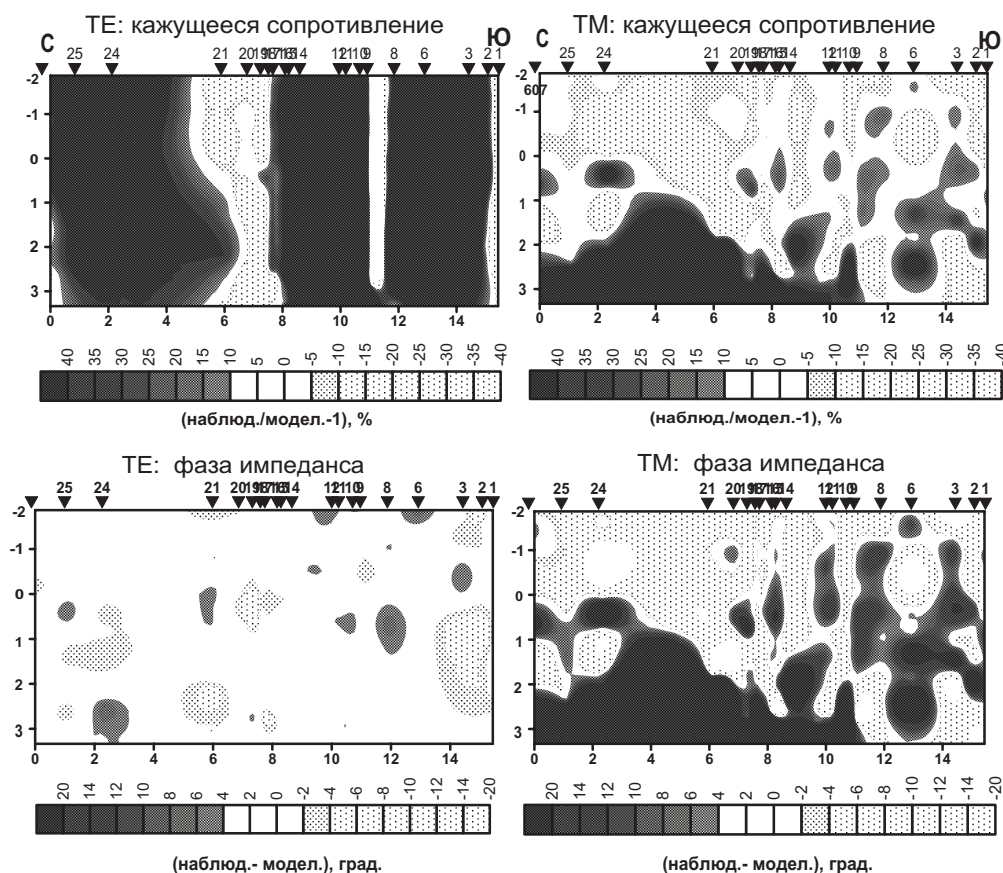


Рис. 6. Пример распределения невязок между кажущимися сопротивлениями и фазами импеданса модельных и наблюдаемых данных (профиль 6).
Вертикальная ось – десятичный логарифм периода, с; горизонтальная ось – расстояние, км.

гизского хребта с сопротивлением около 1000–3000 Ом·м. В южных сегментах других профилей в интервале глубин 1–5 км такого высокоомного блока не наблюдается, вероятно, он расположен несколько южнее.

Средняя кора (интервал глубин 10–20 км) в рассматриваемых сечениях изучаемой зоны интегрально представляет собой гораздо более высокоомную среду, чем верхняя часть, хотя на отдельных участках в средней коре отчетливо проявляются субвертикальные проводящие структуры.

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 [6]. Кроме того, в полученных двумерных моделях проявились основные черты, отмеченные

при рассмотрении профильных геоэлектрических разрезов, построенных по результатам одномерной инверсии [9]. Все это свидетельствует в пользу достоверности результатов количественной двумерной интерпретации по всем профилям БП.

Важнейший результат выполненной двумерной интерпретации МТ-данных – это подтверждение и уточнение параметров выделенных ранее проводящих структур в верхней и средней коре зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта. Причина понижения удельного сопротивления этих структур – общая, это повышение пористости и проницаемости среды. Верхний проводящий горизонт, выделенный в районе исследования на тех же глубинах по данным сейсмоки, представляет собой механически ослабленный слой в условиях хрупкой (жесткой) коры с повышенной пористостью и проницаемо-

стью. Наблюдаемое здесь понижение электрического сопротивления и скорости сейсмических волн связано, в первую очередь, с присутствием водных растворов в порово-трещинном пространстве [10]. Природа и параметры нижнекорового проводящего слоя, по-видимому, определяются переходом разогретых горных пород в пластичное состояние и, соответственно, процессом пластического течения вещества в нижней коре Центрального Тянь-Шаня [11].

Таким образом, характеризуя полученные геоэлектрические разрезы на территории Бишкекского геодинамического полигона, можно говорить о значительной электрической расслоенности земной коры. Что, несомненно, является отражением сложной картины пространственно-временного распределения деформационного процесса в земной коре зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта. При этом низкоомная субгоризонтальная структура, уходящая своими корнями в среднюю и нижнюю части земной коры, связана с трещиноватой, механически ослабленной областью в зоне надвигания для рассматриваемых сечений земной коры. Напротив, плохопроводящие “жесткие” блоки среды, являясь концентраторами тектонических напряжений, контролируют состояние процессов надвигообразования и распределение сейсмичности на этих глубинах.

Исследования 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 (государственный контракт № 02.740.11.0730).

Литература

1. 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.
2. Rodi W. L. and Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. Vol. 66. P. 174 – 187.
3. Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1983. С. 133–151.
4. 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.
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.1566–1573.
6. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Баталева Е.А., Сафронов И.В., Черненко Д.Е. На пути построения трехмерной геоэлектрической модели земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов: Матер. 2-го межд. симп. Москва–Бишкек, 2003. С.164–179.
7. Юдахин Ф.Н., Беленович Т.Я. Современная динамика земной коры Тянь-Шаня и физические процессы в очагах землетрясений // Изв. АН КиргССР. Сер. Физ.-тех. матем. наук. 1989. №1. С. 101–108.
8. Макеев В.П. и др. Изучение структурно-вещественных комплексов, гидродинамических условий и коллекторских свойств пород фанерозоя Чуйско-Иссыккульского региона. Отчет партии прогноза нефтегазоносности кыргызской методической экспедиции государственного агентства по геологии и минеральным ресурсам за 2000 – 2004 гг. Бишкек, 2004.
9. 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. Т.6. №3. С.95–103.
10. Vanyan L.L. and Gliko A.O. Seismic and electromagnetic evidence of degydration as a free water source in the reactivated crust // Geophys. J. Int. 1999. 137. P. 159–162.
11. 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.