

УДК 550.372 (235.216)

**ПРОЯВЛЕНИЕ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРАХ  
(ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ)**

*Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев*

На основе корреляционного анализа гравитационных приливных воздействий и результатов магнитотеллурического мониторинга выявлена азимутальная зависимость тензочувствительности среды.

*Ключевые слова:* естественное электромагнитное поле; магнитотеллурический мониторинг; землетрясение; тензор импеданса; зоны активных разломов.

**APPEARANCE OF FAULT STRUCTURES IN ELECTROMAGNETIC PARAMETERS  
(FOR THE TERRITORY OF THE CENTRAL TIEN SHAN)**

*E.A. Bataleva, V.Yu. Batalev*

On the basis of correlation analysis of tidal gravitational effects and results of magnetotelluric monitoring azimuthal dependence of the tenso-sensitivity of the medium is revealed.

*Key words:* natural electromagnetic field; magnetotelluric monitoring; earthquake; impedance tensor; zones of active faults.

Магнитотеллурическое (МТ) зондирование представляет собой один из индукционных методов электроразведки, применяемых при геофизических исследованиях, в основу которого положено изучение естественного электромагнитного поля Земли. Процесс магнитотеллурического зондирования заключается в изучении зависимости импеданса (комплексного сопротивления), измеряемого на дневной поверхности Земли, от частоты магнитотеллурического поля. За счет явления скин-эффекта высокочастотные колебания магнитотеллурического поля быстрее затухают с глубиной, при этом низкочастотные колебания проникают на большие глубины. Следовательно, высокочастотные компоненты электромагнитного поля несут информацию только о приповерхностных частях разреза, а с понижением частоты мы получаем информацию о распределении электропроводности в глубинной части геоэлектрического разреза. Таким образом, изучая характер распределения кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) среды для разных частот электромагнитного поля можно получить представление о физических свойствах геоэлектрического разреза. Величину сопротивления определяет импеданс ( $Z$ ), представляющий собой (в общем случае) отношение электрической к магнитной составляющих электромагнитного поля ( $E_x/ H_y$ ) и ( $E_y/ H_x$ ) на различных частотах [1].

В отличие от других электроразведочных методов, в том числе и индукционного зондирования, метод МТЗ является экологически чистым, относительно дешевым и обладает высокой мобильностью, поскольку не требует использования генераторных установок, и, при этом, обеспечивает очень большую глубинность исследований, что невозможно при работе с методами с контролируемым источником.

В Научной станции РАН магнитотеллурические зондирования выполняются с использованием аппаратуры фирмы "Phoenix Geophysics" (Канада) – пятиканальных измерительных станций MTU-5D, позволяющих регистрировать электрические ( $E_x$ ,  $E_y$ ) и магнитные ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) компоненты магнитотеллурического поля. Вариации электрического поля измеряются с помощью электрических диполей длиной 50 м, что связано с особенностями проведения работ в горных условиях, с неполяризуемыми электродами, разработанными в Научной станции РАН [2], вариации магнитного поля – с помощью индукционных датчиков МТС-50. Время регистрации на рядовых пунктах наблюдения составляет не менее 30 минут в режиме аудиомангнитотеллурического зондирования (АМТЗ), 14 часов в режиме МТЗ, от двух до семи суток в режиме глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ). Определение координат точек осу-

ществляется в автоматическом режиме, с помощью встроенных в станцию GPS-приемников.

Мониторинговые магнитотеллурические наблюдения выполняются на Бишкекском геодинамическом полигоне [БГП] с 2003 г., когда канадская компания “Феникс Геофизикс” совместно с Научной станцией РАН установила две станции Феникс MTU-5D на стационарных пунктах Аксу и Чон-Курчак [3–5]. Обе станции находятся на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), который в свою очередь является частью Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоны (рисунок 1), регистрация данных осуществляется круглосуточно в интервале периодов 0,01–1000 с. В процессе осуществления непрерывных МТ-наблюдений не реже одного раза в 3 месяца контролируются такие характеристики измерительной системы как стабильность коэффициента передачи канала и форма амплитудно-фазовой частотной характеристики [3–5].

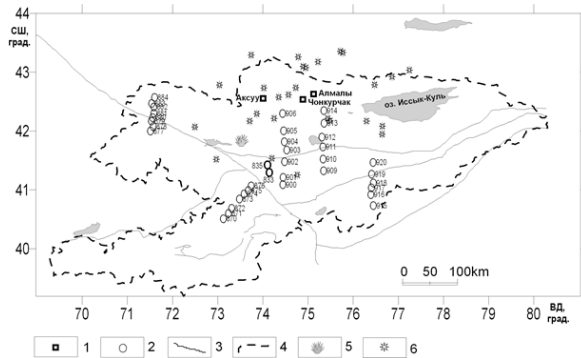


Рисунок 1 – Схема расположения стационарных пунктов МТ-мониторинга и ГМТЗ, выполненных на территории Центрального Тянь-Шаня в 2011 г.:

- 1 – пункты стационарных наблюдений МТ-мониторинга, 2 – пункты ГМТЗ, 3 – региональные разломы, 4 – граница Кыргызстана, 5 – Камбаратинский взрыв, 6 – сейсмические события, произошедшие за время регистрации ГМТЗ

Для стационарных пунктов мониторинговой сети БГП были выполнены работы по изучению глубинного геоэлектрического строения полигона с помощью таких электроразведочных методов как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), частотное зондирование (ЧЗ), зондирование становлением поля (ЗС) и МТЗ [6] с целью установления местоположения аномалиеобразующих объектов в геологической среде.

В исследованиях, связанных с развитием принципиально новой методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, рассматривались временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров сре-

ды по азимутам 0–180° в зависимости от периода зондирования [7–11]. Однако при более детальном анализе временных рядов магнитотеллурического мониторинга оказалось, что представление данных в полярных диаграммах является не только более наглядным, но и может привести к принципиально другим выводам (рисунок 2).

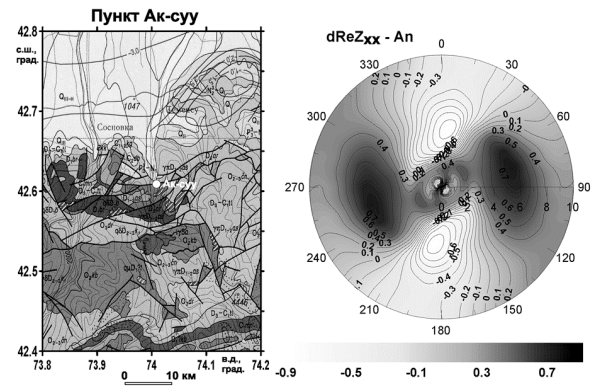


Рисунок 2 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-суу; панель справа – распределение коэффициента корреляции (дополнительный импеданс  $Z_{xx}$  и вертикальная компонента приливных воздействий  $A_n$ ) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$  (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции

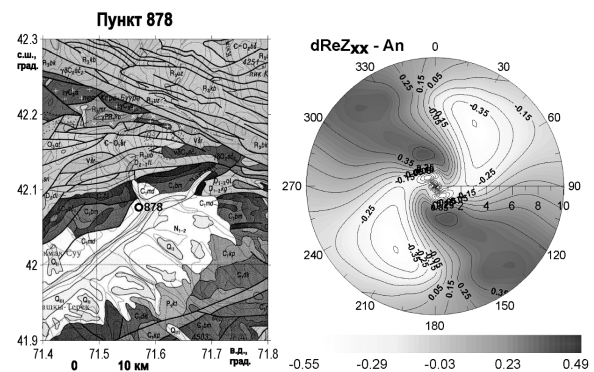


Рисунок 3 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга № 878; панель справа – распределение коэффициента корреляции (дополнительный импеданс  $Z_{xx}$  и вертикальная компонента приливных воздействий  $A_n$ ) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$  (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции

С целью выбора наиболее чувствительных зон к изменению деформированного состояния

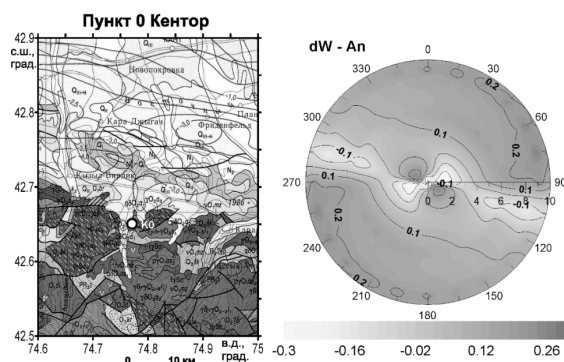


Рисунок 4 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга Кентор (0); панель справа – распределение коэффициента корреляции (вектор Визе (W) и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$  (T-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции

среды в 2011 г. был выполнен эксперимент, который включал в себя 34 пункта зондирования, заложенных в совершенно различных с точки зрения геологии и тектоники условиях (рисунок 1). В результате этого эксперимента были получены оценки изменения кажущегося электрического сопротивления как отклика среды на изменение напряженно-деформированного состояния среды, обусловленное как приливными воздействиями, так и сейсмическими событиями, произошедшими во время проведения эксперимента [8, 9].

В дальнейшем полученные временные ряды электромагнитных параметров были проанализированы на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований. Оказалось, что характер взаимосвязи наилучшим образом отражается в распределении характеристик среды на корреляционных полярных диаграммах (рисунки 2, 3).

Наибольший интерес вызвал тот факт, что ориентация основных тектонических нарушений, закартированных вблизи пункта зондирования, находит отражение в распределении кластеров дополнительных импедансов на корреляционных полярных диаграммах. В общей сложности было проанализировано более 10 пунктов зондирования, которые расположены в непосредственной близости от зон тектонических нарушений и все разломные структуры проявились в распределении электромагнитных параметров на полярных диаграммах. Обнаружена устойчивая зависимость между распределением магнитовариационных па-

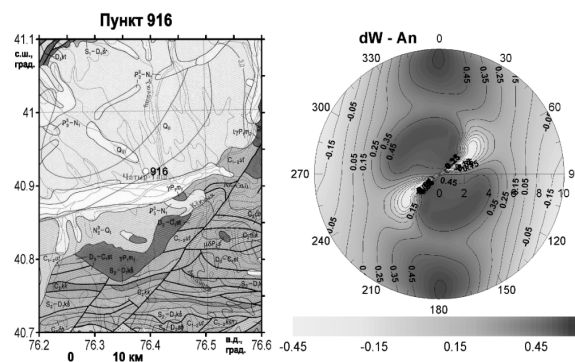


Рисунок 5 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга № 916; панель справа – распределение коэффициента корреляции (вектор Визе (W) и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$  (T-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции

раметров и простиранием разломных структур, иллюстрацией чего служат рисунки 4 и 5.

Необходимо отметить, что в геоэлектрических построениях наиболее четко зоны тектонических нарушений проявляются до глубин порядка 20–25 км [6, 13, 14] и особое внимание уделялось поведению электромагнитных параметров в пунктах магнитотеллурического мониторинга, приуроченных именно к активным разломным структурам. Отчасти это связано с тем, что существует предположение о тесной взаимосвязи процессов разломообразования и сейсмичности. При этом особый интерес вызывает вопрос о процессе возникновения сейсмических событий при активизации разломов и закономерностях миграции очагов землетрясений в них.

Для установления взаимосвязи проявления сейсмических событий в изменениях кажущегося электрического сопротивления был выполнен корреляционный анализ таких параметров как вариации кажущегося сопротивления, фазы импеданса, дополнительных импедансов и магнитовариационных параметров (векторов Визе-Паркинсона). Была сформирована выборка землетрясений из каталога сети KNET (НС РАН) и каталога Института сейсмологии НАН КР, в которую входили сейсмические события с  $K > 6$  и гипоцентральной расстоянием не более 100 км от пункта мониторинга за период 2003–2014 гг. Для стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу установлено, что наибольший отклик в изменение кажущегося сопротивления вносят землетрясения, эпицентр которых расположен под азимутом в  $57^\circ$  [10].

Оценка точности выполняемых процедур производилась с использованием контрольных зондирований двумя станциями Феникс MTU-5D в одном пункте наблюдения. Электрические диполи измерительных установок были установлены параллельно друг другу со смещением 1,5 метра, синхронизация зондирований осуществлялась по GPS-часам. Среднее квадратичное отклонение от среднего вариаций кажущегося сопротивления для азимутов – 0–180° составляло не более 1 Ом•м (0,5 %) для периодов в интервале 0,1–2,5 с и до 4 Ом•м (2 %) на периодах до 100 с [8].

Таким образом, сопоставление аномального поведения электромагнитных параметров с сейсмическим режимом БГП позволило выявить особенности аномальных изменений кажущегося электрического сопротивления и дополнительных импедансов, а также векторов Визе в зависимости от локализации гипоцентров близких землетрясений. В результате анализа гравитационных приливных воздействий и магнитотеллурических параметров установлено, что характер взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования и отражается в распределении устойчивых кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выявлено, что ориентация основных тектонических нарушений (вблизи пункта зондирования) соответствует положению кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения.

Представленные исследования осуществляются в рамках выполнения Государственного задания ФГБУН ИС РАН в г. Бишкеке на 2015–2017 гг. (Тема 70.1).

#### Литература

1. Бердичевский М.Н. и др. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М.: Научный мир, 2009. 668 с.
2. Неполяризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки / Л.Н. Лосихин, Е.К. Матюков, В.А. Пазников, П.П. Петров, Г.Н. Тимонин. Патент на полезную модель RU 123979 U1, опубликовано 10.01.13 г.
3. Рыбин А.К. и др. Глубинные электромагнитные исследования в Тянь-Шане – достигнутые возможности и перспективы для проведения мониторинговых магнитотеллурических наблюдений / А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Г.Г. Щелочков, Е.А. Баталева, И.В. Сафронов // В сб.: Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. Алматы: Эверо, 2003. С. 284–291.
4. Рыбин А.К. и др. О магнитотеллурическом мониторинге на Бишкекском геодинамическом полигоне / А.К. Рыбин, И.В. Сафронов, Г.Г. Щелочков, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, Л. Фокс, А. Ингеров // Матер. межд. конф. “Проблемы сейсмологии III тысячелетия”, Новосибирск, 15–19 сент. 2003 г. Новосибирск, 2003. С. 249–254.
5. Рыбин А.К. и др. Электромагнитный мониторинг в Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенной зоне / А.К. Рыбин, В.Д. Брагин, Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков // В сб.: Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии / отв. ред. Е.В. Скляр. Иркутск, 2007. С. 125–130.
6. Рыбин А.К. и др. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, В.В. Спичак, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 445–460.
7. Рыбин А.К. и др. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков // Вестник КРСУ. 2011. Том 11. № 4. С. 29–40.
8. Баталева Е.А. и др. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Физика Земли. 2013. № 3. С. 105–113.
9. Баталева Е.А. и др. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 53–64.
10. Баталева Е.А. и др. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 3–7.
11. Баталева Е.А. и др. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 8–12.
12. Баталева Е.А. и др. Опыт построения трехмерной геоэлектрической модели района Курайско-Чуйской системы впадин горного Алтая по данным электромагнитных зондирований / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Г.Г. Щелочков, И.В. Сафронов // Вестник КРСУ. 2006. Т. 6. № 3. С. 104–112.
13. Баталева Е.А. и др. Аномалии электропроводности зоны Таласо-Ферганского разлома и геодинамика



- динамическая интерпретация глубинной структуры юго-западного Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, М.М. Буслов, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, И.В. Сафронов // Геология и геофизика. 2006. № 9. С. 1036–1042.
14. Баталева Е.А. и др. О возможности использования магнитотеллурического зондирования для исследования тектонических нарушений в массивах горных пород / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, И.В. Сафронов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 3. С. 38–45.