УДК 550.372+551.2

ВАРИАЦИИ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КАК ИНДИКАТОР НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

© 2014 г. Е.А. Баталёва, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталёв

Научная станция РАН в Бишкеке, г. Бишкек, Киргизия

Представлены результаты магнитотеллурического мониторинга (МТ мониторинга), проводимого Научной станцией РАН в Бишкеке. Исследованы вариации кажущегося электрического сопротивления (ρ_{κ}) на предмет изучения взаимосвязи с лунно-солнечными приливными воздействиями. Обнаружены характерные изменения исследуемых параметров, которые могут быть объяснены перераспределением флюидов между системами трещин. Показана приуроченность сейсмических событий к зонам с высокими градиентами исследуемых вариаций. При анализе частотно-временных рядов данных МТ мониторинга выявлена связь между изменениями ρ_{κ} и местоположением (азимутальным углом) групп эпицентров землетрясений, произошедших в рассматриваемые интервалы времени.

Ключевые слова: кажущееся электрическое сопротивление, электромагнитное поле, лунносолнечные приливы, напряженно-деформированное состояние среды, сейсмический режим.

Введение

В последнее десятилетие Научной станцией РАН в Бишкеке активно ведется разработка новых, ориентированных на краткосрочный прогноз землетрясений методов геофизического мониторинга электромагнитных характеристик геологической среды, связанных с ее напряженно-деформированным состоянием. На специально оборудованных стационарных пунктах Бишкекского геодинамического полигона (БГП) с 1983 г. по настоящее время выполняются режимные электромагнитные наблюдения с использованием метода зондирования становлением в дальней зоне (ЗСД). Одним из наиболее важных результатов проводимых исследований является разработка нового метода контроля напряженно-деформированного состояния земной коры, основанного на изучении вариаций электрического сопротивления слагающих её горизонтов [*Bragin, Schelochkov, Zeigarnik,* 2005; *Брагин, Голяницкий,* 2008; *Брагин, Мухамадеева,* 2009]. Предложена простая модель, поясняющая возникновение во времени азимутальных изменений электрического сопротивления, согласно которой большая и малая оси эллипса исследуемых вариаций соответствуют направлениям растяжения и сжатия [*Брагин, Мухамадеева,* 2009].

После появления измерительной магнитотеллурической аппаратуры нового поколения *Phoenix MTU-5* для проведения долговременных непрерывных магнитотеллурических измерений были выбраны два пункта стационарных наблюдений МТ мониторинга – Ак-Суу и Чонкурчак (рис. 1). Долговременные наблюдения преследовали несколько целей: повышение эффективности существующего мониторинга; увеличение глубинности исследований; обеспечение возможности наблюдений за напряженнодеформированным состоянием среды по различным азимутам (опосредованно через вариации электропроводности).



Рис. 1. Схема расположения стационарных пунктов МТ мониторинга и пунктов глубинных магнитотеллурических зондирований (ГМТЗ), выполненных на территории Центрального Тянь-Шаня в 2011 г.

1 – пункты стационарных наблюдений МТ мониторинга; 2 – пункты ГМТЗ; 3 – местоположение Камбаратинского промышленного взрыва 22.12.2009 г. (пункт Камбарата); 4 – эпицентры сейсмических событий, произошедших за время регистрации ГМТЗ; 5 – региональные разломы; 6 – граница Киргизстана

В настоящей работе анализируются вариации магнитотеллурических параметров (МТ параметров), которые могут быть индикаторами современной тектонической активности и отражать геодинамические процессы, вызывающие изменение напряженнодеформированного состояния среды.

Ярким примером эффективности МТ мониторинга является его использование при проведении 22.12.2009 г. Камбаратинского промышленного взрыва. Полученные при этом результаты подтвердили взаимосвязь изменений напряженно-деформированного состояния блоков земной коры и вариаций электропроводности в соответствии с принятой концепцией перераспределения флюида в порово-трещинном пространстве горных пород, обусловленного происходящими деформациями [Жамалетдинов и др., 2000; Busby, 2000; Bogomolov et al., 2007].

Обсуждение результатов

Камбаратинский эксперимент включал в себя сейсмологические, электромагнитные и *GPS* наблюдения, выполненные силами Научной станции РАН в Бишкеке. Мощность промышленного взрыва составила 2.8 кт в тротиловом эквиваленте; расстояние от пункта взрыва до магнитотеллурической станции *Phoenix MTU-5* – 5.7 км. Полученные сейсмические данные позволили выявить обусловленные взрывом подвижки по разлому, прилегающему к пункту взрыва. Кроме того, на расстоянии около 16 км от пункта взрыва через 12 с была прослежена серия слабых наведенных сейсмических событий, с которыми в основном и связываются произошедшие деформации (тектоническая разгрузка).

Для анализа магнитотеллурических данных (МТ данных) использовались методика азимутального мониторинга и программные средства, применяемые в настоящий момент в Научной станции РАН при проведении мониторинговых наблюдений. Это позволило установить направления максимальных и минимальных изменений ρ_{κ} , предположительно соответствующих осям сжатия и растяжения [*Баталева, Баталев, Рыбин,* 2011, 2013]. Результаты обработки МТ данных Камбаратинского эксперимента представлены на рис. 2.



Рис. 2. Камбаратинский эксперимент 22.12.2009 г. Частотно-временные ряды вариаций ρ_{κ} в двух направлениях – субмеридиональном *xy* (*a*) и субширотном (*yx*) (*б*); *в*, *г* – погрешности ρ_{κ} , рассчитанные для тех же направлений с использованием программы *SSMT* 2000 для обработки данных МТЗ. Стрелкой отмечен момент взрыва и наведенных землетрясений; на горизонтальных осях: отрицательные значения – время до момента взрыва, положительные – после него

Можно видеть, что после взрыва практически во всех временных интервалах зондирования отмечается увеличение ρ_{κ} в субмеридиональном направлении (рис. 2, *a*) и уменьшение в субширотном (б). С учетом того, что основные тектонические структуры в районе проведения Камбаратинского взрыва ориентированы в субширотном направлении, наблюдаемые изменения могут свидетельствовать о субмеридиональной тектонической разрядке.

Отдельно остановимся на вопросе достоверности определения вариаций ρ_{κ} . Погрешности определения значений исследуемого параметра (рис. 2, *в*, *г*) практически для всего частотного диапазона обработки и временного интервала наблюдений не превышают 2–4%, что свидетельствует о надежности оценок выявленных вариаций ρ_{κ} .

Отметим, что и ранее при выполнении МТ исследований в Тяньшанском регионе, осуществляемых силами Научной станции, особое внимание уделялось оценке точности определения магнитотеллурических передаточных функций. Так, в процессе площадного МТ профилирования на территории БГП в сейсмоактивной зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины был проведен контрольный эксперимент для оценки качества массива полевых МТ данных [*Рыбин и др.*, 2008]. Тогда в контрольном пункте были выполнены синхронные измерения вариаций МТ поля с помощью трех станций *Phoenix MTU-5* при минимальном пространственном смещении их измерительных установок друг относительно друга (для электрических диполей смещение составляло – 1 м, для магнитных датчиков – 3 м). Случайные индивидуальные погрешности определения ρ_{κ} для каждой станции составили в среднем не более 1–2% по модулю и 0.5–0.8° по фазе. Расхождения между полученными в контрольной точке с использованием трех станций кривыми не превысили 3–4% по ρ_{κ} и 0.6–0.8° по фазам импеданса.

С 2010 г. на территории БГП на пункте Алмалы проводятся специальные работы, направленные на изучение азимутальных вариаций электропроводности; на пунктах Ак-Суу и Чонкурчак выполняется стандартный МТ мониторинг (положение пунктов см. на рис. 1). По результатам этих работ на пункте Алмалы в интервале периодов ~0.1—~2.5 с, соответствующих диапазону эффективных глубин от ~1.5 до ~5.0 км, прослежены изменения ρ_{κ} , аналогичные зафиксированным в ходе Камбаратинского эксперимента. В рассматриваемом диапазоне периодов и в пункте Алмалы, и в пункте МТ наблюдений, расположенном вблизи места проведения Камбаратинского взрыва (пункт Камбарата), отмечены вариации электрического сопротивления по ортогональным направлениям в "противофазе" [Баталева, Баталев, Рыбин, 2011]. Это подтверждает гипотезу о перераспределении флюидов по системам трещин в связи с изменением напряженно-деформированного состояния среды [Жамалетдинов и др., 2000; Bogomolov et al, 2007; Busby, 2000].

Анализ частотно-временных рядов МТ мониторинга в пункте Алмалы и в значительном числе пунктов ГМТЗ (при обработке данных ГМТЗ по методике азимутального мониторинга) выявил на региональных профилях изменения электропроводности в двух устойчивых интервалах периодов – 0.25–1.0 с и ~5–~10 с. Второй из этих интервалов более глубинный – так, для пункта Алмалы ему соответствует диапазон эффективных глубин от ~6 до ~9 км. Азимуты, по которым наблюдаются максимальные вариации электропроводности, для верхнего и нижнего диапазонов эффективных глубин зондирования для пункта наблюдения Алмалы отличаются друг от друга на 30°–75°.

По результатам полевых работ 2011 г. для 34 пунктов ГМТЗ (см. рис. 1) был выполнен анализ вариаций ρ_к, определенных по методике азимутального мониторинга. Целью анализа была оценка корреляции вариаций ρ_к с компонентами лунно-солнечных воздействий для выявления индикаторных точек. Индикаторными считаются точки, которые наиболее чувствительны к деформациям геосреды и отчетливо отражают взаимосвязь современных природных и техногенных геодинамических процессов с вариациями ρ_к.

Эксперименты по выбору индикаторных точек с использованием оценки корреляции вариаций ρ_{κ} с лунно-солнечными воздействиями представляют собой достаточно сложную задачу в связи с тем, что исследуемую корреляцию нарушают деформационные воздействия, обусловленные тектоническими подвижками от дальних землетрясений на фоне общего деформационного процесса, а также поля тектонических деформаций готовящихся в регионе сейсмических событий.

В таком сейсмически активном регионе как Тянь-Шань необходимое количество информации может быть получено при анализе данных мониторинга электромагнитных параметров с учетом выявления причин их пространственно-временной изменчивости и приуроченности к геологическим структурам. Сеть пунктов ГМТЗ заложена на большой территории в разных геоэлектрических условиях, что увеличило вероятность обнаружения индикаторных точек. Как уже отмечалось, авторами были проанализированы данные 34 пункта ГМТЗ на пяти профилях для оценки взаимосвязи вариаций кажущегося сопротивления с приливными воздействиями и сейсмическими событиями, произошедшими за период с 21.07.11 г. по 23.09.11 г. на территории Киргизского Тянь-Шаня. Записи на пунктах наблюдения производились в течение ~72 ч, что позволяет обрабатывать

получаемые данные с использованием методики азимутального мониторинга. Для всех пунктов ГМТЗ были рассчитаны оценки коэффициентов корреляции вариаций модуля кажущегося сопротивления и фаз импеданса с лунно-солнечными приливными воздействиями (рис. 3). Гравитационные воздействия рассчитаны в мкГл с помощью программы *Tide.exe* в виде компонент Av – север-юг; Au – запад-восток; An – вертикальная компонента; g – горизонтальная компонента; A – модуль полного вектора.

Теоретические расчеты были подтверждены экспериментальными наблюдениями для территории БГП [Антонов, Воронцова, 2012].



Рис. 3. Распределение значений коэффициентов корреляции данных МТ мониторинга с компонентами лунно-солнечных приливных воздействий. Интервал периодов МТ зондирований T=0.01-100 с; тензор импеданса пересчитан на азимуты от 0° до 180°; $d\rho$ и $d\phi$ – вариации кажущегося сопротивления и фазы импеданса для пунктов 916 и 917 (см. рис. 1). Обозначения компонент приливных воздействий: Av – север-юг; Au – запад-восток; An – вертикальная компонента; g – горизонтальная компонента; A – модуль полного вектора

На рис. 3 видно, что хотя коэффициенты корреляции и могут быть >0.8, в среднем они лежат в интервале 0.2–0.4. Это свидетельствует о том, что кроме периодических приливных воздействий источниками деформационных процессов являются и источники другой природы. Диаграммы корреляции вариаций сопротивления и вариаций фазы для соответствующих компонент лунно-солнечных приливов сходны между собой, т.е. уровень точности вариаций кажущегося сопротивления и фазы импеданса позволяет одинаково отображать один и тот же входной сигнал.

При сопоставлении компоненты Av с вариациями ρ_{κ} в пунктах ГМТЗ 833 и 835, расположенных в Тогуз-Тороузской впадине на расстоянии около 15 км друг от друга в пределах единого тектонического блока, оказалось, что при практически идентичных приливных воздействиях наблюдается значительное сходство частотно-временных рядов вариаций электросопротивления (рис. 4).



Рис. 4. Сопоставление горизонтальной компоненты приливных воздействий *Av* (север-юг) с вариациями кажущегося сопротивления в пунктах наблюдения ГМТЗ 833 (*слева*) и 835 (*справа*)

Таким образом, одно и то же приливное воздействие, оказываемое на находящиеся в одинаковых тектонических обстановках близкорасположенные пункты наблюдения, вызывает сходные отклики в результатах азимутального мониторинга, что, по сути, является "контролем точности" используемой процедуры и подтверждает корректность применяемой модели.

В качестве примера на рис. 5 представлены частотно-временные ряды данных МТ мониторинга станции Ак-Суу за 01.04.–30.06.2007 г., построенные с использованием методики азимутального мониторинга. При обработке МТ данных этого пункта выявлено, что вариации кажущегося сопротивления (рис. 5, *a*) гораздо менее гладкие и устойчивые по сравнению с вариациями фазы импеданса (рис. 5, *б*), что, возможно, связано с отсутствием эффектов статического смещения для фазовых кривых.



Рис. 5. Станция Ак-Суу. Частотно-временные ряды азимутального МТ мониторинга $\rho_{\kappa}(a)$ и фазы импеданса $\varphi(\delta)$ за апрель–июнь 2007 г. в сопоставлении с сейсмичностью за тот же период (*в*) на территории в радиусе до 100 км (кружки) и более 100 км (ромбы) от станции. Внизу на вертикальной оси – класс рассматриваемых сейсмических событий (*K*)

На рис. 5, *в* приведены данные по сейсмичности за тот же период времени. Рассмотрим в сопоставлении с ними поведение временных рядов фазы импеданса φ .

Набор исходных данных станции Ак-Суу включает записи МТ поля за 91 день; длительность каждой записи – 16 ч (остальные восемь часов суточной реализации не рассматриваются из-за влияния на регистрируемое поле искусственных электромагнитных импульсов, генерируемых мощной электроимпульсной установкой ЭРГУ-600). Моменты близких (до 100 км) землетрясений отмечены на рис. 5 вертикальными линиями.

Обращает на себя внимание факт приуроченности сейсмических событий к участкам частотно-временных рядов с высокими градиентами фазы импеданса, т.е. интервалам времени, когда, согласно концепции перераспределения флюидов, происходит значительное изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в верхней части земной коры. В большинстве случаев резкие изменения напряженно-деформированного состояния происходят незадолго до сейсмических событий или сразу же после него. Однако и низкоградиентные деформации, сопутствующие накоплению упругой энергии землетрясений, отражаются в результатах азимутального МТ мониторинга.

Процесс резкого изменения напряженно-деформированного состояния наблюдался в Камбаратинском эксперименте при тектонической разгрузке после реализации наведенных взрывом сейсмических событий. При этом происходило перераспределение флюида между системами трещин, вызвавшее возрастание и убывание электропроводности по ортогональным направлениям [Баталева, Баталев, Рыбин, 2011]. Очевидно, что и медленное перераспределение флюидов между системами трещин и пор, происходящее при подготовке сейсмических событий, будет фиксироваться в вариациях электропроводности на пунктах МТ мониторинга в случае достаточно длинных частотно-временных рядов и корректного выбора средних значений, относительно которых вычисляются вариации.

При анализе взаимосвязи частотно-временных рядов по данным станции Ак-Суу и сейсмических событий была обнаружена группа землетрясений, эпицентры которых находятся в азимутальном направлении ~57° к восток–северо-востоку от станции (хребет Кендыктас и прилегающая часть Чуйской впадины). Эта группа сейсмических событий проявляется в вариациях кажущегося сопротивления в виде интенсивных аномалий на частотно-временных рядах по азимутам 160°–180°.

Как нам представляется, изменение напряженно-деформированного состояния среды в пункте МТ мониторинга может быть диагностировано по изменениям электропроводности, которые вызваны перераспределением поровых жидкостей между системами трещин [Брагин, Мухамадеева, 2009]. Однако пункт МТ мониторинга может быть по-разному расположен (рис. 6) как относительно направления региональных напряжений, так и относительно конфигурации поля тектонических деформаций будущего сейсмического события. В связи с этим, задачу МТ мониторинга сейсмического режима планируется решать, объединения землетрясения со сходными механизмами очага в локальные группы, чтобы воздействие на пункт МТ мониторинга было одинаковым и можно было набрать достаточную статистику при малом числе регистрирующих станций и достаточно большом количестве землетрясений в регионе.



Рис. 6. Упрощенная схема распределения тектонических деформаций относительно пункта МТ мониторинга в зоне подготовки землетрясения

Выводы

При анализе частотно-временных рядов МТ мониторинга в пунктах Ак-Суу и Камбарата обращает на себя внимание факт приуроченности сейсмических событий к

участкам с высокими градиентами вариаций ρ_{κ} и фазы импеданса, т.е. к интервалам времени, когда, согласно концепции перераспределения флюидов, происходит существенное изменение напряженно–деформированного состояния массивов горных пород.

По результатам анализа временных рядов ρ_{κ} выявлены наиболее "активные" точки, в которых планируется проведение дальнейших мониторинговых исследований для уточнения физической природы механизмов взаимосвязи вариаций ρ_{κ} с напряженнодеформированным состоянием участков земной коры, что необходимо для изучения геодинамических процессов, происходящих в сейсмоактивных зонах.

Проведенные исследования позволили получить новые данные о возникновении вариаций ρ_{κ} при изменении напряженно-деформированного состояния среды. Полевыми экспериментами подтверждена концепция взаимосвязи между напряженно-деформированным состоянием среды и изменением ρ_{κ} .

Анализ взаимосвязи вариаций ρ_{κ} и происходящих сейсмических событий показал, что в регистрируемых временных рядах могут быть выделены характерные признаки изменений напряженно-деформированного состояния среды, обусловленных сейсмическими событиями.

Результаты МТ мониторинга, проводимого на территории Тянь-Шаня, вселяют уверенность в том, что при дальнейшем развитии сети наблюдений, совершенствовании методики обработки и анализа временных рядов геофизических параметров проблема взаимосвязи возникновения землетрясений и пространственно-временных вариаций электромагнитных характеристик геологической среды может быть успешно решена.

Представленные исследования проводятся при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8670) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-90112).

Литература

- Антонов Ю.В., Воронцова Е.В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести // Современные проблемы геодинамики и внутриконтинентальных орогенов: Сб. материалов Пятого международного симпозиума 19–24 июня 2011 г. Москва; Бишкек, 2012. С.200–207.
- Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности (по результатам магнитотеллурических исследований) // Современное состояние наук о Земле: Материалы международной конференции, посвященной памяти В.И. Хаина. М.: Изд-во МГУ, 2011. С.193–198.
- Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. 2013. № 3. С.105–113.
- Брагин В.Д., Голяницкий И.А. К проблемам отражений электромагнитных волн от многослойных сред // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2008. Т. 8, № 10. С.27–33.
- Брагин В.Д., Мухамадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона электромагнитного метода // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Сб. материалов Четвертого международного симпозиума 15–20 июня 2008 г. Москва; Бишкек, 2009. С.74–84.
- Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // Докл. РАН. 2000. Т. 37, № 2. С.235–239.

- 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.
- 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. V. 431. P.143–151.
- Bragin V.D., Schelochkov G.G., Zeigarnik V.A. Study of the Earth's Crust Deformation Distribution at the Territory of Bishkek Prognostic Proving Ground by Electromagnetic Methods World Conference on Disaster Reduction, 18-22 January 2005, Kobe, Hyogo. Japan. www.unisdr.org/wcdr
- *Busby J.P.* The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations // Geophysical Prospecting. 2000. V. 48. P.677–695.

Сведения об авторах

БАТАЛЁВА Елена Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, ученый секретарь, Научная станция РАН в Бишкеке. 720049, Бишкек-49. Тел.: 10(996)(312)61-31-40. Е-mail: bataleva@gdirc.ru

РЫБИН Анатолий Кузьмич – доктор физико-математических наук, директор, Научная станция РАН в Бишкеке. 720049, Бишкек-49. Тел.: 10(996)(312)61-31-40. Е-mail: rybin@gdirc.ru

БАТАЛЁВ Владислав Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Научная станция РАН в Бишкеке. 720049, Бишкек-49. Тел.: 10(996)(312)61-31-40. Е-mail: batalev@gdirc.ru

VARIATIONS OF ROCKS APPARENT RESISTIVITY AS AN INDICATOR OF STRESS-DEFORMED STATE OF THE MEDIUM

E.A. Bataleva, A.K. Rybin, V.Y. Batalev

Research Station RAS in Bishkek, Bishkek City, Kyrgyz Republic

Abstract. This paper presents the results of magnetotelluric monitoring carried out by the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek. Variations of apparent electrical resistance are studied with respect to interconnection with lunisolar tidal influence. Characteristic changes in parameters studied are found and can be explained by redistribution of fluids through the system of cracks. It is shown that seismic events are related to the zones of high gradients of variations studied. The analysis of time-and-frequency series of magnetotelluric monitoring data revealed regularities in apparent resistivity changes and location (azimuths) of earthquake epicenters in the time intervals considered.

Keywords: apparent electrical resistance, electromagnetic field, lunisolar tides, stressed and deformed state of medium, seismic mode.