

Методика многооконного синхронного мониторинга временной изменчивости МТ/МВ передаточных операторов с учетом погрешностей их определения

Т.А. Родина, И.М. Варенцов, И.Н. Лозовский
ЦГЭМИ ИФЗ РАН, whittakeresq@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Представлена методика мониторинга временной изменчивости магнитотеллурического (МТ) импеданса для выявления возможных изменений геоэлектрической структуры земной коры при подготовке и в результате сейсмических событий различной природы. На примере наблюдений в период мощного Камбаратинского промышленного взрыва в Киргизии проведен анализ изменений стационарных оценок импеданса и его инвариантов до и после сейсмического события по локальным наблюдениям и с использованием синхронных данных удаленных базовых пунктов. Детально исследованы вариации импедансных данных с течением времени в окнах различной длительности. Разработаны и опробованы программные инструменты для анализа, визуализации, отбраковки (по когерентностным и другим частным критериям, а также по величине относительных погрешностей оценивания) и итогового робастного осреднения частных оценок импеданса. Показана острая необходимость в синхронных системах наблюдения при решении задач МТ мониторинга. Сделанные выводы приложимы в задачах временного мониторинга других передаточных операторов электромагнитного (ЭМ) поля, прежде всего, магнитовариационных (МВ).

Ключевые слова: геодинамические процессы, синхронные магнитотеллурические наблюдения, мониторинг временных изменений, робастное оценивание, учет погрешностей

ВВЕДЕНИЕ

Исследования временной изменчивости МТ и МВ передаточных операторов успешно ведутся при изучении неоднородностей возбуждения естественного ЭМ поля Земли (Варенцов и др., 2003а, 2003б) и динамики искажающего влияния промышленных ЭМ шумов (Sokolova, Varentsov, 2005). При решении задач геодинамического мониторинга с использованием МТ/МВ методов приходится вести выделение внутриземных эффектов малой интенсивности на фоне явлений другой природы. Для этого требуются специальные средства подавления нецелевых эффектов и углубленный контроль точности получаемых данных.

За последние двадцать лет выполнен целый ряд исследований в области МТ/МВ мониторинга геодинамических процессов. При этом, многие результаты исследований имеют ограниченную достоверность, поскольку основаны на односторонних оценках передаточных операторов, которые, в большинстве случаев, заметно искажены влиянием локальных и региональных ЭМ шумов (Климкович и др., 2009; Потапов, Поспеева, 2017; Chen et al., 2006). Геодинамические процессы, представляющие наибольший интерес, проявляются значительно слабее, нежели

индустриальные помехи и искажения, вызванные неоднородностью ЭМ возбуждения Земли. Традиционным средством подавления локальных помех является проведение дополнительных синхронных наблюдений, удаленных от пункта мониторинга на расстояние, превышающее радиус корреляции локального шума (Варенцов и др., 2003а, 2003б).

Уже имеется значимый опыт применения синхронных систем мониторинга. Такие системы позволяют анализировать изменчивость горизонтальных МВ откликов в Японии (Рокитянский и др., 2013), надежнее изучать изменчивость оценок фазового тензора импеданса при мониторинге техногенных воздействий на австралийской геотермальной площади (Peacock et al., 2012).

Развитие нашего подхода к решению задачи синхронного МТ мониторинга геодинамических событий (Варенцов и др., 2020) представляется в ходе анализа экспериментальных данных, полученных в зоне искусственного геодинамического воздействия (Камбаратинского промышленного взрыва в Киргизии), с учетом синхронных наблюдений на удаленных стационарных пунктах Научной станции РАН в г. Бишкек.

КАМБАРАТИНСКИЙ МТ ЭКСПЕРИМЕНТ

22 декабря 2009 г. на берегу р. Нарын в Киргизии был произведен промышленный взрыв мощностью 2.8 Кт в тротиловом эквиваленте для возведения взрывоабросной плотины Камбаратинской ГЭС. С целью изучения вариаций электропроводности, ожидаемых в результате изменения напряженно-деформационного состояния блоков земной коры, на расстоянии 5.7 км от места взрыва проводилась непрерывная регистрация пяти компонент ЭМ поля (п. КМВ, рисунок 1) (Баталева и др., 2013). Измерения выполнены в течение суток до момента взрыва и двух суток после него с использованием МТ станции Phoenix MTU-5D с частотой дискретизации 24 Гц.

Для выявления изменений геоэлектрической структуры нами, прежде всего, были построены и сопоставлены стационарные оценки импеданса в п. КМВ отдельно по интервалам наблюдений до и после взрыва. Для повышения надежности результатов исследования одноточечные оценки импеданса были дополнены синхронными, использующими магнитные данные со стационарных пунктов ИС РАН: Аксу (AKS) и Чонкурчак (CHN), удаленных от места взрыва на 105 и 145 км, соответственно (рисунок 1).

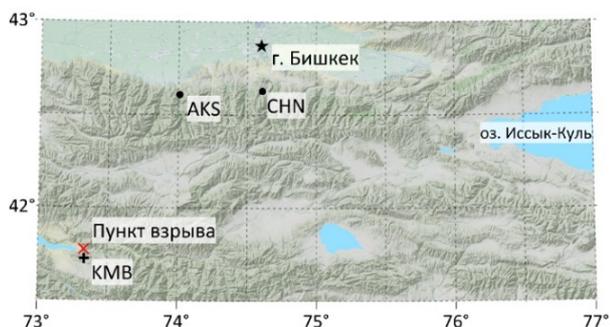


Рисунок 1. Схема расположения пунктов МТ наблюдений относительно места взрыва.

В качестве основного инструмента решения задачи мониторинга использована программная система PRC_MTMV (Варенцов и др., 2003а; Varentsov, 2015) Методика оценивания передаточных операторов основана на получении частных оценок (как синхронных, RR, так и одноточечных, SS) для отдельных отрезков (окон) записей и их отбраковке по когерентностным и иным критериям.

На рисунке 2 SS и RR оценки кажущихся сопротивлений, полученные в п. КМВ по временным интервалам до и после взрыва, сопоставлены на периодах от 0.2 до 30 с. Сравнение стационарных RR оценок не выявляет заметных различий между ними. В то же

время, SS оценки заметно отличаются по уровню от RR оценок во всем диапазоне рассматриваемых периодов, что указывает на значительное влияние ЭМ помех на результаты одноточечного оценивания. Хорошее совпадение всех RR оценок, как до, так и после взрыва проявляется (Варенцов и др., 2020) и для инвариантных параметров импеданса, более чувствительных к изменениям геоэлектрической среды.

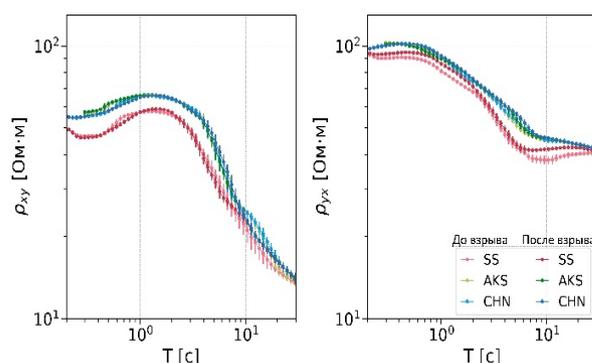


Рисунок 2. Сопоставление одноточечных и синхронных (относительно п. AKS и CHN) оценок кажущихся сопротивлений до и после Камбаратинского промышленного взрыва.

ВРЕМЕННЫЕ РАЗВЕРТКИ ЛОКАЛЬНЫХ И СИНХРОННЫХ ОЦЕНОК ИМПЕДАНСА

Далее частные оценки становятся объектом непосредственного изучения, направленного на более тонкую диагностику временной изменчивости передаточных операторов в результате изменений структуры земной коры. Анализу подлежат все частные оценки (без предварительной отбраковки) для серии временных окон фиксированной длины, выбираемых без наложений и разрывов. Выбор размера временных окон осуществляется в соответствии с временным масштабом изучаемых явлений (Варенцов, Соколова, 2003b, Sokolova, Varentsov, 2005). Результаты представляются в виде временных разверток – псевдоразрезов с горизонтальной осью времени и вертикальной осью периода в lg-масштабе. Для расширения возможностей анализа данных мониторинга нами разработаны дополнительные программные процедуры, реализующие визуализацию данных, интерактивную отбраковку недостоверных оценок по нескольким критериям и последующее робастное осреднение оценок, прошедших отбраковку, для серии временных окон разной длины.

На рисунке 3 представлена визуализация изменений ρ_{xy} компоненты кажущегося сопротивления с течением времени для временного окна длиной 45 минут. На двух верхних панелях дано сравнение псевдоразрезов всех полученных частных оценок –

одноточечных и синхронных с использованием данных в п. АКС. Число локальных неоднородностей для SS оценки на самой верхней панели рисунка значительно больше, чем для синхронной RR оценки на второй панели сверху. Большая часть таких аномалий концентрируется в “мертвом” диапазоне в окрестностях периодов 1 и 10 с. Для прояснения их природы произведена отбраковка синхронных частных оценок импеданса по двум когерентностным критериям и по величине относительных погрешностей оценивания. Частные оценки с высоким (>0.6) квадратом входной когерентности характеризуют случаи линейной поляризации магнитных полей и не позволяют устойчиво определить импеданс в матричном представлении – в этом случае большая часть исключений коснулась периодов $>10-20$ с. Частные оценки с низким (<0.55) квадратом множественной когерентности характеризуют качество импедансных линейных связей – большая часть таких оценок концентрируется в “мертвом” диапазоне в окрестностях периодов 1 и 10 с. Затем были исключены все оценки с относительной погрешностью $>35\%$. На нижней панели представлен псевдоразрез, полученный после исключения ненадежных оценок по всей совокупности описанных критериев. Более половины частных оценок были связаны с влиянием ЭМ помех и отбракованы. Итоговый результат демонстрирует минимальные временные изменения кажущегося сопротивления и не позволяет судить об изменениях геоэлектрической структуры в результате взрыва.

Нестационарные эффекты по-разному проявляются во временных окнах различной длины. Для повышения устойчивости результатов мониторинга аналогичные процедуры отбраковки были последовательно применены для RR оценок (относительно п. АКС) в серии пяти временных окон длиной от 11 минут до 3 часов (рисунок 4). Далее, по результатам этой серии в пределах окон максимальной длины (3 часа) были рассчитаны медианные значения кажущегося сопротивления (рисунок 5, верхние панели). Робастная оценка разброса полученных данных определялась по “медиане абсолютной величины отклонения от медианы” (Chave, Thomson, 1989).

Развертки медианных значений кажущегося сопротивления содержат меньшее число выпадающих элементов и демонстрируют низкую степень изменчивости на протяжении всего интервала наблюдения. Для лучшего понимания полученных результатов на нижних панелях рисунка 5 приведено распределение числа

значений в ячейках осреднения, прошедших процедуры отбраковки недостоверных данных (рисунок 4, правые панели). Представленные результаты осреднения, имеющие повышенную достоверность, также не дают оснований выделить значимые изменения импедансных данных в период после взрыва.

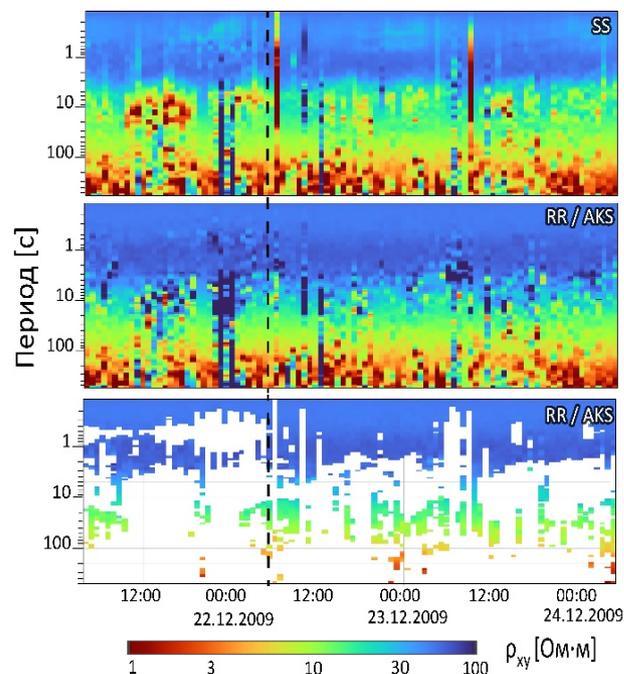


Рисунок 3. Временные развертки SS и RR (относительно п. АКС) частных оценок χ_{xy} компоненты кажущегося сопротивления в п. КМВ на периодах 0.15-500 с, сверху вниз: первый ряд – SS оценки, полный набор данных; второй ряд – RR оценки, полный набор данных; третий – RR оценки после применения всех упомянутые критерии отбраковки; пунктирной линией обозначен момент взрыва.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для расширения возможностей мониторинга импедансных изменений целесообразно строить псевдоразрезы временной изменчивости для более широкого многообразия компонент и инвариантных параметров. Развертки экстремальных инвариантов кажущегося сопротивления и фазы импеданса, а также параметров трехмерности среды могут быть более чувствительными к ее изменениям перед и в процессе сейсмических событий. Нельзя упускать и возможность совместного мониторинга нескольких передаточных операторов, дополняя импеданс МВ откликами.

Выводы

Экспериментальные данные, полученные вблизи Камбаратинского промышленного взрыва,

позволили продемонстрировать возможности методики синхронного мониторинга изменчивости частных оценок импеданса (кажущихся сопротивлений) для серии окон различной длительности. Построение временных разверток (псевдоразрезов) изменения частных оценок импеданса наглядно показало возможности применения критериев отбраковки элементов данных, искаженных ЭМ помехами, и выделения их достоверных частей. Выявлено существенное влияние локальных ЭМ шумов на одноточечные оценки и заметные преимущества синхронных оценок. Сопоставлены результаты отбраковки частных оценок в ходе мониторинга по различным критериям, включая уровень относительных погрешностей их определения. Продемонстрированы результаты робастного многооконого осреднения синхронных частных оценок импеданса, прошедших отбраковку.

Учет синхронных наблюдений и ошибок определения частных оценок передаточных операторов позволяет избежать недостоверных выводов об эффектах сейсмических событий на временных интервалах с высоким уровнем ЭМ помех. Полученные результаты указывают на необходимость проведения исследований в области МТ/МВ мониторинга геодинамических процессов исключительно на базе синхронных систем наблюдения с углубленным контролем погрешностей получаемых данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-35-00668_моп_а) и в рамках госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН №0144-2019-0021. Авторы благодарны сотрудникам ИС РАН в г. Бишкек, прежде всего, Е.А. Баталевой и А.К. Рыбину, за возможность использования МТ данных, полученных в период Камбаратинского взрыва, и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

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. doi:10.7868/S0002333713030034

Варенцов Ив.М., Родина Т.А., Лозовский И.Н. Синхронный мониторинг временной изменчивости МТ импеданса в период мощного Камбаратинского промышленного взрыва // *Геофизика*. 2020. № 4. С. 68–74

Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. и др. Методика построения передаточных операторов ЭМ поля для массива синхронных зондирований BEAR // *Физика Земли*. 2003. № 2. С. 30–61

Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Рабочая группа проекта BEAR. Диагностика и подавление авроральных искажений передаточных операторов ЭМ поля в эксперименте BEAR // *Физика Земли*. 2003. № 4. С. 21–48

Климкович Т.А., Городиский Ю.М., Кузнецова В.Г., Максимчук В.Ю. Дослідження часових змін параметрів векторів індукції у Закарпатському сейсмоактивному прогині // *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31(6). С. 147–152

Потапов В.В., Поспеева Е.В. ЭМ мониторинг методом МТЗ в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Межд. науч. конгресс (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017): Межд. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология". Сб. материалов в 4 т. 2017. Т. 3. С. 167–171*

Рокитянский И.И., Трегубенко В.И., Бабак В.И., Терешин А.В. Вариации компонент вектора индукции и горизонтального тензора перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. по данным японских геомагнитных обсерваторий // *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35(3). С. 15–130

Chave A.D., Thomson D.J. Some comments on MT response function estimation // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94(B10). P. 14215–14225. doi:10.1029/JB094iB10p14215

Chen K.-J., Chiu B., Lin C.-H. A search for correlation between time change in transfer functions and seismic energy release in North Taiwan // *Earth Planets Space*. 2006. V. 58. P. 981–991. doi:10.1186/BF03352603

Peacock J.R., Thiel S., Reid P., Heinson G. MT monitoring of a fluid injection: example from an enhanced geothermal system // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39(18). L18403. doi:10.1029/2012GL053080

Sokolova E.Yu., Varentsov Iv.M., EMTESZ-Pomerania WG. RRMC technique fights highly coherent EM noise in Pomerania // *Protokoll uber das 21 Kolloquium "Eiektromagnetische Tiefenforschung. Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges.* 2005. P. 124–136

Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion // *Electromagnetic sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice*. Amsterdam: Elsevier. 2015. P. 271–299. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00010-6>

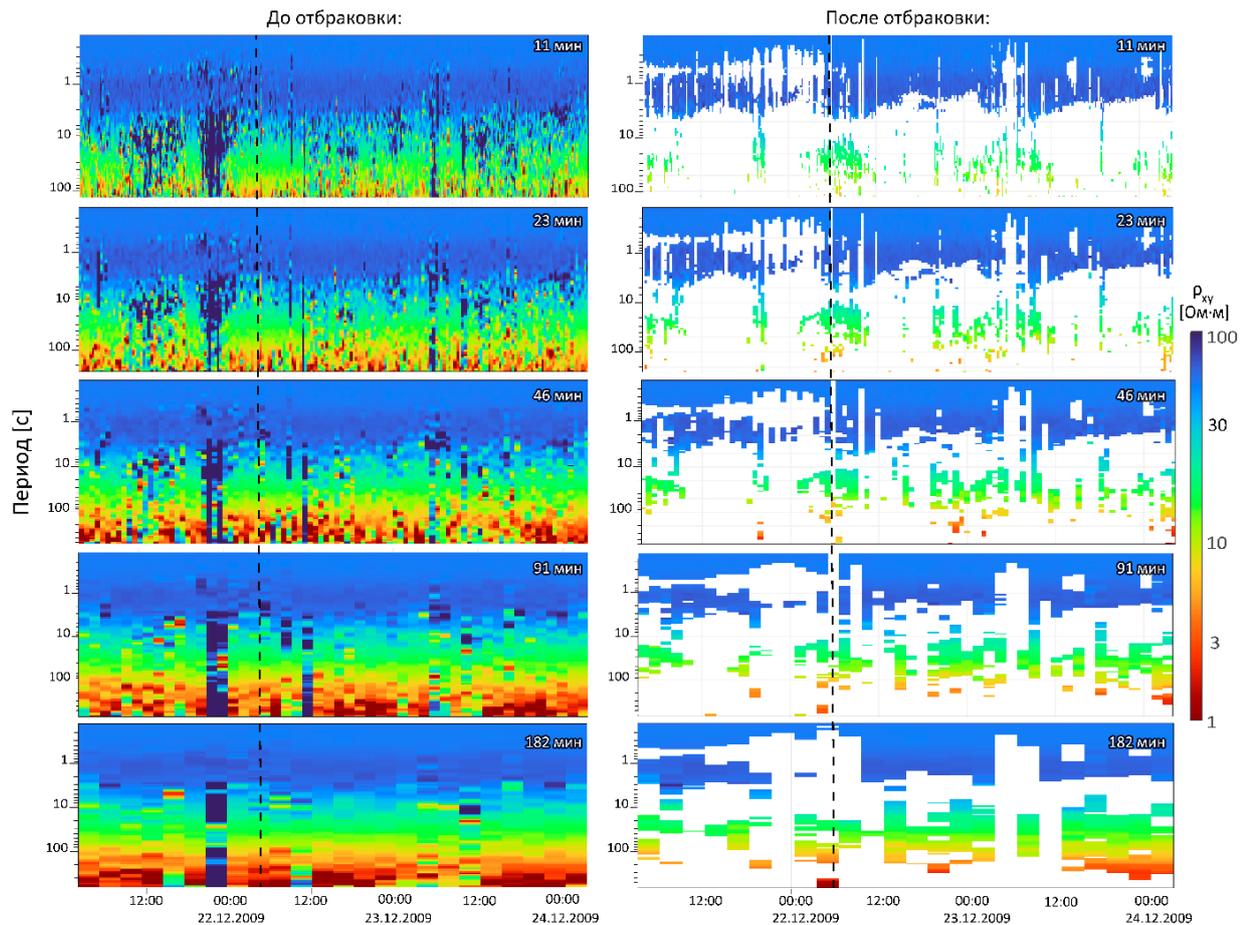


Рисунок 4. Временные развертки синхронных оценок ρ_{xy} компоненты кажущегося сопротивления в п. КМВ, полученные с использованием данных в удаленном п. АКС; длина окна увеличивается от ряда к ряду, сверху-вниз: 11, 23, 46, 91 и 182 минуты; слева представлен полный набор данных, справа применены все критерии отбраковки; пунктирной линией обозначен момент взрыва.

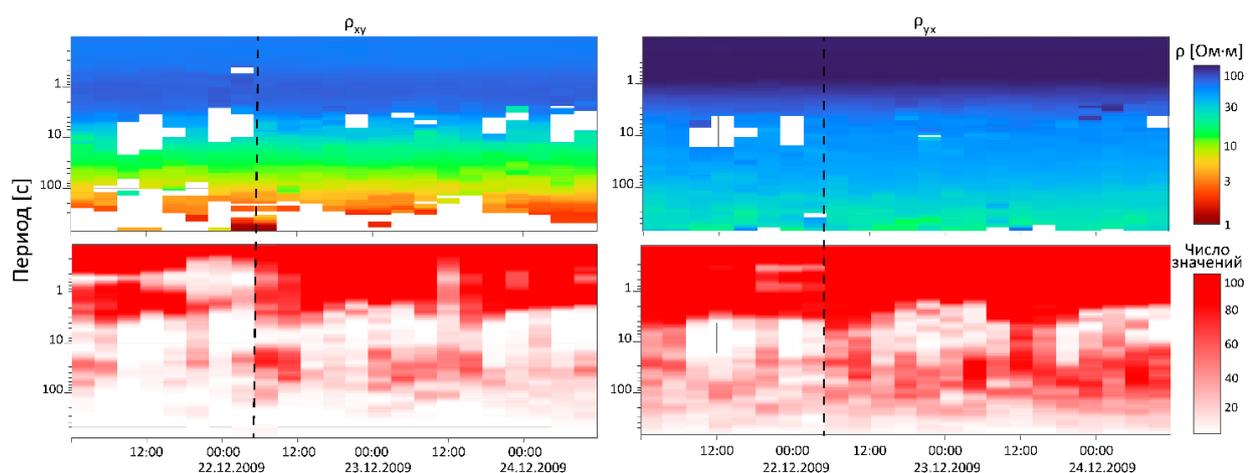


Рисунок 5. Результаты медианного осреднения значений кажущегося сопротивления для пяти временных окон в п. КМВ (RR относительно п. АКС): слева – компонента ρ_{xy} , справа – ρ_{yx} ; вверху – псевдоразрезы кажущегося сопротивления, внизу – число усредняемых значений; пунктирной линией обозначен момент взрыва