

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЗОНЫ ТАЛАСО-ФЕРГАНСКОГО РАЗЛОМА

*Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев*

---

Для магнитотеллурических данных, полученных на Юго-Западном Тянь-Шане, адаптирована методика 2D-инверсии, основанная на магнитовариационной нормализации кривых кажущегося сопротивления.

*Ключевые слова:* магнитотеллурика; электропроводность; глубинное строение; Тянь-Шань.

**Введение.** При обсуждении результатов работ, выполненных методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в горных условиях А.М. Волыхиним в 1992 г. была предложена идея коррекции продольных кривых МТЗ, основанная на предварительном изучении коровой проводимости с помощью магнитовариационных наблюдений. Впоследствии М.Н. Бердичевским была разработана и реализована такая методика интерпретации продольных кривых. Впервые такой подход был использован для интерпретации результатов МТЗ Восточной и

Центральной частей Киргизского Тянь-Шаня (рис. 1) [1].

Теоретические основы для использования метода магнитовариационного зондирования (МВЗ), как ведущего в паре МТЗ-МВЗ, приведены в работе [2], где доказана единственность решения обратной задачи для магнитовариационного зондирования в двумерном случае. В традиционной схеме глубинного электромагнитного зондирования, использующего магнитотеллурическое поле, метод МТЗ играет ведущую роль, а метод МВЗ служит для контролирования

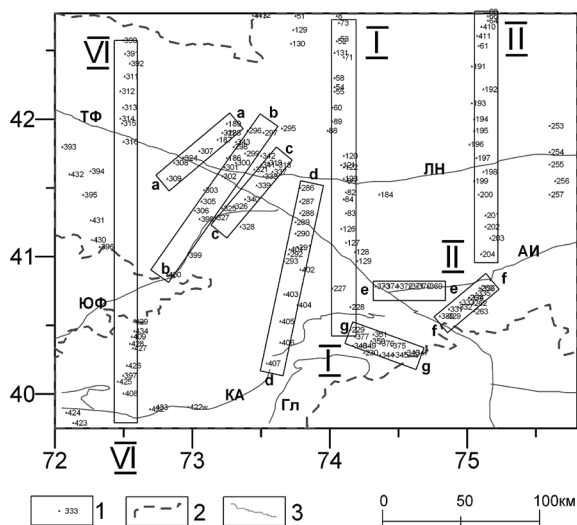


Рис. 1. Схема сети региональных ( I-I, II-II, VI-VI) и локальных (a-a, b-b, c-c, d-d, e-e, f-f, g-g) профилей МТЗ, в зоне Таласо Ферганского разлома, а также расположенных на прилегающих площадях. Разломы: ТФ – Таласо-Ферганский, ЛН – “линия Николаева”, АИ – Атбаш-Иньльчекский, ЮФ – Южно-Ферганский, КА – Кичик-Алайский, ГП – Гюльчинский. Профили МТЗ показаны прямоугольниками; 1 – пункты МТЗ, 2 – граница Кыргызстана, 3 – крупные разломы.

и детализации результатов МТЗ. Эта схема достаточно успешно применяется во всем мире. Она дает уникальную информацию о характеристиках глубинных слоев земной коры и верхней мантии. Ее слабым местом является то, что при-

поверхностные неоднородности могут искажать электрическое поле, а, следовательно, и кажущееся сопротивление, что проявляется в статическом (конформном) смещении низкочастотных ветвей кривых МТЗ. Ярким примером этого процесса является описанное в работе [3] определение электропроводности Южно-Тяньшанской аномалии электропроводности (ЮТАЭ). По результатам интерпретации данных только магнитотеллурического зондирования проводимость аномалии была оценена примерно в сто тысяч Сименс. После привлечения данных магнитовариационного зондирования величина аномалии электропроводности составила не более 10–12 тыс. См. Дело в том, что низкочастотное магнитное поле является надежным репером, необходимым для уверенной коррекции статических смещений кривых МТЗ, поскольку само оно не подвержено сколько-нибудь значительным влияниям приповерхностных неоднородностей. В развернутом виде магнитовариационная нормализация данных МТЗ была использована А.К. Рыбиным [4] в составе трехуровневой инверсии магнитотеллурических и магнитовариационных данных при исследовании Северо-Восточного Тянь-Шаня. Алгоритм инверсии использует ТЕ и ТМ-моды и учитывает их различную чувствительность к приповерхностным и глубинным структурам [5].

**Методика интерпретации.** Краткое описание алгоритма инверсии, согласно [2], заключается в следующем. На первом уровне (магнитовариационная инверсия) интерпретируются частотные характеристики реальных и мнимых типперов  $ReW_{zy}$  и  $ImW_{zy}$ . В основе стартовой модели используется модель структуры электро-

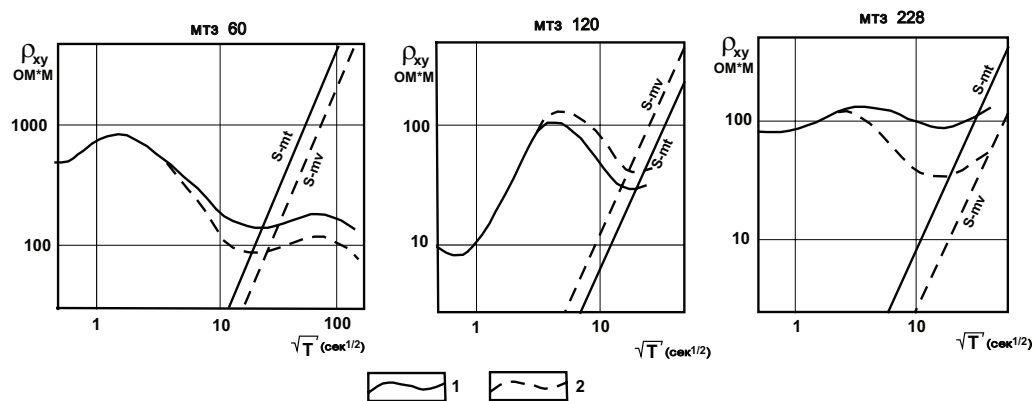


Рис. 2. Примеры магнитовариационной нормализации продольных кривых МТЗ: 1 – исходная кривая  $R_{xy}$ , 2 – нормализованная кривая  $R_{xy}$ .

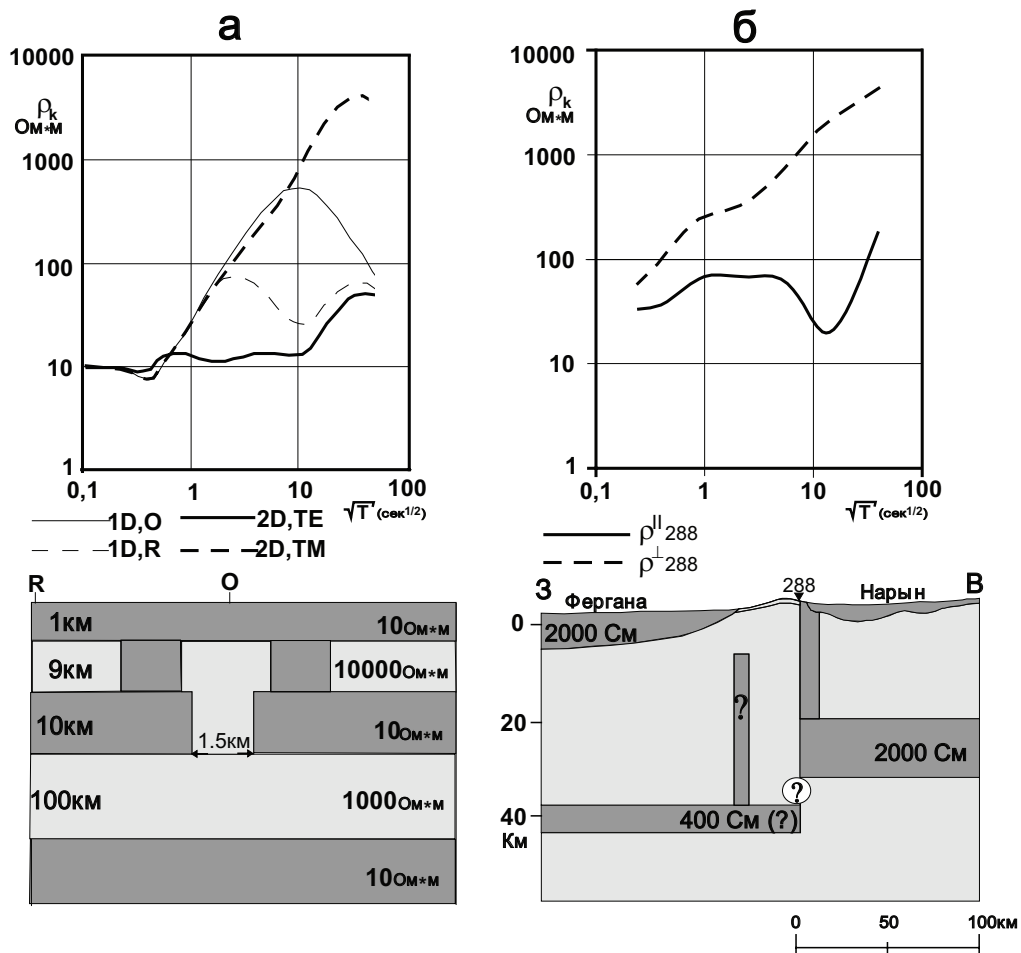


Рис. 3. Геоэлектрические модели: а – теоретическая модель, иллюстрирующая чувствительность ТМ-моды к глубинным структурам, [6]; б – схематическая 2D модель через зону Таласо-Ферганского разлома, составленная по результатам качественной интерпретации МТ-данных и априорной информации.

проводящих объектов, построенная на этапе качественной интерпретации МТ-данных с привлечением априорной информации. На втором уровне (магнитотеллурическая инверсия, ТЕ-мода) интерпретируются частотные характеристики продольного кажущегося сопротивления ( $\rho^{\parallel}$ ) и фазы продольного импеданса ( $\varphi^{\parallel}$ ). В кривые  $\rho^{\parallel}$  вносят поправки за статическое смещение (рис 2). С этой целью низкочастотные ветви кривых  $\rho^{\parallel}$  сдвигаются по вертикали так, чтобы они наилучшим образом совместились с продольными кривыми ( $\rho^{\parallel}$ ), рассчитанными для модели, полученной в результате магнитовариационной инверсии (первый уровень).

Эта же модель используется в качестве стартовой и для магнитотеллурической инверсии. На

третьем уровне интерпретируются поперечные кривые кажущегося сопротивления ( $\rho^{\perp}$ ), имеющие повышенную чувствительность к гальваническим эффектам. В качестве стартовой здесь используется модель, полученная в результате инверсии нормализованных кривых  $\rho^{\parallel}$  или  $\varphi^{\parallel}$ .

Магнитотеллурическая инверсия дает дополнительную информацию о структуре электропроводности земной коры. При этом уточняется кажущееся сопротивление осадочного слоя, верхней коры и разломных зон. Получаемая модель структуры распределения электропроводящих объектов является конечным результатом комплексной интерпретации МВ и МТ-данных.

Рассмотрим применение этого подхода к магнитотеллурическим и магнитовариацион-

ным данным, полученным для зоны Таласо-Ферганского разлома и прилегающих площадей. На рис. 3 показана схематическая модель электропроводящих структур Таласо-Ферганской зоны секущих деформаций, полученная на этапе качественной интерпретации. Ее положение в плане приблизительно соответствует Кекиримскому профилю **d-d**. **Использование 2D моделирования** для определения характеристик проводящих зон района Таласо-Ферганского разлома обосновывается поведением импедансных полярных диаграмм, соотношением параметров асимметрии среды  $\eta$  и **Skew**, поведением индукционных векторов.

Поскольку Таласо-Ферганская зона секущих деформаций имеет СЗ-ЮВ простирание, то нельзя использовать данные зондирования на прямую, их необходимо пересчитать на продольные и поперечные направления. Индукционные стрелки  $ReW_{zx}$ ,  $ReW_{zy}$ ,  $ImW_{zx}$ ,  $ImW_{zy}$  были просто спроецированы на поперечные к Таласо-Ферганскому разлому направления. Что касается продольных и поперечных кривых кажущегося сопротивления, то с ними были выполнены следующие процедуры: во-первых, рассчитаны ориентированные кривые по азимутам через  $10^\circ$ ; во-вторых, определены азимуты главных значений тензора импеданса по методу Бара, как наиболее устойчивые к воздействиям приповерхностных неоднородностей; в третьих, из ориентированных кривых выбраны кривые с азимутами, ориентированными "по Бару". Справедливости ради необходимо отметить, что подавляющее большинство выбранных таким образом продольных и поперечных кривых являются максимальными и минимальными (минимальными и максимальными) по низкочастотному диапазону наблюдения.

Далее инверсия магнитовариационных данных выполнялась в соответствии с рекомендациями [2]. Минимизация невязки между экспериментальными и расчетными данными производилась с помощью итераций, в процессе выполнения которых корректировалось распределение сопротивления в модели. Этот итерационный цикл был назван внутренним. Используя полученное решение можно построить новую стартовую модель (скорректировать имеющуюся) и вновь минимизировать невязку с другой геометрией блоковой структуры модели. Повторяемость этой процедуры была названа внешним итерационным циклом. При интерпретации данных магнитовариационных зондирования по Кекиримскому профилю **d-d** внешний

итерационный цикл состоял из четырех итераций. При первой итерации с использованием высокочастотных данных ( $T=16$  сек), была получена оценка сопротивлений осадочного чехла и верхней части фундамента. В качестве стартовой модели была использована двухслойная модель с неоднородным осадочным чехлом и безграничным однородным основанием. Вторая итерация выполнена в интервале низких частот ( $T=100-1600$  с) на стартовой модели с фиксированными сопротивлениями осадочного чехла и безграничного однородного основания. Среда, заключенная между осадочным чехлом и основанием, была разбита на блоки и слои, сопротивления которых подбирались. С помощью третьей и четвертой итерации внешнего цикла МВ-инверсии, производилось определение и уточнение геоэлектрической структуры земной коры. При этом апробировались варианты стартовой модели с различной глубиной залегания корового слоя, а после фиксации геометрии слоя уточнялась геометрия коровых субвертикальных и наклонных блоков повышенной электропроводности. Следует отметить, что с помощью весовых коэффициентов при расчете 2D моделей уменьшался вклад в формирование модели данных с пунктов, где двумерность геоэлектрических свойств нарушалась. Удаленные от зоны Таласо-Ферганского разлома пункты МТЗ-МВЗ в моделировании не участвовали. Перед магнитотеллурической инверсией ТЕ-моды (второй уровень) производилась нормализация продольных кривых кажущегося сопротивления  $\rho^H$  на продольные кривые ТЕ-моды магнитовариационной модели с первого уровня. Эта процедура заключалась в конформном смещении правых ветвей экспериментальных кривых  $\rho^H$  до совпадения  $S_{mt}$  наблюдаемых кривых с линией  $S_{mv}$  модельных кривых (рис. 2). В работе [1] этот вид нормализации экспериментальных кривых назван магнитовариационной нормализацией. В качестве стартовой модели для магнитотеллурической инверсии (ТЕ-мода) использовалась итоговая модель, полученная в результате магнитовариационной инверсии. После выполнения инверсии нормализованных кривых сопротивления некоторых блоков изменились, однако их геометрия осталась той же, что и на предыдущем уровне инверсии.

ГМ-мода магнитотеллурической инверсии является ключевой при исследовании зоны Таласо-Ферганского разлома, в связи с моделированием предполагаемого здесь эффекта вытеснения поперечного тока. В качестве старто-

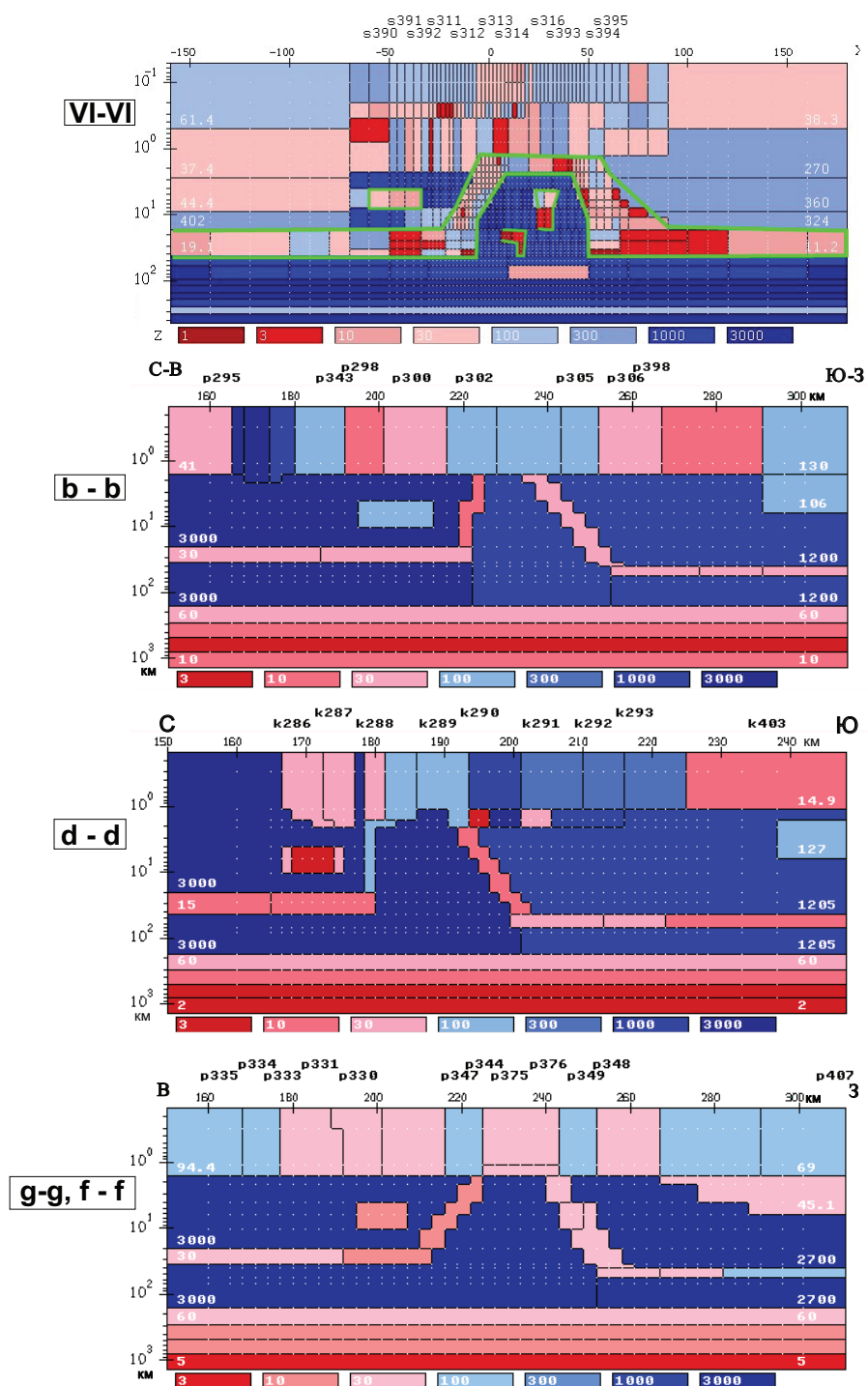


Рис. 4. Геоэлектрические модели, по региональному профилю VI–VI и локальным профилям b-b, d-d, g-g- f-f, секущим зону Таласо-Ферганского разлома. Значения сопротивлений указаны внутри блоков моделей и в условных обозначениях.

вой модели использовалась модель, полученная в результате инверсии продольных кривых  $\rho^{\parallel}$ . Подбирались значения сопротивлений осадочного чехла, коровых субвертикальных проводящих зон и корового проводящего слоя. В результате выполнения инверсии поперечных кривых были определены значимые для ТМ-моды участки в модели, причем изменения геометрии блоков коснулись лишь верхней части разреза – между п.287 и п.288 потребовался высокоомный блок – “выступ фундамента”. Для проверки всего процесса количественной интерпретации магнитовариационных и магнитотеллурических данных, пришлось вернуться к первому и второму уровням со стартовой моделью, включающей этот высокоомный блок. Существенного влияния на ТЕ – моду он не оказал. Необходимо признать, что идеального подбора модели под всю совокупность экспериментальных данных достичь не удалось. При инверсии магнитовариационных данных была осуществлена попытка использования наряду с реальными векторами  $ReW$  мнимых векторов  $ImW$ . Однако, модели, получаемые при инверсии  $ImW$ , существенно отличались от моделей, получаемых по  $ReW$  и по ТЕ и ТМ-модам. При инверсии  $ImW$  совместно с другими компонентами получалась большая невязка. Очевидно, что точность определения  $ImW$  недостаточна и соответствующий массив данных значительно “зашумлен”, что может быть обусловлено малой длиной этих векторов в исследуемом районе для рабочего диапазона частот. Кроме того, источником некоторой “внутренней противоречивости” ансамбля исходных данных относительно двумерных моделей может быть недостаточная двумерность участков расположения профилей.

Сходимость моделей, получаемых при инверсии реальных типперов  $ReW$  на нескольких периодах с моделями, получаемыми при инверсии ТЕ-нормализованных данных и ТМ-данных – хорошая. Как уже отмечалось выше, инверсия данных ТМ-моды является очень важной из-за наличия эффекта вытеснения поперечного тока в Таласо-Ферганской зоне секущих деформаций, и поэтому хорошее согласие моделей, получаемых по поперечным кривым ( $\rho^{\perp}$ ), по магнитовариационным данным ( $ReW$ ), и по продольным нормализованным кривым ( $\rho^{\parallel}$ ) подтверждает правильность выбранного способа интерпретации и правильность схематической (стартовой) модели.

На рис. 4 приведены 2D модели сечений Таласо-Ферганской зоны деформаций по региональному профилю VI–VI и локальным Карасуйскому (b-b) и Алайку-Арпинскому (e-e),

(f-f) профилям. Для построения модели по региональному профилю VI–VI использовалась та же методика инверсии, что и для Кекиримского профиля (d-d), но с более мощной версией программы моделирования, позволяющей одновременно инвертировать около 370 ячеек. Модели, полученные при инверсии независимых исходных данных, хорошо согласуются между собой по основным структурам, а расхождения наблюдаются на концах профилей.

#### **Основные результаты 2D моделирования.**

Рассмотрим показанное на рис. 4 сопоставление итоговых моделей для четырех профилей, совмещенных по линии Таласо-Ферганского разлома. На всех сечениях вблизи Таласо-Ферганского разлома наблюдается высокоомная структура, ограниченная с северо-востока субвертикальной электропроводящей зоной Таласо-Ферганского разлома. В модели по региональному профилю VI–VI в ней присутствуют два проводящих объекта. Эта зона прерывает коровый, проводящий слой, распространенный в Северо-Восточном Тянь-Шане. Ширина высокоомной структуры по верхней кромке оценивается от 9 до 20 км, а на уровне корового проводника от 30 до 40 км. Её длина, оцененная по имеющимся сечениям, составляет около 250 км.

Анализ моделей, построенных с участием данных по поперечным кривым  $\rho^{\perp}$ , позволяет сделать количественные оценки проводимости субвертикальных флюидонасыщенных разломных зон, пересекающих высокоомную кору. Так, по Кекиримскому профилю (d-d) проводимость, определенная по поперечному току составляет 50–200 См в разных блоках модели. Для Карасуйского (b-b) и Алайку-Арпинского (e-e), (f-f) эта оценка проводимости субвертикальных проводящих зон составляет 50–300 См. По результатам интерпретации ТЕ-моды этот параметр определить сложнее из-за боковых влияний соседних проводящих объектов.

**Выводы.** Получена дополнительная геолого-геофизическая информация о строении земной коры Центрального Тянь-Шаня, зоны Таласо-Ферганского разлома, восточной части Ферганской впадины и ее горного обрамления. С помощью инверсии поперечных кривых МТЗ в зоне Таласо-Ферганского разлома проведены исследования эффекта вытеснения поперечного тока, обнаружена резкая смена характеристик – “разрыв сплошности” корового проводника, – происходящая по Таласо-Ферганскому разлому. Между северо-восточной и юго-западной частями корового проводника зоны Таласо-Ферганского

разлома отсутствует электрическая кондуктивная связь.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-05-00572-а.

### *Литература*

1. *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.
2. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Н.А. Мерицкова.* Об обратной задаче зондирования с использованием магнитотеллурических и магнитовариационных данных. М.: МАКС Пресс, 2000. 68 с.
3. *Гатина Р.М., Мухин П.А.* О возможной природе Южно-Тяньшанской аномалии электропроводности // *Физика Земли*. 1988. №8. С.59–62.
4. *Рыбин А.К.* Глубинные электромагнитные зондирования в Центральной части Киргизского Тянь-Шаня: Автореф. дисс... канд. физ.-мат. М., 2001. 152 с.
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. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В.* Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.