



4.2020 Геофизика

Карта эффективного кажущегося сопротивления (Ω -м, lg-масштаб) с наложенными векторами индукции (R_e , в конвенции Визе) для периода 2048 с

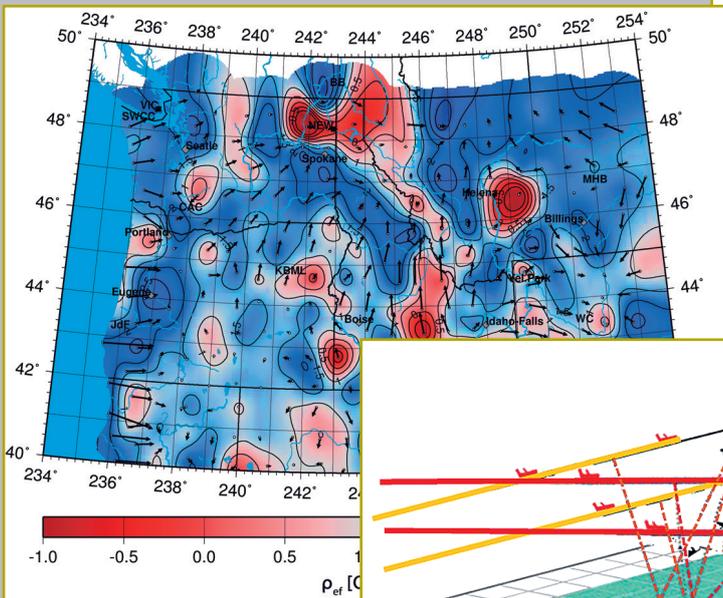
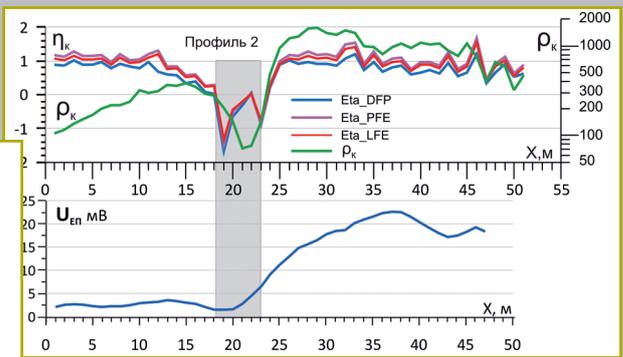
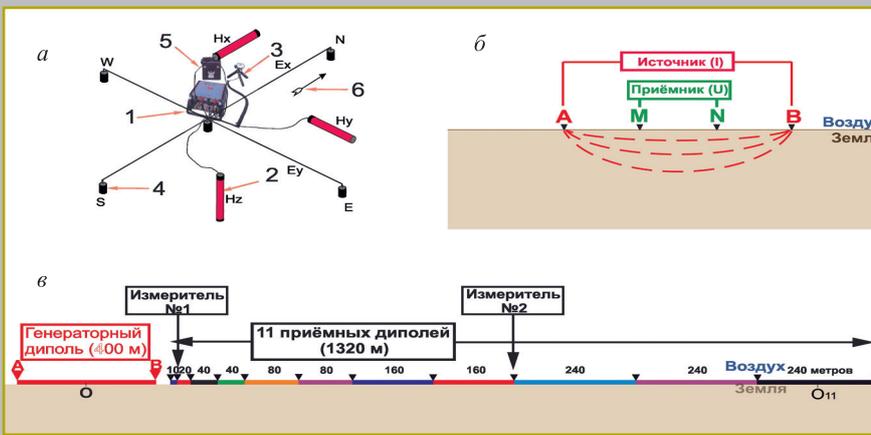
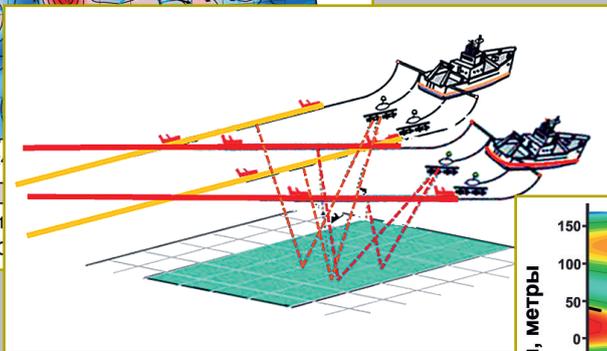


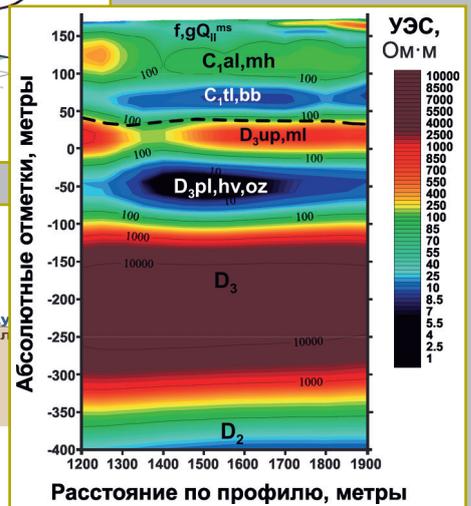
Схема установок АМТЗ (а), ВЭЗ (б), ЭТ (в)



Графики ВП, ρ_k , УЭП по профилю 2 над зоной с отрицательной ВП



Схематичный пример освещенности среды в случае использования информации с нескольких сейсмических наблюдений



Результаты совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ

1

2

3

4

5

6

УДК 550.372

СИХРОННЫЙ МОНИТОРИНГ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА В ПЕРИОД МОЩНОГО КАМБАРАТИНСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ВЗРЫВА

Ив.М. Варенцов¹, Т.А. Родина¹, И.Н. Лозовский¹

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований – филиал ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта. 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, а/я 30; e-mail: whittakeresq@gmail.com

Аннотация. В статье представлена методика анализа данных мониторинга временной изменчивости магнитотеллурического импеданса и исследуются возможные изменения геоэлектрической структуры земной коры вследствие мощного промышленного взрыва при строительстве Камбаратинской ГЭС в Киргизии. Проведен анализ изменений стационарных оценок импеданса и его инвариантов до и после взрыва с использованием синхронных данных удаленных базовых пунктов. Детально исследованы вариации импедансных данных с течением времени в окнах различной длительности. Разработаны и опробованы новые программные инструменты для анализа, визуализации, отбраковки (по когерентностным критериям и по величине относительных погрешностей оценивания) и итогового робастного осреднения частных оценок импеданса. Показана острая необходимость в синхронных системах наблюдения при решении задач магнитотеллурического мониторинга.

Ключевые слова. Исследование геодинамических процессов, магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования, магнитотеллурический мониторинг, передаточные операторы, робастное оценивание.

SIMULTANEOUS MONITORING OF THE TEMPORAL VARIABILITY OF MAGNETOTELLURIC IMPEDANCE DURING THE POWERFUL KAMBARATA INDUSTRIAL EXPLOSION

Iv.M. Varentsov¹, T.A. Rodina¹, I.N. Lozovsky¹

¹ Geoelectromagnetic Research Centre – branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, Troitsk, P.O.B. 30, Russia, 108840; e-mail: whittakeresq@gmail.com

Abstract. The paper presents an approach to process magnetotelluric impedance monitoring data in the search for the changes in geoelectrical structure related to a powerful industrial explosion during the construction of Kambarata hydroelectric station in Kyrgyzstan. The stationary remote reference estimates of impedance and its invariants prior to and after the explosion were compared. The impedance changes over time were analyzed for a series of time windows. The new software tools for analysis, visualization, rejection (by the value of relative estimation errors and coherency sorting criteria) and the final robust averaging of partial impedance estimates have been developed and tested. The necessity of simultaneous monitoring systems for solving problems of magnetotelluric monitoring is demonstrated.

Key words. Study of geodynamical processes, magnetotelluric and magnetovariational soundings, magnetotelluric monitoring, transfer functions, robust estimation.

ВВЕДЕНИЕ. Изменения физических свойств горных пород, обусловленные современными естественными и техногенными геодинамическими процессами, могут служить источниками аномальных вариаций переменного электромагнитного (ЭМ) поля, наблюдаемого на поверхности Земли. Исследование изменений электропроводности земной коры и верхней мантии может быть выполнено с применением магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) методов путем непрерывного или повторяемого измерения компонент ЭМ-поля.

Исследования временной изменчивости МТ и МВ передаточных операторов успешно ведутся при изучении неоднородностей возбуждения естественно-го ЭМ-поля Земли [2, 3] и динамики искажающего влияния индустриальных ЭМ-шумов [15]. Однако изменения МТ- и МВ-откликов, вызванные геодинамическими процессами, не только существенно меньше их суммарных стационарных оценок, но и в большинстве случаев заметно уступают по интенсивности нестационарным эффектам возбудителей поля и индустриальных помех, вызванных электрифицированными железными дорогами, линиями

электропередачи и другими инфраструктурными объектами. Таким образом, при решении задач геодинамического мониторинга с использованием МТ-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. В данной статье мы рассматриваем проблематику важного направления исследований, связанного с изучением динамики передаточных операторов ЭМ-поля [4–8, 11, 12, 14], и не обсуждаем альтернативные направления, основанные, например, на непосредственном анализе наблюдаемых ЭМ-полей [13]. Значимыми объектами изучения стали изменения в геоэлектрической структуре, вызванные сейсмическими событиями [4, 7, 8, 11]. При этом многие результаты исследований имеют ограниченную достоверность, поскольку основаны на одноточечных оценках передаточных операторов, которые в большинстве случаев замет-

но искажены влиянием локальных и региональных ЭМ-шумов.

Традиционным средством подавления локальных помех является проведение дополнительных синхронных наблюдений, удаленных от пункта мониторинга на расстояние, превышающее радиус корреляции локального шума [2, 16]. Синхронные системы наблюдения доминируют при построении стационарных оценок ЭМ передаточных операторов в задачах зондирования геоэлектрической среды и представляются весьма перспективными при решении задач мониторинга ее временной изменчивости.

Примерами экспериментов мониторинга, не использующих синхронные системы наблюдения, могут служить работы по изучению изменчивости кажущегося сопротивления в районе Чуйского землетрясения [7], анализу корреляций между энергией землетрясений и изменениями МВ-типпера в обсерватории LNP на Тайване [11] и исследованию временной динамики типпера в Карпатском регионе [4].

В работе [6] представлена система синхронных МТ-наблюдений, развернутая на п-овах Босо и Идзу в Японии, состоящая из двух станций, расположенных в области интенсивных ЭМ-помех. Однако при обработке полученных данных синхронность наблюдений не учитывалась. Аналогичный недостаток имели работы по МТ-мониторингу на Камчатке [5], обеспечивающие синхронную запись электрических полей в нескольких пунктах при наличии лишь одного пункта МВ-наблюдений. Подобные исследования, не использующие методы синхронного оценивания передаточных операторов, пока еще доминируют на практике.

Однако уже имеется существенный опыт применения синхронных систем мониторинга: такие системы позволяют анализировать изменчивость горизонтальных МВ-откликов в Японии [8], надежнее изучать изменчивость импеданса в вулканической области Филиппин [14] и оценок его фазового тензора при мониторинге техногенных воздействий на австралийской геотермальной площади [12].

Развитие нашего подхода к решению задачи МТ-мониторинга геодинамических событий представляется ниже в ходе анализа экспериментальных данных, полученных в зоне искусственного геодинамического воздействия (Камбаратинского промышленного взрыва в Киргизии), учитывающего синхронные наблюдения на удаленных стационарных пунктах Научной станции РАН (НС РАН, 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 взрывоопасной 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 (пункт КМВ, рис. 1) [1]. Измерения выполнены в течение суток до момента взрыва и двух суток

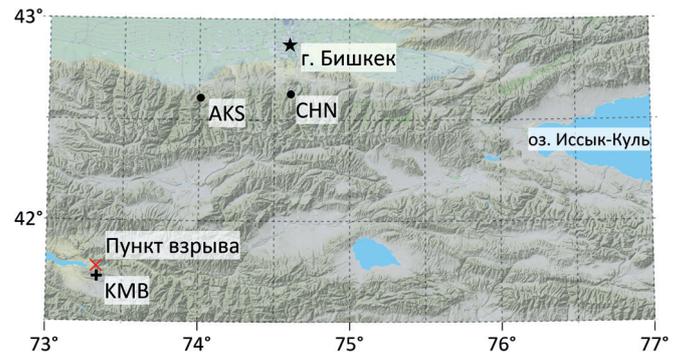


Рис. 1
Схема расположения пунктов МТ-наблюдений относительно места взрыва

после него с использованием МТ-станции Phoenix MTU-5D с частотой дискретизации 24 Гц. Анализ результатов эксперимента, представленный в работе [1], выявил вызванные взрывом изменения геоэлектрической структуры земной коры на основе временного мониторинга однократных оценок импеданса, пересчитываемых на разные азимуты координатных систем путем вращения оператора.

Для подтверждения выявленных изменений 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 однократные оценки импеданса были дополнены синхронными, использующими магнитные данные со стационарных пунктов НС РАН – Аксу (AKS) и Чонкурчак (CHN), удаленных от места взрыва на 105 и 145 км, соответственно.

Сопоставление стационарных оценок импеданса до и после взрыва

В качестве основного инструмента решения поставленной задачи использована разработанная в ЦГЭМИ ИФЗ РАН программная система PRC_MTMV [2, 16]. Методика оценивания передаточных операторов основана на получении частных оценок (как синхронных, RR, так и однократных, SS) для отдельных отрезков (окон) записей и их отбраковке по когерентностным и иным критериям. Оценивание выполняется независимо для набора окон увеличивающейся длины с последующим многоуровневым робастным осреднением: первичным – прошедших отбраковку частных оценок для окна фиксированной длины; многооконным – итоговых результатов для окон разной длины; мульти-RR – RR-оценок относительно разных удаленных точек и неискаженной части SS-оценки [2, 16]. Отбраковка частных SS- и RR-оценок производится, прежде всего, в случаях низкой множественной когерентности (при низком качестве линейных связей) и высокой входной когерентности (при сильной линейной поляризации магнитных каналов) как для отдельных периодов («локальная» отбраковка), так и в среднем для всего диапазона оценивания («глобальная» отбраковка) [2]. Исключение отрезков с интенсивным низкокогерентным шумом облегчает настройку методов робастного осреднения на выделение высококогерентного МТ-сигнала.

В свою очередь, дополнительные магнитные (МС) критерии отбраковки [16], учитывающие пространственно-частотную структуру МВ-полей и передаточных операторов, позволяют исключить влияния еще более высококогерентных ЭМ-шумов и эффектов неоднородности возбудителей поля.

Полученные нами SS- и RR-оценки импеданса (Z) в п. КМВ сопоставлены на периодах от 0,2 до 30 с (рис. 2–4). Сравнение стационарных RR-оценок кажущихся сопротивлений и фаз главных компонент Z до и после взрыва не выявляет существенных различий между ними. При этом амплитуды SS-оценок заметно отличаются по уровню от RR-оценок во всем диапазоне рассматриваемых периодов, что указывает на значительное влияние ЭМ-помех на результаты одноточечного оценивания. Отметим, что эффективная глубина проникновения поля на периоде 0,2 с составляет ~1 км, на периоде 1 с – ~2,5 км, а на периоде 20 с не превышает ~8 км. Таким образом, мы не обсуждаем изменчивость геоэлектрической структуры на глубинах первых сотен метров.

В поиске параметров, более чувствительных к исследуемым различиям оценок до и после взрыва, выполнен анализ многообразия инвариантов импеданса. На рис. 3 приведены СВВ-инварианты фазового тензора импеданса [9] – экстремальные фазы, максимальный азимут и параметр трехмерности (skew), свободные от частотно независимых приповерхностных гальванических искажений. Для периодов более 1 с RR-оценки до и после взрыва совпадают с высокой точностью первых градусов. Максимальные различия между SS- и RR-кривыми наблюдаются для данных максимального азимута и skew на периодах 2–10 с – в пределах «мертвого

диапазона» с низкой энергетикой МТ-поля и максимальным влиянием локальных шумов. На самых коротких периодах (<1 с) есть различия между RR-кривыми, полученными с использованием синхронных данных п. АКС, и кривыми оценок SS и RR относительно п. СНН – они, скорее всего, объясняются активными ЭМ-экспериментами, регулярно проводимыми в п. АКС.

На рис. 4 представлены классические инварианты Свифта: экстремальные кажущиеся сопротивления, максимальный азимут и skew, наоборот, сильно зависящие от приповерхностных гальванических искажений. Различия между кривыми до и после взрыва здесь также превышают погрешности обработки только для одноточечных оценок.

Следующим шагом анализа стационарных оценок стало сравнение результатов мульти-RRMC-осреднения RR-оценок (относительно п. АКС и СНН) до и после взрыва (рис. 5). SS-оценки, искаженные во всем диапазоне рассматриваемых периодов, в этом осреднении не использовались. Расхождение итоговых мульти-RRMC-оценок составляет первые единицы Ом·м для кривых кажущегося сопротивления и первые градусы для фаз, что может быть объяснено разной длиной обрабатываемых участков записи, либо изменением отношения «сигнал/шум».

Таким образом, результаты анализа стационарных оценок Z до и после взрыва не выявили заметных изменений геоэлектрической структуры. Однако можно предположить наличие более коротких периодов изменения электропроводности после взрыва. Для их выделения необходимо анализировать оценки импеданса на временных интервалах меньшей длительности.

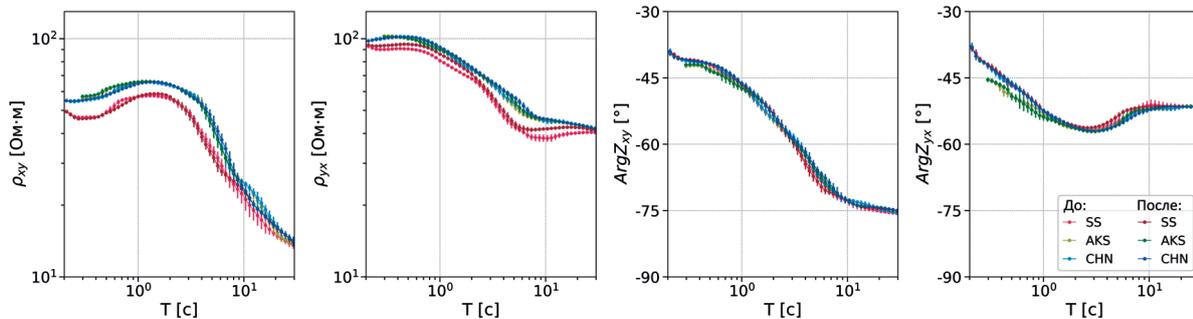


Рис. 2

Сопоставление одноточечных и синхронных (относительно п. АКС и СНН) оценок Z до и после Камбаратинского промышленного взрыва: слева – кривые кажущегося сопротивления, справа – фазы главных компонент Z

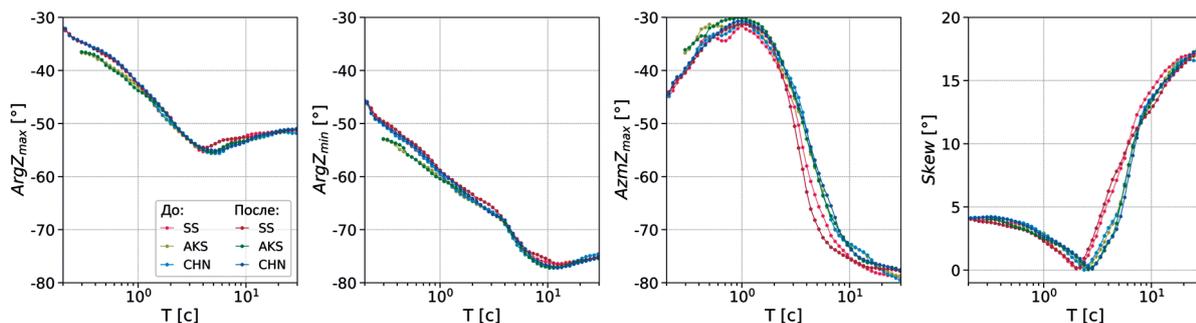


Рис. 3

Сопоставление инвариантов импеданса (в фазовой декомпозиции СВВ [9]) до и после взрыва, слева направо: экстремальные фазы – максимальная и минимальная, максимальный азимут, параметр трехмерности skew

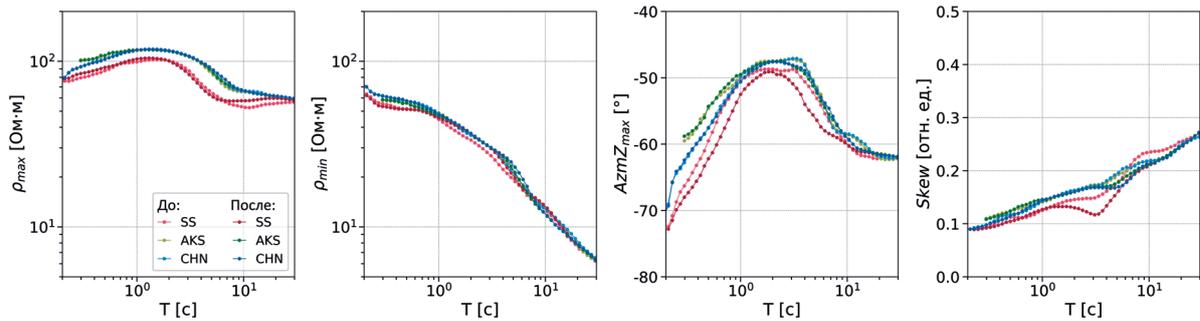


Рис. 4

Сопоставление инвариантов импеданса (в классической декомпозиции Свифта) до и после взрыва, слева направо: экстремальные кажущиеся сопротивления – максимальное и минимальное, максимальный азимут, параметр трехмерности skew

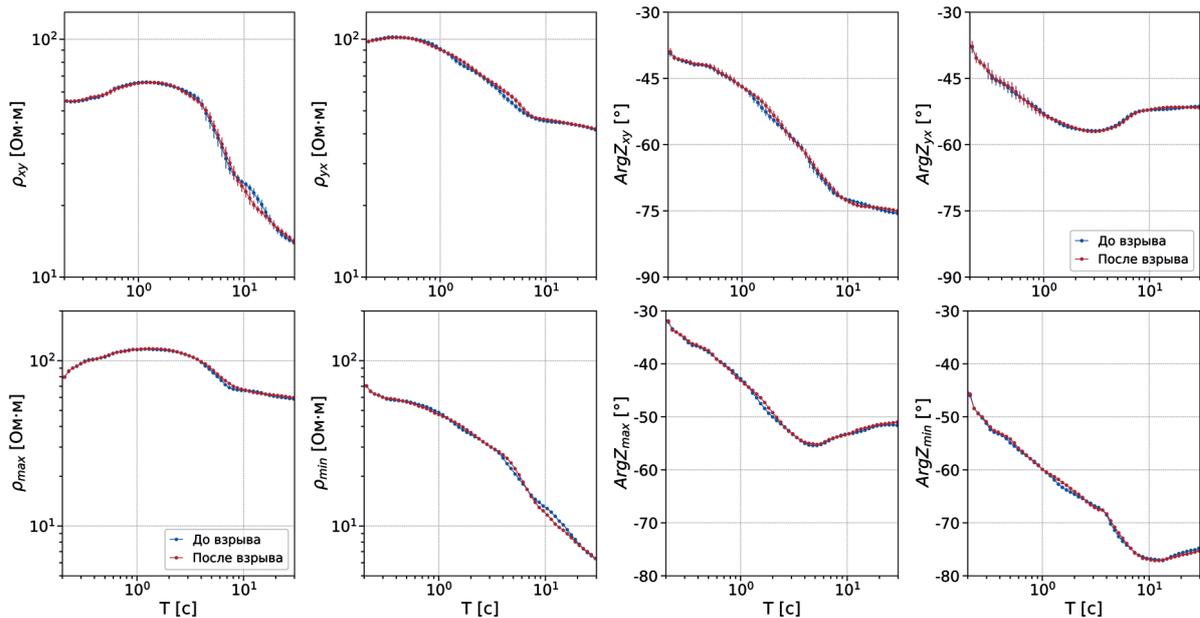


Рис. 5

Сопоставление результатов мульти-RRMC-осреднения RR-оценок Z до и после взрыва, первый ряд: слева – кривые кажущегося сопротивления, справа – фазы главных компонент Z ; второй ряд: слева – экстремальные кривые кажущегося сопротивления (декомпозиция Свифта), справа – экстремальные фазы (СВВ-декомпозиция фазового тензора импеданса)

Временные развертки локальных и синхронных оценок импеданса

Детальный анализ изменчивости Z с течением времени выполнен путем последовательного представления частных оценок выбранной компоненты для серии временных окон фиксированной длины (выбираемых без наложений и разрывов) [3, 15]. Получение таких данных возможно в системе PRC_MTMV при отключении всех локальных и глобальных критериев отбраковки частных оценок [2]. 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.

На рис. 6 представлена визуализация изменений x -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. AKS. Число локальных неоднородностей для SS-оценки в первом ряду рисунка значительно больше, чем для синхронной RR-оценки во втором ряду. Для прояснения природы наблюдаемых здесь аномалий произведена отбраковка синхронных частных оценок импеданса по двум когерентностным критериям и по величине относительных погрешностей оценивания. В третьем ряду представлен результат исключения частных оценок с высоким ($>0,6$) квадратом входной когерентности, характеризующей случаи линейной поляризации МТ-полей, не позволяющие устойчиво определить импеданс в матричном представлении – большая часть исключений здесь коснулась периодов >10 – 20 с. В четвертом ряду исключены частные

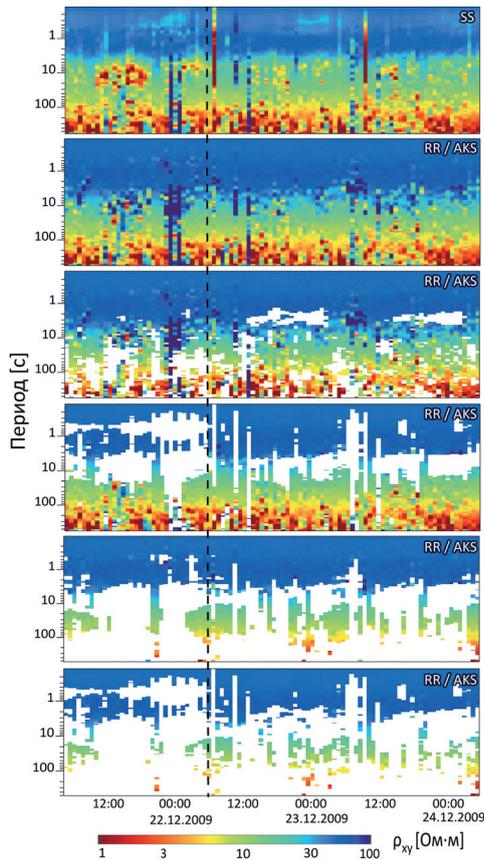


Рис. 6

Временные развертки одноканальной и синхронной (относительно п. AKS) оценки ρ_{xy} -компоненты кажущегося сопротивления в п. KMB на периодах 0,15–500 с, сверху вниз: первый ряд – SS-оценка, полный набор данных; ниже – RR-оценки, второй ряд – полный набор данных; третий – исключены данные с квадратом входной когерентности $>0,6$; четвертый – исключены данные с квадратом множественной когерентности $<0,55$; пятый – исключены данные с относительными погрешностями более 35%; шестой – совместно применены все указанные выше критерии отбраковки; пунктирной линией обозначен момент взрыва

оценки с низким ($<0,55$) квадратом множественной когерентности, характеризующей качество импедансных линейных связей. В этом случае исключения концентрируются в «мертвом» диапазоне в окрестностях периодов 1 и 10 с. В пятом ряду исключены оценки с относительной погрешностью оценивания выше 35%. Наконец, в самом нижнем ряду представлен псевдоразрез, полученный после исключения ненадежных оценок по всей совокупности описанных выше критериев. В итоге отбраковка более половины частных оценок была ассоциирована с влиянием ЭМ-помех. Полученный результат демонстрирует минимальные временные изменения кажущегося сопротивления и не позволяет судить об изменениях геоэлектрической структуры в результате взрыва.

Аналогичные процедуры отбраковки были последовательно применены для RR-оценок (относительно п. AKS) в серии пяти временных окон длиной от 11 минут до 3 часов (рис. 7). Далее по всей серии в пределах окон максимальной длины были рассчитаны медианные значения кажущегося сопротивления (рис. 8). Робастная оценка разброса полученных данных определялась по «медиане абсолютной величины отклонения от медианы» [10].

Развертки медианных значений кажущегося сопротивления демонстрируют низкую степень изменчивости на протяжении всего интервала наблюдения. Для лучшего понимания полученных результатов приведено распределение количества значений в ячейках осреднения, прошедших процедуру отбраковки недостоверных данных (рис. 8, нижняя панель). Представленные результаты не дают оснований выделить значимые изменения импедансных данных в период после взрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Экспериментальные данные, полученные вблизи Камбаратинского промышленного взрыва, позволили продемонстрировать возможно-

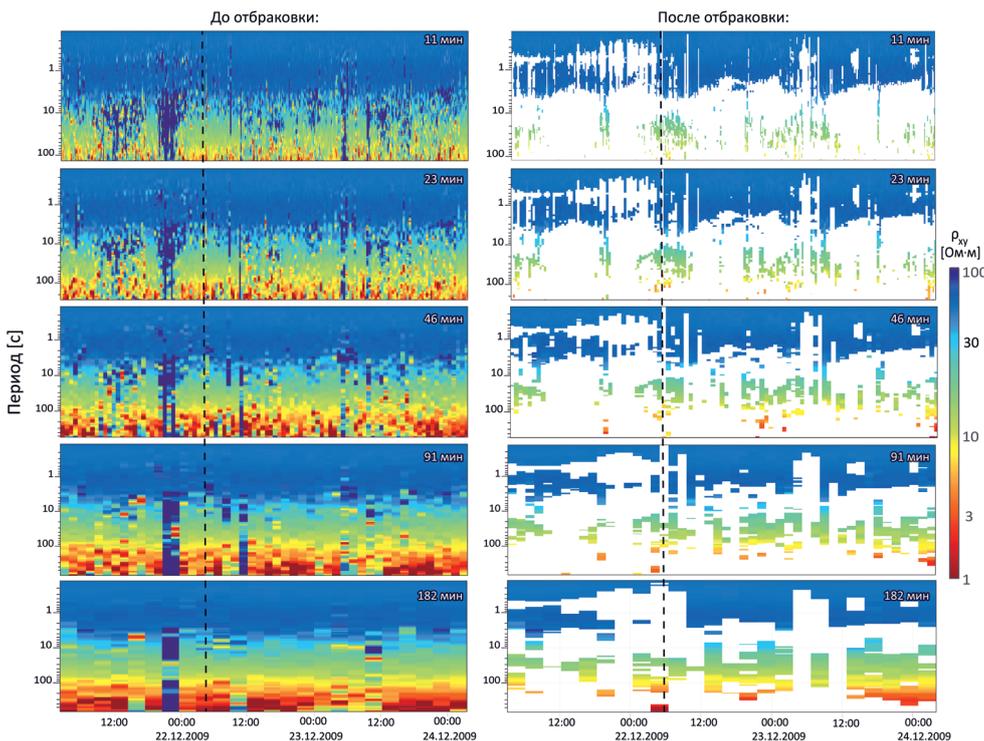


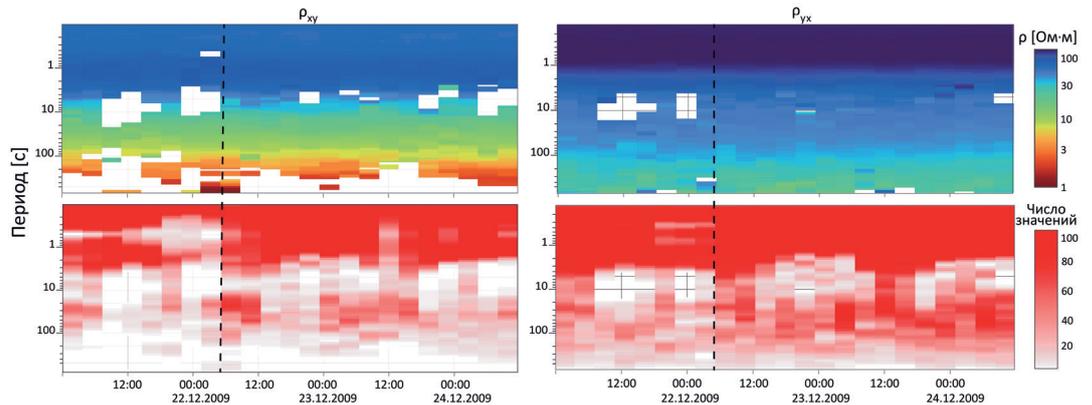
Рис. 7

Временные развертки синхронных оценок ρ_{xy} -компоненты кажущегося сопротивления в п. KMB, полученные с использованием данных в удаленном п. AKS;

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 (см. подпись к рис. 6); пунктирной линией обозначен момент взрыва

Рис. 8

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



сти методики анализа результатов МТ-мониторинга, основанной на изучении стационарных оценок импеданса и временной изменчивости частных оценок кажущихся сопротивлений для серии окон различной длительности. Выявлено существенное влияние локальных ЭМ-шумов на одноточечные оценки и заметные преимущества синхронного оценивания. В результате сопоставления стационарных оценок, полученных до и после взрыва, определены весьма малые расхождения, в большинстве своем не превышающие погрешностей оценивания.

Построение временных разверток (псевдоразрезов) изменения частных оценок импеданса наглядно показало возможности применения критериев отбраковки элементов данных, искаженных ЭМ-помехами, и выделения их достоверных частей. Анализ результатов мониторинга, прошедших отбраковку и осреднение, не выявил значимых изменений геоэлектрической структуры, проявляющихся в данных импеданса и вызванных взрывом.

Представленная в статье технология может быть рекомендована к применению на практике для повышения надежности анализа данных МТ-мониторинга. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости 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_мол_а) и в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН № 0144-2019-0021. Авторы благодарны сотрудникам ИС РАН в г. Бишкеке, прежде всего Е.А. Баталевой и А.К. Рыбину, за возможность использования МТ-данных, полученных в период Камбаратинского взрыва, и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Годовые вариации электромагнитного поля земли и электропроводности геологической среды // Физика Земли. 2013. № 2. С. 40–54. doi:10.7868/S0002333713020051.
6. Московская Л.Ф., Копытенко Ю.А., Хаякава М. Магнитотеллурический и сейсмический мониторинг в зоне субдукции Японии // Вопросы геофизики. Вып. 43. СПб. 2010 (Ученые записки СПбГУ. № 443). С. 108–125.
7. Потапов В.В., Поснеева Е.В. Электромагнитный 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.
8. 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.
9. Caldwell G.T., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. V. 158(2). P. 457–469. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x.
10. 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.
11. 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.
12. Peacock J.R., Thiel S., Reid P., Heinson G. Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: example from an enhanced geothermal system // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39(18). L18403. doi:10.1029/2012GL053080.
13. Utada H., Shimizu H., Ogawa Y., et al. Geomagnetic field changes in response to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami // Earth Planet. Sci. Lett. 2011. V. 311(1–2). P. 11–27. doi:10.1016/j.epsl.2011.09.036.

14. *Ladanivsky B., Zlotnicki J., Reniva P., Alanis P.* Electromagnetic signals on active volcanoes: analysis of electrical resistivity and transfer functions at Taal volcano (Philippines) related to the 2010 seismovolcanic crisis // *J. Appl. Geophys.* 2018. V. 156. P. 67–81. doi: 10.1016/j.jappgeo.2017.01.033.

15. *Sokolova E.Yu., Varentsov Iv.M., EMTESZ-Pomerania WG.* RRMС technique fights highly coherent EM noise in Pomerania // *Protokoll uber das 21 Kolloquium “Eiektromag-*

netische Tiefenforschung. Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges. 2005. P. 124–136.

16. *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>.

REFERENCES

1. *Bataleva EA, Batalev VYu, Rybin AK.* On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes. *Izv., Phys. Solid Earth.* 2013; 49: 402–410 (in Russian).

2. *Varentsov Iv.M, Sokolova EYu, Martanus ER et al.* System of EM field transfer operators for the BEAR array of simultaneous soundings: methods and results. *Izv., Phys. Solid Earth.* 2003; 39 (2): 118–148 (in Russian).

3. *Varentsov IM, Sokolova EYu. BEAR WG.* Diagnosis and suppression of auroral distortions in the transfer operators of the EM field in the BEAR experiment. *Izv., Phys. Solid Earth.* 2003; 39(4): 21–48 (in Russian).

4. *Klymkovych TA, Horodysky YuM, Kuznetsova VG, Maksymchuk VYu.* Investigation of time changes of parameters of induction vectors in the Transcarpathian active zone. *Geophys. Zhurn.* 2009; 31(6): 147–152 (in Russian).

5. *Moroz YF, Moroz TA.* Annual variations in the electromagnetic field of the earth and electrical conductivity of the geological environment. *Izv., Phys. Solid Earth.* 2013; 49: 191–204 (in Russian).

6. *Moskovskaya LF, Kopytenko YuA, Hayakawa M.* Magnetotelluric and seismic monitoring in the subduction zone of Japan. *Geophysics Issues.* Issue 43. St. Petersburg. 2010. (Scientific notes of St. Petersburg State University. No. 443). P. 108–125 (in Russian).

7. *Potapov VV, Pospeeva EV.* Electromagnetic monitoring using the MTS method in the epicentral zone of the Chui earthquake. *Interexpo GEO-Siberia-2017. XIII Int. sci. Congress (Novosibirsk, April 17–21, 2017): Int. sci. conf. «Subsoil use. Mining. Search and exploration of mineral deposits. Economics. Geocology»:* Materials in 4 vol. 2017. V. 3. P. 167–171 (in Russian).

8. *Rokityansky II, Tregubenko VI, Babak VI, Tereshin AV.* Variation of the induction component and the horizontal tensor

before the Tohoku earthquake on March 11, 2011 according to Japanese geomagnetic observatories. *Geofiz. Zhurn.* 2013; (3): 15–130 (in Russian).

9. *Caldwell GT, Bibby HM, Brown C.* The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. Int.* 2004; 158(2): 457–469.

10. *Chave AD, Thomson DJ.* Some comments on MT response function estimation. *J. Geophys. Res.* 1989; 94(B10): 14215–14225.

11. *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; (58): 981–991.

12. *Peacock JR, Thiel S, Reid P, Heinson G.* Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: example from an enhanced geothermal system. *Geophys. Res. Lett.* 2012; 39(18): L18403.

13. *Utada H, Shimizu H, Ogawa Y et al.* Geomagnetic field changes in response to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011; 311(1–2): 11–27.

14. *Ladanivsky B, Zlotnicki J, Reniva P, Alanis P.* Electromagnetic signals on active volcanoes: analysis of electrical resistivity and transfer functions at Taal volcano (Philippines) related to the 2010 seismovolcanic crisis. *J. Appl. Geophys.* 2018; (156): 67–81.

15. *Sokolova EYu, Varentsov Iv.M. EMTESZ-Pomerania WG.* RRMС technique fights highly coherent EM noise in Pomerania. *Protokoll uber das 21 Kolloquium “Eiektromagnetische Tiefenforschung.* Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges. 2005. P. 124–136.

16. *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.

Положительная рецензия 14.07.2020

ОБ АВТОРАХ



ВАРЕНЦОВ
Иван Михайлович

Кандидат физико-математических наук. Директор Центра геоэлектромагнитных исследований – филиала Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Заведует в нем лабораторией магнитотеллурических исследований. Автор ряда передовых методик моделирования, обработки и совместной интерпретации данных МТ- и МВ-зондирования. Опубликовал более 150 научных работ.



ЛОЗОВСКИЙ
Илья Николаевич

Научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончил геологический факультет МГУ в 2012 г. и аспирантуру ИФЗ РАН в 2015 г. Занимается различными аспектами методических и прикладных исследований в области обработки и интерпретации данных ЭМ-зондирования. Автор более 40 научных работ.



РОДИНА
Татьяна Андреевна

Научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончила геологический факультет МГУ в 2015 г. и аспирантуру ИФЗ РАН в 2019 г. Занимается задачами обработки данных МТ/МВ-зондирования и ЭМ-мониторинга в активных геодинамических регионах.