

УДК 550.837

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ АНАЛИЗА ДАННЫХ
АЗИМУТАЛЬНОГО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ЧАСТЬ 1. АНАЛИЗ ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев

Предложен новый подход к количественной интерпретации результатов электромагнитного мониторинга. На основе анализа вариаций кажущегося электросопротивления, полученных при исследовании Камбаратинского промышленного взрыва, разработана методика азимутального мониторинга электромагнитных данных.

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле; мониторинг; анизотропия; кажущееся электрическое сопротивление; напряженно-деформированное состояние среды.

DEVELOPMENT OF PROGRAMS TO ANALYZE THE DATA
ON AZIMUTHAL MAGNETOTELLURIC MONITORING
PART 1. ANALYSIS OF MAGNETOTELLURIC MONITORING DATA

E.A. Bataleva, V.Yu. Batalev

We propose a new approach to quantitative interpretation of results of electromagnetic monitoring. On the base of analysis of variations of apparent electrical resistance received during studies of Kambarata industrial explosion we developed methods of azimuthal monitoring of electromagnetic data.

Key words: natural electromagnetic field; monitoring; anisotropy; apparent electrical resistance; stressed and deformed state of medium.

Для определения взаимосвязи параметров электрических свойств и напряженно-деформированного состояния среды необходимо уметь находить и отслеживать соответствующие признаки. С этой целью Научная станция РАН проводит электромагнитный мониторинг среды различными методами. Одним из таких методов является метод магнитотеллурического (МТ) мониторинга, возможности которого до недавнего времени были ограничены точностью аппаратуры (станций) магнитотеллурического зондирования. Начиная с 2003 г. – момента, когда Научная станция РАН была обеспечена современной высокоточной аппаратурой, проводится непрерывный МТ-мониторинг с помощью станций Phoenix MTU 5. В последние годы Научной станцией РАН выполнен значительный объем экспериментальных магнитотеллурических исследований, ориентированных на мониторинг геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах [1–3]. Их результаты подтверждают факт взаимос-

вязи вариаций электрического сопротивления с напряженно-деформированным состоянием участков земной коры и убедительно демонстрируют информативность МТ-данных для оценки изменений напряженного состояния среды.

Существует два принципиально различных физических обоснования для электромагнитного мониторинга (среды) геодинамических процессов. Первое – изменение электрических свойств под воздействием тектонических процессов, второе – механоэлектрические преобразования при таких процессах и проявление связанных с ними электромагнитных полей. Изменение напряженно-деформированного состояния земной коры сопровождается изменением электрических параметров среды, что вызывает пространно-временные вариации кажущегося сопротивления. Механизм образования вариаций электропроводности может быть объяснен как изменениями трещиноватости или пористости пород, особенностями их структуры

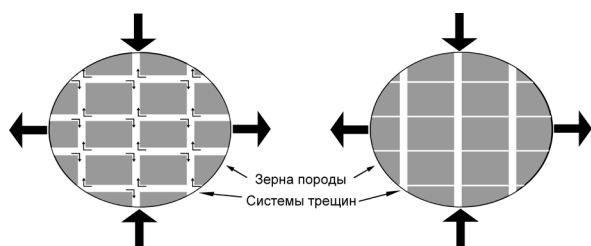


Рисунок 1 – Схема перераспределения флюида между системами трещин в массивах горных пород, вызывающая увеличение электропроводности вдоль оси сжатия и уменьшение электропроводности по ортогональному направлению [10]

или текстуры, наличием флюидов, минерализацией водных растворов, изменением температуры и давления, то есть тех факторов, которые оказывают влияние на изменение электрических свойств пород (эффекты первого рода), так и различными по своей природе процессами – такими как пьезоэлектрический эффект, тектономагнитный эффект, электризация горных пород при их разрушении и др., вызывающими изменения амплитудно-частотных характеристик естественных электромагнитных полей (эффекты второго рода). В то же время существует зависимость вариаций кажущегося сопротивления сред от азимута – анизотропия электрических свойств горных пород [4–8].

В предлагаемой работе решается задача определения взаимосвязи напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры с анизотропией вариаций электропроводности на основе данных магнитотеллурического (МТ) мониторинга и дается оценка применимости концепции [6, 9, 10] перераспределения флюида в порово-трещинном пространстве горных пород, обусловленного происходящими там деформациями (рисунок 1).

Чувствительность и точность МТ-мониторинга применительно к поставленной задаче оценивалась по отклику вариаций электропроводности на упругие деформации земной коры от лунно-солнечных приливных воздействий. Экспериментальная часть этих работ обеспечена трехсуточными измерениями МТ-поля станциями Phoenix MTU-5, выполненными во время глубинных МТ-зондирований (ГМТЗ), по нескольким региональным профилям через территорию Киргизского Тянь-Шаня и долговременными непрерывными измерениями МТ-поля в двух стационарных пунктах наблюдения (рисунок 2).

Сеть пунктов ГМТЗ закладывалась в различных геоэлектрических условиях на большой территории, что увеличило вероятность обнаружения индикаторных точек, в которых связь напряженно-

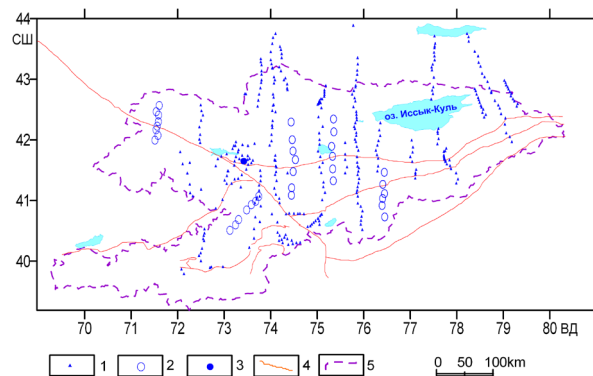


Рисунок 2 – Схема геоэлектрической изученности Киргизского Тянь-Шаня методом МТЗ: 1 – пункты МТЗ; 2 – пункты глубинного МТЗ, выполненные в 2011 г., обрабатываемые по методике МТ-мониторинга и используемые для поиска индикаторных точек; 3 – Камбаратинский промышленный взрыв; 4 – крупные разломы; 5 – граница Кыргызстана

деформированного состояния верхней части земной коры с вариациями электропроводности проявляется наиболее ярко. На выявленных индикаторных точках планируется дальнейшее проведение мониторинговых исследований с целью определения природы физических механизмов взаимосвязи вариаций кажущегося электрического сопротивления с напряженно-деформированным состоянием участка земной коры для изучения геодинамических процессов, происходящих в сейсмоактивных зонах.

Описание методики анализа данных азимутального МТ-мониторинга. Основной задачей электромагнитного мониторинга является выделение динамических (изменяющихся) параметров электрических свойств среды, в связи с чем возникает необходимость измерения и анализа достаточно малых пространственно-временных вариаций электропроводности. При этом, во-первых, из полученных сигналов нужно выделить информативную часть, несущую в себе именно те изменения электропроводности, которые вызваны напряженно-деформированным состоянием среды. Во-вторых, постараться определить, чем были вызваны изменения электрических свойств и какой вклад вносят – лунно-солнечные приливы, изменение влагонасыщенности среды, изменение системы трещин и т. д. Традиционная методика интерпретации данных МТ-мониторинга не позволяет в полной мере использовать его возможности, что сдерживает эффективное применение этого метода для решения поставленной задачи. В настоящей работе предлагается использовать способы

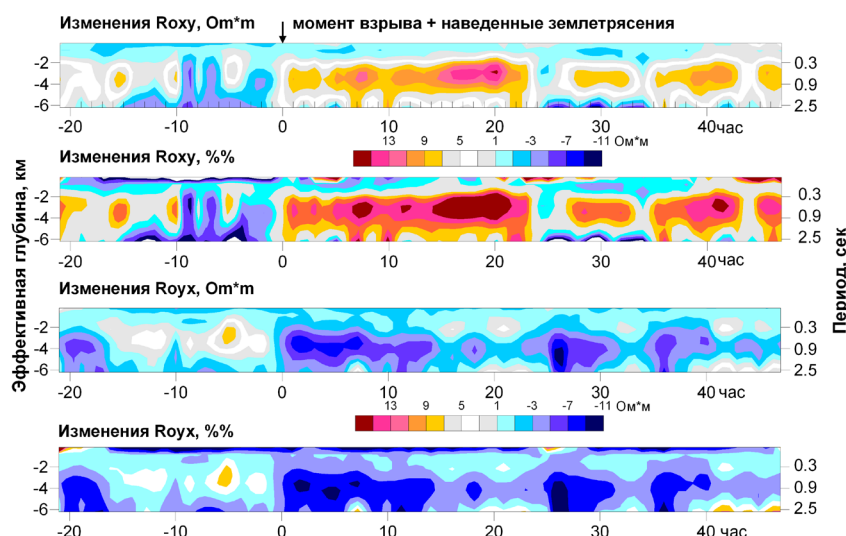


Рисунок 3 – Результаты магнитотеллурического мониторинга в районе Камбаратинского промышленного взрыва (район Токтогульского водохранилища, 22 декабря 2009 г., мощность взрыва 2,8 кт). Изменения кажущегося сопротивления Ro_{xy} и Ro_{yx} – отклонение от среднего значения, вычисленного для каждого периода зондирования до момента взрыва

и подходы определения ориентационных характеристик вариаций кажущегося электросопротивления, апробированные на примере Камбаратинского промышленного взрыва (рисунок 3), где нами исследовалась реальность существования реакции земной коры в виде вариаций электросопротивления на изменение тектонических напряжений [11, 12].

Результаты магнитотеллурического мониторинга в районе Камбаратинского промышленного взрыва подтверждают факт связи вариаций электросопротивления с разрядкой тектонических напряжений, произошедшей после двух наведенных Камбаратинским взрывом (через 15 с после взрыва) землетрясений на расстоянии 16 км от пункта взрыва. При изменении напряженно-деформированного состояния среды наблюдалось увеличение электросопротивления Ro_{xy} (азимут 0°) и уменьшение электросопротивления Ro_{yx} по азимуту 90° в интервале периодов 0,2–1,2 с для эффективных глубин 2–5 км.

Для того чтобы оценить и исследовать характеристики вариаций электрического сопротивления нами использовались следующие процедуры: 1) вычисление вариаций кажущегося сопротивления и фазы импеданса по 12-ти азимутам, в интервале периодов от 0,01 до 10 с (длительность временных рядов на пункте наблюдения должна составлять не менее 70 часов); 2) расчет корреляции вариаций сопротивления и фазы импеданса с компонентами лунно-солнечных приливов в зависимости от периода зондирования и ази-

мута; 3) сопоставление приливных воздействий с псевдорезами вариаций электросопротивления с целью анализа отклика вариаций электропроводности на упругие деформации земной коры от лунно-солнечных приливных воздействий (рисунок 4).

Для определения зависимости вариаций электропроводности от направления предлагается вычислять значения тензора импеданса и соответствующие вариации по произвольным азимутам [13, 14]:

$$Z_{xy}(\alpha) = Z_{xy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$Z_{yx}(\alpha) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha$$

где Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} – компоненты тензора импеданса $[Z]$ в направлении, соответствующем их первому индексу. Ориентация компонент импеданса соответствует ориентации компонент электрического поля; α – угол поворота осей по часовой стрелке.

В результате обработки экспериментальных данных МТ-мониторинга, полученных Научной станцией РАН в 2011 г., было обнаружено большое количество фактов существования вариаций электропроводности с противоположными знаками на ортогональных азимутах, что, с нашей точки зрения, подтверждает гипотезу о перераспределении флюида в поровом пространстве при изменении напряженно-деформированного состояния среды. Ортогональные направления, по которым наблюдается одновременное увеличение и уменьшение электропроводности, согласно [6, 9, 10], могут

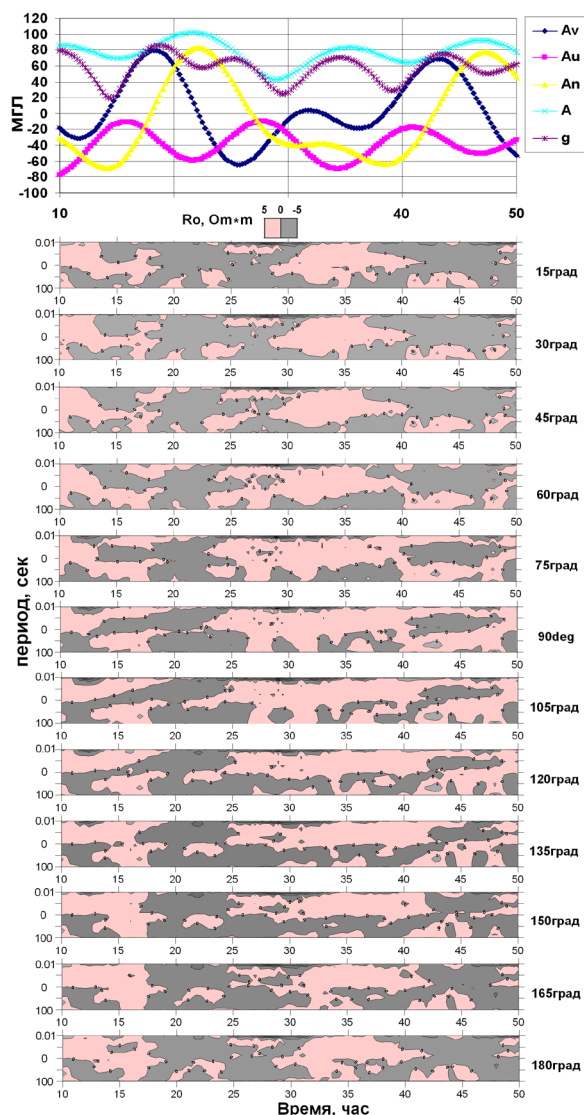


Рисунок 4 – Сопоставление приливных воздействий (верхняя панель) с псевдоразрезами вариаций электросопротивления в пункте МТЗ 833 (западное замыкание Нарынской впадины, в качестве примера) по азимутам от 15 до 180 градусов. Av-северная, Au-восточная, An-вертикальная, A-полный вектор, g – горизонтальная компоненты приливных воздействий

быть идентифицированы как направления сжатия и растяжения, соответственно.

Таким образом, на основании анализа временных рядов модуля и фазы кажущегося сопротивления в сопоставлении с приливными воздействиями, проведенного для 34-х пунктов наблюдения на территории Киргизского Тянь-Шаня, были выделены 2 индикаторных пункта наблюдения,

а также временные интервалы, внутри которых вариации электропроводности на ортогональных азимутах характеризуются противоположными знаками.

Представленные исследования осуществляются при частичной поддержке РФФИ, грант 14-05-00175-а и грант 13-05-12094-офи-м.

Литература

1. Рыбин А.К. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивной Северо-Тянь-Шаньской зоне / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Д. Брагин, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. 2008. №5. С. 269–272.
2. Матюков В.Е. Применение нейросетевого подхода для анализа корреляции магнитотеллурических параметров с сейсмической активностью региона Северного Тянь-Шаня / В.Е. Матюков, В.В. Спичак, А.К. Рыбин, И.В. Попова, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева // Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии: тез. 7-го казахско-китайского межд. симп. Алматы, 2010. С. 47.
3. Рыбин А.К. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков // Вестник КPCY. 2011. Том 11. № 4. С. 29–40.
4. Шевнин В.А. Электроразведка методом сопротивлений / В.А. Шевнин, С.А. Акуленко, С.А. Берзина, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, А.А. Горбуненко, И.Д. Игнатова, А.В. Любчикова, М.Н. Марченко, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, А.А. Рыжов, М.М. Симоне, Т.Ю. Смирнова, А.Г. Яковлев; под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М.: Изд-во МГУ, 1994. 160 с.
5. Shevnin V.A. Separation of anisotropy and inhomogeneity influence by azimuthal resistivity diagrams' analysis / V.A. Shevnin, D.K. Bolshakov, I.N. Modin, E.V. Pervago // International Symposium IEEGS in Chengdu, China, October 25–30, 1997. P. 239–245.
6. Bogomolov L. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan Territory / L. Bogomolov, V. Bragin, A. Fridman, V. Makarov, G. Sobolev, E. Polyachenko, G. Schelochkov, V. Zeigarnik, A. Zubovich // Tectonophysics. 2007. Vol. 431. P. 143–151.
7. Брагин В.Д. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона электромагнитными методами / В.Д. Брагин, В.А. Мухаммадеева // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозоологические

- проблемы: матер. IV межд. симп. 15–20 июня 2008 г. Бишкек–Москва, 2009. С. 74–84.
8. *Баталева Е.А.* Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности (по результатам магнитотеллурических исследований) / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Современное состояние наук о Земле: матер. межд. конф., посв. памяти В.И. Хаина. М.: Изд-во МГУ, 2011. С. 193–198.
 9. *Busby J.P.* The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations / J.P. Busby // *Geophysical Prospecting*. 2000. Vol. 48. P. 677–695.
 10. *Жамалетдинов А.А.* Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры / А.А. Жамалетдинов, Ф.П. Митрофанов, А.Д. Токарев, А.Н. Шевцов // *ДАН*. 2000. Т. 37. № 2. С. 235–239.
 11. *Баталева Е.А.* Проблемы геоэлектромагнитного мониторинга Северного Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин, В.Е. Матюков // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: материалы двенадцатой международной конференции. г. Москва, 3–8 окт. 2011 г. М., 2011. С. 43–46.
 12. *Баталева Е.А.* Связь вариаций электропроводности с напряженно-деформационным состоянием среды по данным магнитотеллурического мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: тез. докл. V межд. симп., 19–24 июня 2011 г. Бишкек, 2011. Т. 2. С. 13–16.
 13. *Электроразведка. Справочник геофизика* / под ред. Тархова. М.: Недра, 1979. 518 с.
 14. *Бердичевский М.Н.* Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев, Д.Б. Новиков, В.В. Пастушан. М.: МГУ, 1997. 161 с.