

УДК 550.837 (575.2)(04)

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН ТЯНЬ-ШАНЯ

А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков

Представлен анализ результатов эксперимента по магнитотеллурическому мониторингу в пунктах наблюдений Аксу и Чон-Курчак. Рассмотрены временные ряды вариаций кажущегося электросопротивления в зависимости от азимута в районе Камбаратинского взрыва и пункте Алмалы. Особое внимание уделено вопросам точности определения магнитотеллурических передаточных функций, получаемых при обработке данных мониторинга.

Ключевые слова: магнитотеллурический мониторинг; кажущееся сопротивление; землетрясение; тензор импеданса.

Введение. Для изучения и слежения за геодинамическими процессами, протекающими в глубоких горизонтах земной коры Тянь-Шаня, Научная станция РАН в г. Бишкеке и канадская компания “Феникс Геофизикс” (Торонто) в 2003 г. совместно установили две станции Феникс

MTU-5D для проведения магнитотеллурического мониторинга. Обе станции находятся на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), который является частью Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоны (рис. 1).

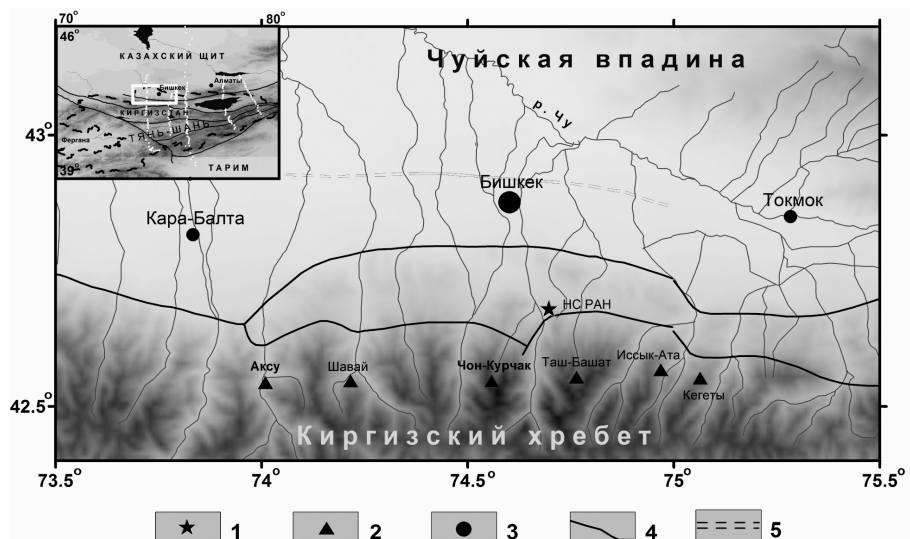


Рис.1. Карта Северного Тянь-Шаня – территория БГП. 1 – Научная станция РАН; 2 – стационарные пункты проведения электромагнитного мониторинга ЗСД и опытно-методических МТЗ с помощью аппаратуры Феникс; 3 – крупные города; 4 – основные разломы; 5 – Центрально-Чуйская флексурно-разрывная зона. На врезке в левом верхнем углу светлым прямоугольным контуром показано расположение БГП и региональные профили МТЗ-МВЗ (белые линии).

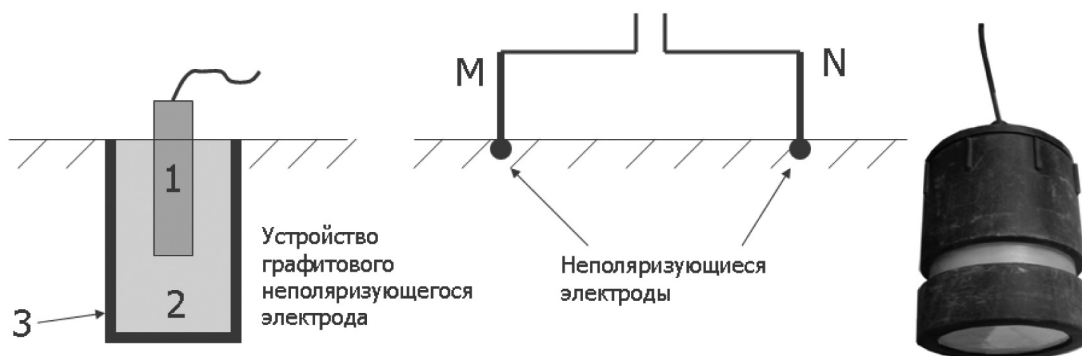


Рис. 2. Измерение горизонтальных компонент электрического поля.

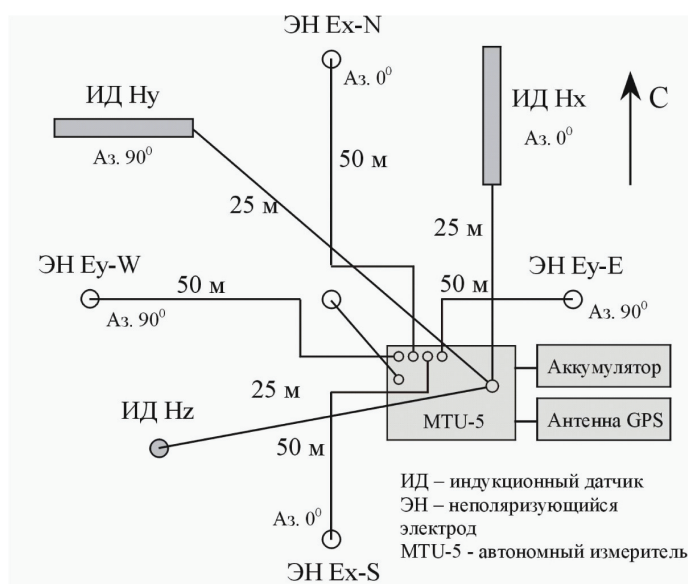


Рис. 3. Измерительная установка пяти компонент МТ поля с использованием станции Phoenix MTU-5D.

Научная станция РАН имеет семь специально оборудованных пунктов для проведения стационарных геофизических наблюдений (показаны красными треугольниками на рис. 1), где выполняются режимные электромагнитные наблюдения по методу ЗС. Два из этих пунктов (Аксу и Чон-Курчак) были выбраны для проведения долговременных непрерывных магнитотеллурических измерений с использованием аппаратуры Phoenix MTU-5D. Такое сочетание самой современной геофизической аппаратуры и хорошо оснащенного геодинамического полигона с многолетним успешным опытом проведения исследований с использованием искусственных электромагнитных полей вызывает интерес к результатам эксперимента по магнитотеллури-

ческому мониторингу в Северном Тянь-Шане у многих ученых в России и за рубежом. До недавнего времени возможности магнитотеллурики с точки зрения изучения динамики геосреды сдерживались, главным образом, невысокой точностью получаемых электромагнитных параметров и ограниченностью частотного диапазона исследований.

Методика магнитотеллурических наблюдений и аппаратура. Метод магнитотеллурического зондирования основан на одновременной регистрации вариаций пяти компонент естественного электромагнитного поля Земли (E_x , E_y и H_x , H_y , H_z) в одной точке. Интервал регистрируемых периодов – от 0,003 с до сотен минут (при глубинных исследованиях – до нескольких часов).

Измерительная установка состоит из двух взаимно перпендикулярных измерительных линий (диполей) M_1N_1 и M_2N_2 , являющихся датчиками электрического поля E_x и E_y . Длина измерительных линий в условиях горного рельефа Тянь-Шаня составляет 50–100 м. Заземление электрических диполей осуществляется с помощью неполяризующихся электродов, разработанных сотрудниками Научной станции (рис. 2).

Электрическое поле измеряется в милливольтгах на километр:

$$E_x \approx \frac{\Delta U_{M_1N_1}}{M_1N_1}; E_y \approx \frac{\Delta U_{M_2N_2}}{M_2N_2}.$$

Магнитное поле измеряется с помощью трех индукционных датчиков. Датчики горизонтального магнитного поля H_x и H_y расположены относительно друг друга ортогонально. Напряженность магнитного поля измеряется в нанотеслах:

$$1 \text{ нТл} = \frac{10^{-2}}{4\pi} \text{ А/м}.$$

Направление измерительных линий и ориентацию датчиков магнитного поля выбирают обычно в соответствии с основными элементами простирающихся структур в районе исследований. В нашем случае ориентация измерительной установки проводилась по азимутам 0 и 90 градусов, что в системе координат МТЗ соответствует востоку и северу. При этом предусматривалась дальнейшая возможность пересчета измеренных данных МТЗ на азимут простирающихся основных структур на исследуемой территории и опреде-

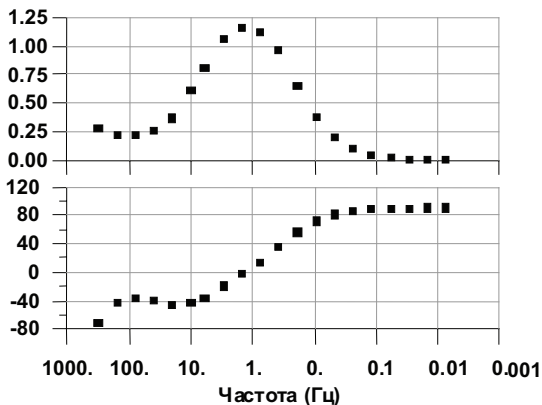


Рис. 4. Амплитудно-фазовая частотная характеристика магнитного канала MTU-5D с индукционным датчиком МТС-50 (вверху – амплитуда в усл. ед., внизу – фаза в град.)

ления продольных и поперечных направлений, необходимых для двумерной инверсии данных. Пример размещения измерительной установки показан на рис. 3.

О точности определения МТ передаточных функций, получаемых в процессе мониторинга. При проведении МТ-мониторинга, в первую очередь, важна стабильность аппаратного отклика [1]. На рис. 4 показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики магнитного канала станции Phoenix MTU-5D с индукционными датчиками МТС-50.

В процессе осуществления непрерывных МТ наблюдений на Бишкекском геодинамическом полигоне не реже одного раза в три месяца контролировались следующие характеристики измерительной системы: стабильность коэффициента передачи канала и форма амплитудно-фазовой частотной характеристики.

Проведенные в разное время калибровки и различные тестовые проверки всех измерительных каналов и датчиков показали высокую стабильность измерительной системы Phoenix MTU-5D. Изменения параметров аппаратных характеристик за время проведения этих проверок не превысили 0,2% (см. таблицу).

Известно, что при наличии шумов в измерениях оценки МТ-параметров могут быть значительно смещены [2]. Рассмотрим это более подробно.

Цель обработки данных МТЗ – получение из шумоподобных измеряемых сигналов информацию о структуре проводимости подстилающей среды в виде набора гладких функций, отражающих электрические свойства Земли. Основными из этих функций являются зависимости импеданса (Z) от частоты. По величинам импеданса рассчитываются кажущиеся сопротивления.

Задача нахождения тензора импеданса сводится к нахождению коэффициентов в линейных соотношениях между компонентами электромагнитного поля в частотной области. Система уравнений для нахождения элементов тензора импеданса

$$\begin{aligned} E_x(f) &= Z_{xx}(f)H_x(f) + Z_{xy}(f)H_y(f) \\ E_y(f) &= Z_{yx}(f)H_x(f) + Z_{yy}(f)H_y(f) \end{aligned}$$

представляет собой два комплексных уравнения с четырьмя комплексными неизвестными. Решение может производиться (а) осреднением измерений, выполненных в разные временные интервалы, т.к. Z_{ij} не меняется во времени, (б) осреднением некоторого числа измерений на близких частотах, т.к. импеданс меняется с частотой достаточно плавно.

Сравнительный анализ амплитудно-фазовых частотных характеристик канала Hx станции MTU-5D Вох-1381 на основе двух записей калибровок, выполненных в разное время (интервал времени между рассматриваемыми калибровками составляет два месяца)

Частота, Гц	Калибровка-1		Калибровка-2		Амплитуда Разность, %	Фаза Разность, %
	амплитуда, усл. ед.	фаза, град.	амплитуда, усл. ед.	фаза, град.		
320	0.23779	-69.35686	0.23919	-69.35777	0.58813	0.00131
120	0.21220	-36.91782	0.21240	-36.99304	0.09609	0.20354
40	0.25566	-38.57438	0.25513	-38.53648	-0.20873	-0.09830
15	0.45092	-47.02663	0.45037	-47.04367	-0.12287	0.03623
6	0.80993	-36.84449	0.80945	-36.84734	-0.05960	0.00773
1.12500	1.16407	3.76683	1.16400	3.78496	-0.00644	0.48028
0.56250	1.08398	21.82055	1.08379	21.86759	-0.01698	0.21534
0.09375	0.38493	71.05002	0.38434	71.08712	-0.15508	0.05220
0.01172	0.05076	87.58269	0.05068	87.58730	-0.17310	0.00526
0.00110	0.00477	89.80289	0.00476	89.80277	-0.17304	-0.00013
0.00014	0.00060	90.00397	0.00059	90.00342	-0.17301	-0.00061
0.00002	0.00010	90.02791	0.00010	90.02731	-0.17300	-0.00067

Тензорное импедансное уравнение можно представить в эквивалентной матричной форме:

$$E=ZH \quad E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

Помножив обе части уравнения на комплексно-сопряженные компоненты электрического или магнитного поля, получаем переопределенную систему для нахождения оценок Z . Решение такой системы для Z_{xy} на частоте f записывается в виде:

$$Z_{xy} = \frac{(E_x H_y)(H_x H_x) - (E_x H_x)(H_x H_y)}{(H_x H_x)(H_y H_y) - (H_x H_y)(H_y H_x)}$$

где H_x, H_y – комплексно сопряженные величины. При этом произведения $(H_x H_x)$ и $(E_x H_x)$ являются оценками авто- и взаимных (кросс) спектров плотностей мощности сигналов ЭМ-поля. Присутствие шума, например, в сигналах магнитного поля, может сместить авто-спектр $(H_x H_x)$, тем самым смещая вверх или вниз оценки элементов тензора импеданса Z .

Для уменьшения ошибок смещения импедансных оценок дополнительно к стандартной методике обработки, реализованной в программе SSMT2000, входящей в штатный комплект измерительного комплекса MTU-5D компании Феникс, применялась углубленная схема обработки с помощью CORRECTOR, разработанной сотрудниками геофизической компании “Северо-Запад” (Москва). Для углубленной обработки и окончательного отбора импедансных оценок

использовались все решения с отдельным анализом импедансных и адмитансных оценок, а затем проводилась отбраковка наиболее “зашумленных” оценок и последующее объединение наиболее достоверных. Пример, иллюстрирующий результативность такого подхода, приведен на рис. 5.

На рис. 6 приведены результаты контрольных измерений двумя станциями Phoenix MTU-5D для оценки точности определения азимутальных характеристик вариаций электропроводности на пункте Алмалы.

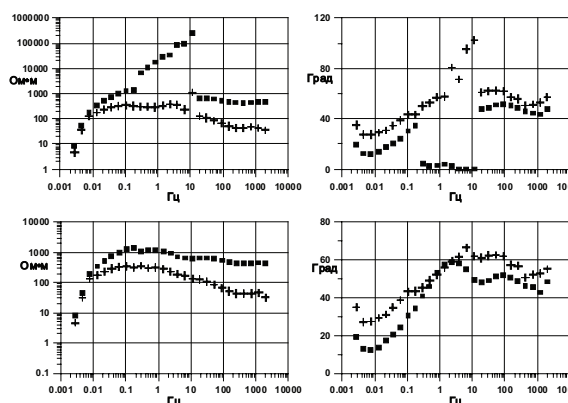


Рис. 5. Кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса для пункта Чон-Курчак (вверху – стандартная обработка, внизу – углубленная).

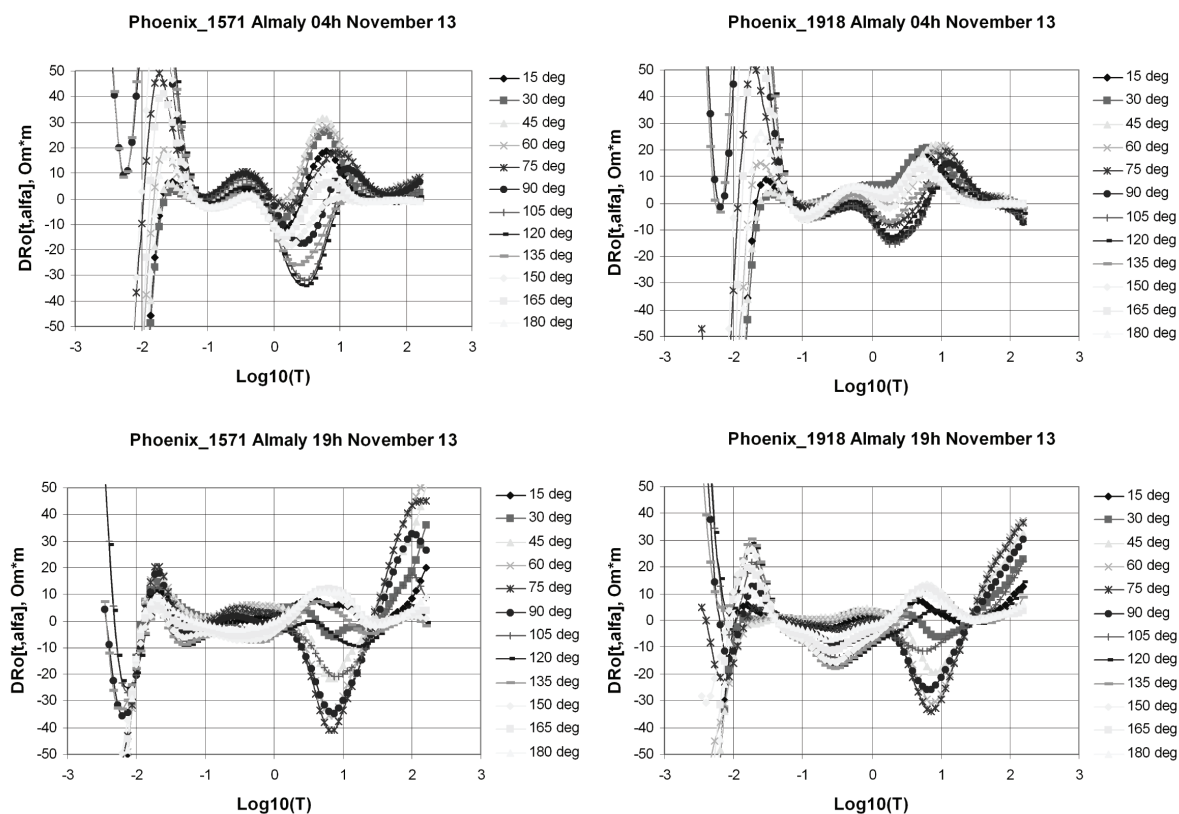


Рис. 6. Результаты контрольных измерений для определения точности оценки азимутальных характеристик вариаций электропроводности на пункте Алмалы (для 4-й и 19-й часовых реализаций).

Распределение среднеквадратического отклонения от среднего для ориентированных кривых вариаций электропроводности двух станций Phoenix MTU-5D №1571 и №1918 показано на рис. 7. На левой панели рассматривается диапазон периодов от 0,1 до 2,5 сек. В этом интервале среднеквадратическое отклонение не превышает одного Ом*м, в отличие, от приведенного на правой панели диапазона периодов от 2,5 до 25 сек, величина среднеквадратического отклонения в котором для некоторых часовых МТ-зондирований достигает четырех Ом*м.

Спектрально-временной анализ данных МТ мониторинга. Для исследования временной изменчивости кажущегося сопротивления и фаз импеданса рассмотрим отклонения среднесуточных оценок амплитуд и фаз от их средних значений за период наблюдений:

$$\Delta \rho_{xy} = (\rho_{xy} - \bar{\rho}_{xy}) / \bar{\rho}_{xy} \quad \text{и} \quad \Delta \varphi_{xy} = \varphi_{xy} - \bar{\varphi}_{xy}$$

Рассмотрим результаты анализа магнитотеллурических данных, полученных за три го-

да наблюдений с 15 сентября 2003 г. по октябрь 2006 г. в пунктах Чон-Курчак и Аксу на основе спектрально-временного представления мониторинговой информации.

В динамическом спектре амплитуд кажущегося сопротивления (рис. 8 и 9) отчетливо выявляются отдельные светлые полосы, отражающие интервалы периодов (глубин исследования), в пределах которых величина изменения кажущегося сопротивления составляет единицы процентов. Темным цветом показаны изменения, превышающие 10%, и отражающие, главным образом, неустойчивость и разброс получаемых оценок МТ-параметров. Поэтому более информативной с позиции динамики кажущегося сопротивления является показанная на рис. 8 и 9 широтная (запад-восток) компонента кажущегося сопротивления. На рисунках представлены исходные ряды результатов обработки полевых материалов МТ-зондирований на стационарных пунктах Аксу и Чон-Курчак в первичном виде с

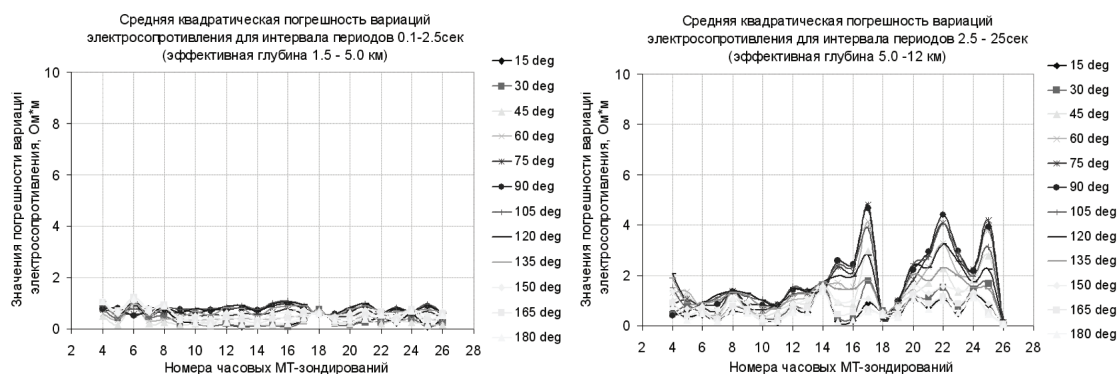


Рис.7. Распределение среднеквадратического отклонения от среднего для ориентированных кривых вариаций электропроводности между двумя станциями Phoenix MTU-5D №1571 и №1918.

использованием программных средств стандартной системы обработки Феникс без какой-либо дополнительной фильтрации. Это позволяет визуально оценить качество полевых материалов МТ мониторинга. Пунктирными линиями отмечены сильные сейсмические события, произошедшие в регионе за период мониторинга. Для сопоставления мониторинговых МТ данных с сейсмичностью были выбраны наиболее сильные землетрясения с энергетическим классом $K > 11$, эпицентры которых удалены от пунктов мониторинга на расстояние не более 100 км, а также разрушительное землетрясение с магнитудой 7.6, произошедшее 8 октября 2005 г. в Пакистане.

На рис. 8 и 9 также видно, что до начала 2005 г. вариации имеют в основном случайный характер и приблизительно близкие значения величин для кажущегося сопротивления и фазы. Относительные вариации амплитуды в этот период обычно меньше 5% для пункта Аксу и 10% для пункта Чон-Курчак, за исключением отдельных достаточно узких интервалов периодов, где, по нашему мнению, значительное увеличение невязок связано, в первую очередь, с погрешностями определения импедансных оценок. Заметим, что разрезы амплитуд и фаз представлены в согласованном масштабе (1 процент изменения амплитуды Δp соответствует вариации фазы $\Delta \varphi$ в 0.286°).

Однако начиная с июня 2005 г. отчетливо просматривается “предвестниковый” характер вариаций кажущегося сопротивления, которые, по нашему мнению, отражают период активизации геодинамического процесса в земной коре Северного Тянь-Шаня и, несомненно, имеют связь с сильными землетрясениями, произошедшими 20 июня и 8 октября 2005 года.

Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности. В связи со значительной анизотропией электрических свойств среды, обусловленной резко неоднородным геологическим строением БГП, для тонкого анализа процессов отражающихся в мониторинговых МТ-наблюдениях предлагается рассмотреть временные ряды вариаций компонент тензора импеданса в зависимости от азимута α , а не только по направлениям xu и ux , (т.е. 0 и 90°), по которым производились полевые измерения тензора импеданса.

Рассмотрим возможные способы и подходы для определения ориентационных характеристик вариаций кажущегося сопротивления на примере Камбаратинского промышленного взрыва, где нами исследовалась реальность существования реакции земной коры в виде вариаций сопротивления на искусственное изменение тектонических напряжений. Полученные в результате сейсмических наблюдений данные позволили установить наличие обусловленных взрывом подвижек по разлому, прилегающему к пункту взрыва, а также зафиксировать серию наведенных слабых сейсмических событий. Камбаратинский эксперимент (22 декабря 2009 г.) включал в себя сейсмологические, электромагнитные и GPS наблюдения, выполненные силами Научной станции РАН. Мощность промышленного взрыва составляла 2,8 Кт в тротиловом эквиваленте. Расстояние от пункта взрыва до магнитотеллурической станции Phoenix MTU 5D равнялось 5,7 км. Производилась регистрация двух горизонтальных компонент электрического поля и трех компонент магнитного поля. МТ-зондирования выполнялись в течение суток до момента взрыва и двух суток по-

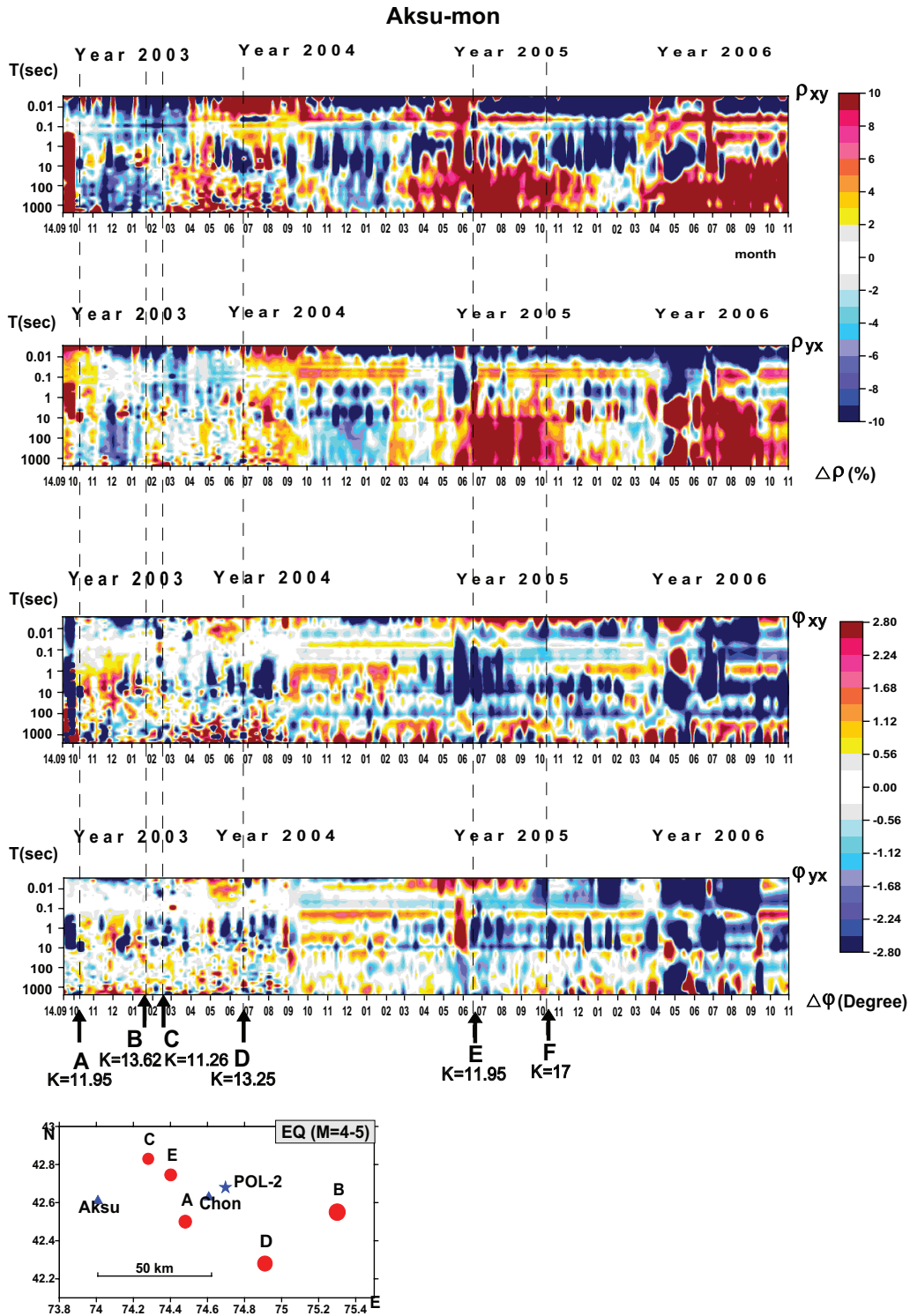


Рис. 8. Пункт мониторинга Аксу. Отклонения среднесуточных оценок обеих мод амплитуд и фаз кажущегося сопротивления от средних кривых. Отклонения нормированы на средние оценки за весь период анализа и выражены в процентах.

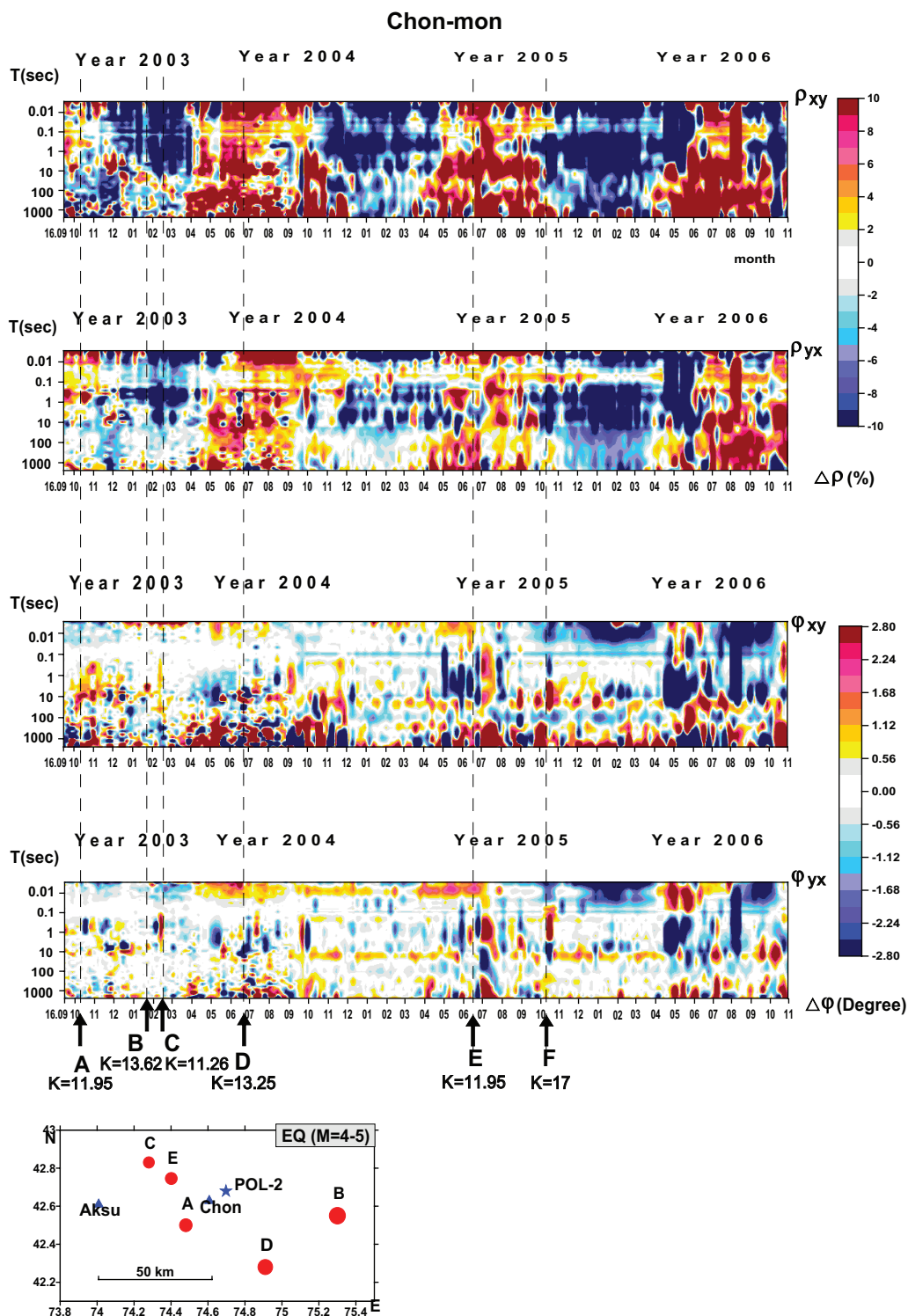


Рис. 9. Пункт мониторинга Чон-Курчак. Отклонения среднесуточных оценок обеих мод амплитуд и фаз кажущегося сопротивления от средних кривых. Отклонения нормированы на средние оценки за весь период анализа и выражены в процентах.

сле взрыва. Таким образом, компоненты тензора импеданса определялись по направлениям ху и ух, (т.е. 0 и 90°) в течение трех суток. Всё время регистрации (около 70 час) был разделено на непересекающиеся пронумерованные интервалы (Т) продолжительностью один час для независимой обработки. Обработка МТ-реализаций такой продолжительности обеспечивает устойчивое определение значений тензора импеданса на периодах более 100 с, что значительно превышает требуемую глубинность исследований (1–15 км по данным распределения гипоцентров землетрясений). Следующим этапом обработки являлся пересчет значений тензора импеданса для каждой из часовых реализаций на азимуты через 15° и вычисление средних кривых кажущегося сопротивления до момента взрыва по

каждому направлению $Ro-av_{[\alpha]}$. Вычисление отклонения $DRo_{[t,\alpha]}$ текущей ориентированной кривой кажущегося сопротивления $Ro_{[t,\alpha]}$ от средней кривой $Ro-av_{[\alpha]}$ по всем часовым интервалам и для всех рассматриваемых азимутов является итоговой процедурой по расчету азимутальных характеристик вариаций электросопротивления. Азимутальные характеристики временных рядов вариаций компонент тензора импеданса могут быть представлены как в виде псевдоразрезов (рис. 10), так и в виде семейств ориентированных кривых.

На рис. 11 в качестве примера представлены семейства ориентированных кривых отклонения кажущегося сопротивления $DRo_{[36,\alpha]}$ и $DRo_{[37,\alpha]}$ от средних значений $Ro-av_{[\alpha]}$ до взрыва в зависимости от периода МТ-зондирования, для 36 и

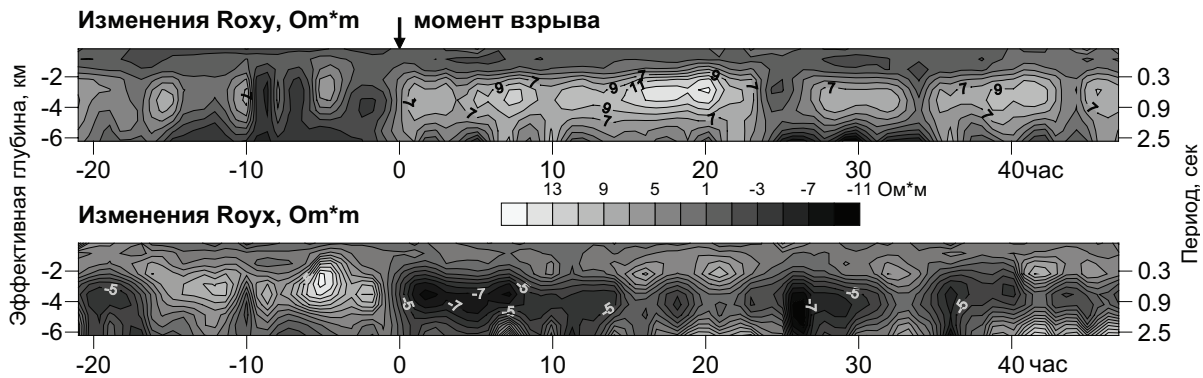


Рис. 10. Временные ряды вариаций компонент тензора импеданса по Камбаратинскому эксперименту, представленные в виде псевдоразрезов кажущегося сопротивления по направлениям ху и ух, (т.е. азимуты 0 и 90°).

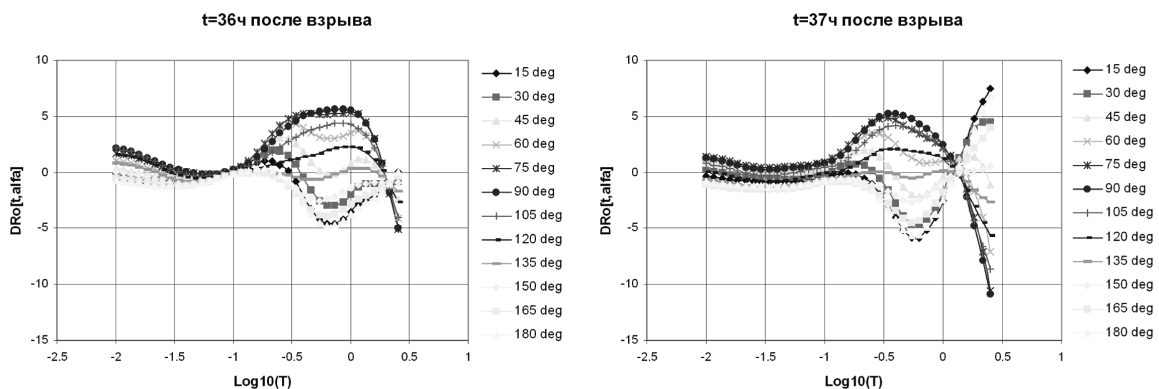


Рис. 11. Пример семейств ориентированных кривых кажущегося сопротивления $DRo_{[t,\alpha]}$ во время Камбаратинского эксперимента для 36 и 37-го часа после взрыва: $t=36$, $t=37$, α от 15 до 180°; Т – период МТ-зондирования.

37-го часа после момента взрыва. Рассмотрим поведение этих вариаций на рис.10 в зависимости от периода МТ-зондирований и азимутов α . Следует отметить, что для 36-го и для 37-го часа в интервале периодов $-2 < \text{Log}_{10}(T) < -0,7$; $(0,01 < T < 0,2 \text{ с})$ вариации кажущегося электросопротивления по всем азимутам очень близки к нулю. Это свидетельствует о том, что в указанном интервале периодов (эффективная глубина проникновения поля от $\sim 0,6$ до ~ 2 км) существенных изменений электросопротивления во времени не происходит. Далее для периодов $-0,7 < \text{Log}_{10}(T) < 0,1$, $(0,2 < T < 1,2 \text{ с})$, что соответствует эффективной глубине проникновения поля от ~ 2 до ~ 5 км наблюдается анизотропное изменение значений электросопротивления: для азимутов $75-90^\circ$ наблюдается возрастание, а для ортогонального направления $0-15^\circ$ – уменьшение. Такое поведение отмечено практически для всех часовых интервалов МТЗ после взрыва, за исключением сильно зашумленных.

Отметим, что азимутальные определения кажущегося сопротивления, в первую очередь, позволяют оценить геометрические характеристики статической структуры связанной системы трещин, флюидонасыщенность которых может объяснить наблюдаемое распределение электропроводности анизотропной среды [3]. Особенно важной является возможность выявления доминирующих направлений трещиноватости в исследуемом геологическом объеме.

Результаты исследования динамики ориентированных МТ кривых указывают на расширение возможности использования электромагнитных зондирований в качестве инструмента изучения параметров напряженно-деформированного состояния геосреды. Так на основе анализа азимутальных зависимостей вариаций электропроводности в массивах горных пород, могут быть получены азимутальные характеристики процесса изменения тектонических напряжений, дополняющие комплекс геофизических параметров, имеющих зависимость от азимута. В качестве рабочей гипотезы для объяснения вариаций кажущегося сопротивления, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния геологических объектов, используется гипотеза о перераспределении флюида между системами трещин (рис. 12), пронизывающими геологические объекты и обладающими различной ориентацией [4]. На рис. 12 приведена идеализированная схема системы трещин внутренней структуры блока геосреды, в которой доминирующими являются ортогональные направления прости-

рания трещиноватости. В такой обстановке действие силы сжатия в направлении С-Ю вызовет сужение всех трещин, ориентированных в направлениях близких к азимуту З-В. Флюид, как несжимаемая жидкость, будет выдавливаться из трещин направленности З-В в трещины ортогонального направления С-Ю. Соответственно, увеличится давление флюида в этих трещинах и произойдет их расширение, что в итоге приведет к увеличению проводимости (понижению сопротивления) в направлении С-Ю.

В рамках такой феноменологической модели очень наглядно выглядит уменьшение электросопротивления в интервале периодов $-0,7 < \text{Log}_{10}(T) < 0,1$ $(0,2 < T < 1,2 \text{ с})$ по азимутам около 15° , что свидетельствует о сжатии, по этому направлению. Увеличение электросопротивления по ортогональным азимутам (около 90°) подтверждает правоту рассматриваемой рабочей гипотезы. Для периодов более трех секунд точность определения компонент тензора импеданса недостаточна и, соответственно, эти периоды не включены в анализ.

На территории БГП выполняются специальные электромагнитные исследования по изучению азимутальных вариаций электропроводности на пункте Алмалы, а на стационарных пунктах Аксу и Чон-Курчак проводятся непрерывные (мониторинговые) магнитотеллурические наблюдения в стандартной конфигурации измерительной установки.

Оценка точности пересчета значений тензора импеданса на произвольный азимут производилась с помощью опытно-методических МТ работ с использованием аппаратуры Phoenix MTU-5D. После производства МТ-зондирований в обычном режиме, измерительные установки станций были развернуты на 45° и вновь выполнены зондирования. На рис. 13 показано сопоставление кривых кажущегося сопротивления, измеренных по азимуту 0° с кривыми, измеренными на азимуте -45° и пересчитанными на азимут 0° . С учетом точности единичного измерения, погрешность пересчета является вполне удовлетворительной. Стандартная (среднеквадратичная) погрешность составляет $+ 1,30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Следует отметить, что в целом значения вариаций кажущегося сопротивления для исследуемых диапазонов периодов значительно превосходят среднеквадратическое отклонение, т.е. рассматриваемые оценки амплитуд вариаций являются надежными. Рассмотрим графики на рис. 6, уделив особое внимание интервалам периодов, от $0,1$ до $2,5 \text{ с}$ и от $2,5$ до 25 с ($-1 < \text{Log}_{10}(T) < 0,4$

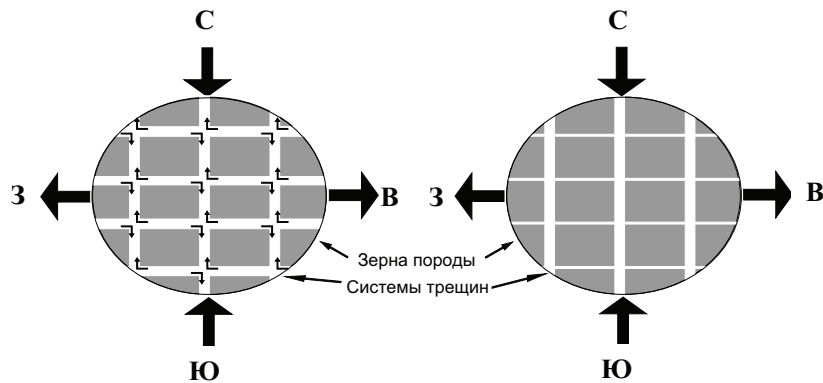


Рис. 12. Феноменологическая модель перераспределения флюида между системами трещин при изменении напряженно-деформационного состояния среды. Толстыми стрелками показаны направления действия силы сжатия и растяжения.

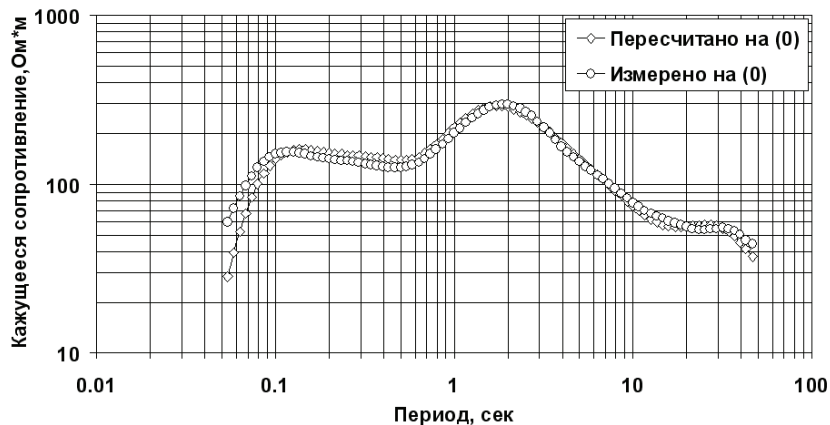


Рис. 13. Сопоставление кривых кажущегося сопротивления, измеренных по азимуту 0° с кривыми, измеренными на азимуте -45° и пересчитанными на азимут 0° .

и $0,4 < \text{Log}_{10}(T) < 1,4$). В отличие от данных Камбаратинского эксперимента, где в интервале периодов от 0,01 до 0,1 с вариации электросопротивления близки к нулю, данные по пункту Алмалы содержат в этом диапазоне периодов синхронные по обеим станциям вариации большой амплитуды. Однако они исключены нами из рассмотрения из-за малой глубинности, соответствующей этому диапазону, и возможного влияния метеорологических факторов. В интервале периодов от 0,1 до 2,5 с так же, как и в данных по Камбаратинскому эксперименту наблюдается возникновение и некоторые изменения вариаций электросопротивления на всех часовых отрезках МТ-зондирований. Таким образом, в рассматриваемом диапазоне периодов, отражающем эф-

фективную глубину проникновения поля от $\sim 1,5$ до $\sim 5,0$ км как в пункте Алмалы, так и в пункте Камбарата присутствуют вариации электросопротивления, включая "противофазный" характер вариаций в ортогональных направлениях, что подтверждает гипотезу [3] о перераспределении флюидов по системам трещин в связи с изменением напряженно-деформационного состояния среды.

Для следующего интервала эффективных глубин от 5 до 12 км вариации электропроводности выделяются только в пункте Алмалы, что связано с недостаточным уровнем точности МТ-зондирований в соответствующем интервале периодов для Камбаратинского эксперимента. Вариации электропроводности для указанного

интервала эффективных глубин имеют значительно больший размах (более 50 Ом·м) и характеризуются противоположной направленностью для ортогональных направлений.

В результате проведенного анализа временных рядов магнитотеллурических данных в пункте Алмалы выявлены изменения электропроводности в двух интервалах глубин. При этом азимуты, по которым наблюдались максимальные вариации электропроводности, для верхнего и нижнего интервалов эффективных глубин зондирования данного пункта наблюдения отличались на 30–75°.

Выводы. При разбиении длительных непрерывных записей магнитотеллурического зондирования на непересекающиеся часовые реализации с независимой последующей обработкой данных было обнаружено, что величина кажущегося сопротивления меняется во времени для некоторых интервалов периодов.

Контрольные наблюдения в пункте Алмалы, выполненные двумя станциями Phoenix MTU-5D, показали хорошую сходимость “ориентированных” вариаций электропроводности для обеих станций.

Наблюдаемые по ортогональным азимутам вариации противоположного знака подтверждают гипотезу о перераспределении флюида в порово-трещинном пространстве при изменении напряженно-деформационного состояния анизотропной среды.

Литература

1. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System, U.S. Patent No. 6 191 587 B1. Issued February 20, 2001.
2. Бердичевский М.Н., Безрук И.А., Сафонов А.С. Магнитотеллурические методы. Электро-разведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1989. Т.1. С. 261–310.
3. Busby J.P. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations // Geophysical Prospecting. 2000. 48. P. 677–695.
4. Bogomolov L., Bragin V., Fridman A., Makarov V., Sobolev G., Polyachenko E., Schelochkov G., Zeigarnik V., Zubovich A. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan Territory // Tectonophysics. 2007. Vol. 431. P. 143–151

УДК 550.372, 550.837 (575.2)(04)

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. Вольхиным 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