

# ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА PRC\_MTMV ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СИНХРОННЫХ МТ/МВ ЗОНДИРОВАНИЙ

Варенцов Ив.М.

*Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Троицк; ivan\_varentsov@mail.ru*

## Абстракт

Представляется программная система PRC\_MTMV, реализующая алгоритмы многоточечной обработки синхронных МТ/МВ данных, разработанные в ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Кратко рассматриваются ее структура, функциональное наполнение и методические основы. Приводятся примеры ее работы в различных приложениях.

**Ключевые слова:** магнитотеллурический и магнитовариационный методы, синхронные зондирования, анализ временных рядов, гармонический анализ, оценивание передаточных функций, многомерная отбраковка и осреднение оценок, робастные методы

## Введение

С внедрением в 70-х годах цифровых регистрирующих систем с высокоточной синхронизацией пришло понимание важности синхронных наблюдений для подавления помех в традиционных магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) зондированиях. Технологии двухточечных зондирований с удаленной базой ("remote reference", RR) [Gamble et al., 1979] стали мощным средством борьбы с систематическими искажениями локальных передаточных операторов - импеданса и типпера. В результате для "шумных" записей точность оценивания в синхронных системах существенно возросла. Кроме того, появилась возможность массового вовлечения в интерпретацию дополнительных синхронных передаточных операторов – прежде всего, горизонтального МВ отклика.

Большинство современных подходов к оцениванию передаточных операторов основаны на принципах обобщенного гармонического анализа и робастных методах линейного оценивания в частотной области [Семенов, 1985; Egbert, 2002]. Для прошедших препроцессинг записей ЭМ поля ведется последовательный Фурье-анализ отрезков МТ процесса и накопление линейных уравнений (связывающих спектральные компоненты ЭМ полей) по серии отрезков для каждого интервала периодов оценивания. Накопленные сильно избыточные системы линейных уравнений решаются целиком, либо по частям с последующим усреднением.

Такой подход последовательно реализуется в разработанной в ЦГЭМИ ИФЗ РАН программной системе PRC\_MTMV [Варенцов и др., 2003; Varentsov, 2005, 2007], обеспечивающей совместное помехозащищенное оценивание импеданса, типпера, горизонтального МВ отклика по синхронным МТ/МВ записям в серии точек наблюдения. В начале 2014 г. основные компоненты данной системы станут доступными для свободного использования при академических исследованиях.

## Структура программной системы PRC\_MTMV

Система PRC\_MTMV состоит из двух основных интерактивно-графических модулей, выполняющих оценивание и анализ передаточных операторов, и серии утилит, обеспечивающих импорт первичных данных (временных рядов, частотных характеристик, параметров записей ЭМ поля наблюдения) с различных измерительных платформ (Phoenix, LEMI, GEOMAG, INTERMAGNET и др.) во внутренние форматы системы, их препроцессинг, постпроцессинг, преобразование результатов оценивания из внутреннего формата FTF в форматы EDI, IDE и TAB, а также реализацию ряда других сервисных функций.

В частности, в систему входят следующие модули :

- LEM2PRC – утилита импорта данных длиннопериодной аппаратуры LEMI,
- PHO2PRC – утилиты импорта данных разведочной аппаратуры Phoenix,
- IAGA2PRC – утилита импорта обсерваторских МВ данных INTERMAGNET.ORG,
- CHDR – утилита контроля частотных характеристик аппаратуры,
- PRC\_B – подсистема визуализации и препроцессинга МТ/МВ временных рядов,
- PRC\_MRR – основная подсистема робастного многоточечного оценивания МТ/МВ передаточных операторов,
- TF\_MON – основная подсистема визуализации, осреднения и инвариантного анализа передаточных операторов,
- EDI2FTF - утилиты трансформации результатов оценивания передаточный операторов в форматах EDI в формат FTF,
- FTF2EDI – утилиты экспорта результатов обработки в формат EDI,
- FTF2TAB, FTF2IDE – утилиты экспорта результатов обработки в табличные форматы,
- TAB2GMT – утилита экспорта результатов обработки из табличного формата в форматы системы GMT для ГИС-представления передаточных операторов и их инвариантов,
- FTF2DPR – утилита экспорта результатов обработки вдоль профиля в формат подсистемы 2D+ инверсии.

Программная система PRC\_MTMV распространяется в виде набора исполняемых модулей, работающих в последних версиях Windows (от Win XP и выше) и сопровождается обширной документацией с разнообразными примерами.

Опытная эксплуатация системы PRC\_MTMV в течение нескольких лет ведется в ИО РАН и в ряде академических институтов и университетов Китая и Украины.

## Благодарности

Подготовка программной системы PRC\_MTMV к свободному распространению ведется при частичной поддержке грантов РФФИ 11-05-12030\_офим и 13-05-12094\_офим. Автор благодарен Н.Г. Голубеву, Е.Ю. Мартанус, К.В. Наливайко, В.Ю. Семенову, М.Ю. Смирнову, Е.Ю. Соколовой и Т. Эрнсту за полезные обсуждения и участие в разработке и опробовании элементов данной системы.

## Литература

- Варенцов Ив.М.** Массивы синхронных ЭМ зондирований: методы построения и анализа // ЭМ исследования земных недр. М.: Научный мир. 2005. С. 143-156.
- 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., Ковачикова С., Куликов В.А. и др.** Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 90-107.
- Варенцов Ив.М., Корья Т., Смирнов М.Ю. и др.** Эксперимент BEAR - синхронное ЭМ зондирование Балтийского щита и его передаточные функции // Стрoение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. М.: Геокарт. 2006. С. 79-94.
- Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. и др.** Генерация синтетических серий МТ данных // Физика Земли. 1994. №6. С. 80-88.
- 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.
- Семенов В.Ю.** Обработка данных МТ зондирования. М.: Недра. 1985. 133 с.
- Egbert G.D.** Processing and interpretation of EM induction array data // Surv. Geophys. 2002. V. 23. P. 207-249.
- Ernst T., Sokolova E.Yu., Varentsov Iv.M., Golubev N.G.** Comparison of two MT data processing techniques using synthetic data sets // Acta Geophys. Pol. 2001. V. 49(2) . P. 213-243.
- Gamble T.D., Goubau W.M., Clarke J.** Magnetotellurics with a remote magnetic reference // Geophysics. 1979. V. 44. P. 53-68.
- Varentsov Iv.M.** Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis // EM sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40). New York: Elsevier. 2007. P. 263-277.
- Varentsov Iv.M., EMTESZ-Pomerania WG.** Method of horizontal MV sounding: techniques and application in the EMTESZ-Pomerania project // Protokoll über das 21 Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung" (Eds. O. Ritter, H. Brasse). Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges., 2005. P. 111-123.
- Varentsov Iv.M., Sokolova E.Yu., EMTESZ-Pomerania WG.** The magnetic control approach for the reliable estimation of transfer functions in the EMTESZ-Pomerania project // Study of geological structures containing well-conductive complexes in Poland. Publ. Inst. Geoph., Pol. Acad. Sci. C-95(386). 2005. P. 67-80.

## Важнейшие методические аспекты

Методика оценивания передаточных операторов основана на получении частных оценок (как RR, так и однотоочечных, SS) для отдельных отрезков (окон) записей, их отбраковке/взвешивании по когерентностным и иным критериям. Оценивание ведется независимо для набора окон увеличивающейся длины и серии удаленных точек с последующим многоуровневым робастным осреднением (**первичным** - прошедших отбраковку частных оценок для окна фиксированной длины, **многочисленным** - итоговых результатов для разных окон и **мульти-RR** - результатов для разных RR точек) [Варенцов и др., 2003; Варенцов, 2005; Varentsov, 2007]. Использование длинных окон (в сотни тысяч и миллионы дискретов) дает возможность детального анализа спектров ЭМ поля. Отбраковка частных SS- и RR-оценок ведется в случаях низкой множественной когерентности (низком качестве линейных связей) и высокой входной когерентности (сильной линейной поляризации магнитных каналов), как для отдельных периодов ("локальная" отбраковка), так и в среднем для всего диапазона периодов оценки ("глобальная") [Ernst et al., 2001; Варенцов и др., 2003]. Исключение отрезков с интенсивным низко когерентным шумом облегчает настройку методов робастного осреднения на выделение высоко когерентного МТ сигнала.

Высокая точность алгоритмов оценивания передаточных операторов в системе PRC\_MTMV продемонстрирована на серии синтетических тестов в рамках международного проекта COMDAT [Варенцов, Соколова, 1994; Ernst et al., 2001].

Метод мульти-RR оценивания с когерентностными критериями отбраковки получил широкую апробацию при определении импедансов и типперов в масштабном эксперименте BEAR (рис. 1,3) в сопоставлении с лучшими российскими и зарубежными аналогами [Варенцов и др., 2003, 2006]. В каждом пункте BEAR было использовано от 3-4 до 9 RR точек, удаленных под разными азимутами на 100-1000 км. Такая схема обработки данных позволила не только подавить инструментальные и промышленные помехи на коротких периодах, но и повысить устойчивость результатов в длинопериодном диапазоне. Во всех случаях отмечались устойчивость горизонтальных линейных связей магнитного поля и некоррелированность шумов.

На территориях, насыщенных индустриальными объектами с высоким электропотреблением, распространение ЭМ помех имеет обычно региональный характер в масштабе десятков и даже первых сотен км с уровнем пространственной когерентности шумов не хуже, а порой и лучше, чем для МТ сигнала. Тогда выбор удаленных точек сложен, а критерии когерентностной отбраковки малоэффективны. В этом случае в системе PRC\_MTMV применяются дополнительные критерии отбраковки, основанные на контроле пространственной структуры горизонтального МВ поля ("магнитном контроле", MC) в ходе анализа оценок горизонтального МВ оператора между точкой зондирования и RR точками. При этом учитываются различия между плавностью пространственных изменений горизонтальных МВ полей от МТ источника и их резкостью для близких возбудителей помех – электрических диполей, имеющих другой импеданс по сравнению с плоской волной.

При оценивании импеданса и типпера используются MC критерии "предельной изменчивости", "взаимности", "высокой когерентности" частных оценок горизонтального МВ отклика и "предельной амплитуды" типпера [Варенцов, 2005; Varentsov, 2007]. Таким образом, ведется совместный анализ всех трех передаточных операторов. MC критерии отбраковки позволяют эффективно определять и сам горизонтальный МВ отклик по двухточечной MC схеме [9], в то же время RR-оценивание здесь требует трех синхронных точек (основной, базовой и удаленной).

Алгоритм RRMC оказался весьма эффективным в целом ряде регионов с высоким уровнем промышленных шумов. В частности, он позволил подавить интенсивные помехи от железных дорог и других индустриальных объектов при проведении синхронных зондирований (длиннопериодных и разведочных) в СЗ Польше и СВ Германии (рис. 2,4,5) [Varentsov, 2005, 2007; Varentsov, Sokolova, 2005], на ЮЗ России и в северной Украине [Варенцов и др., 2012]. Для увеличения числа RR точек в этих исследованиях активно использовались МВ наблюдения в ближних геомагнитных обсерваториях.

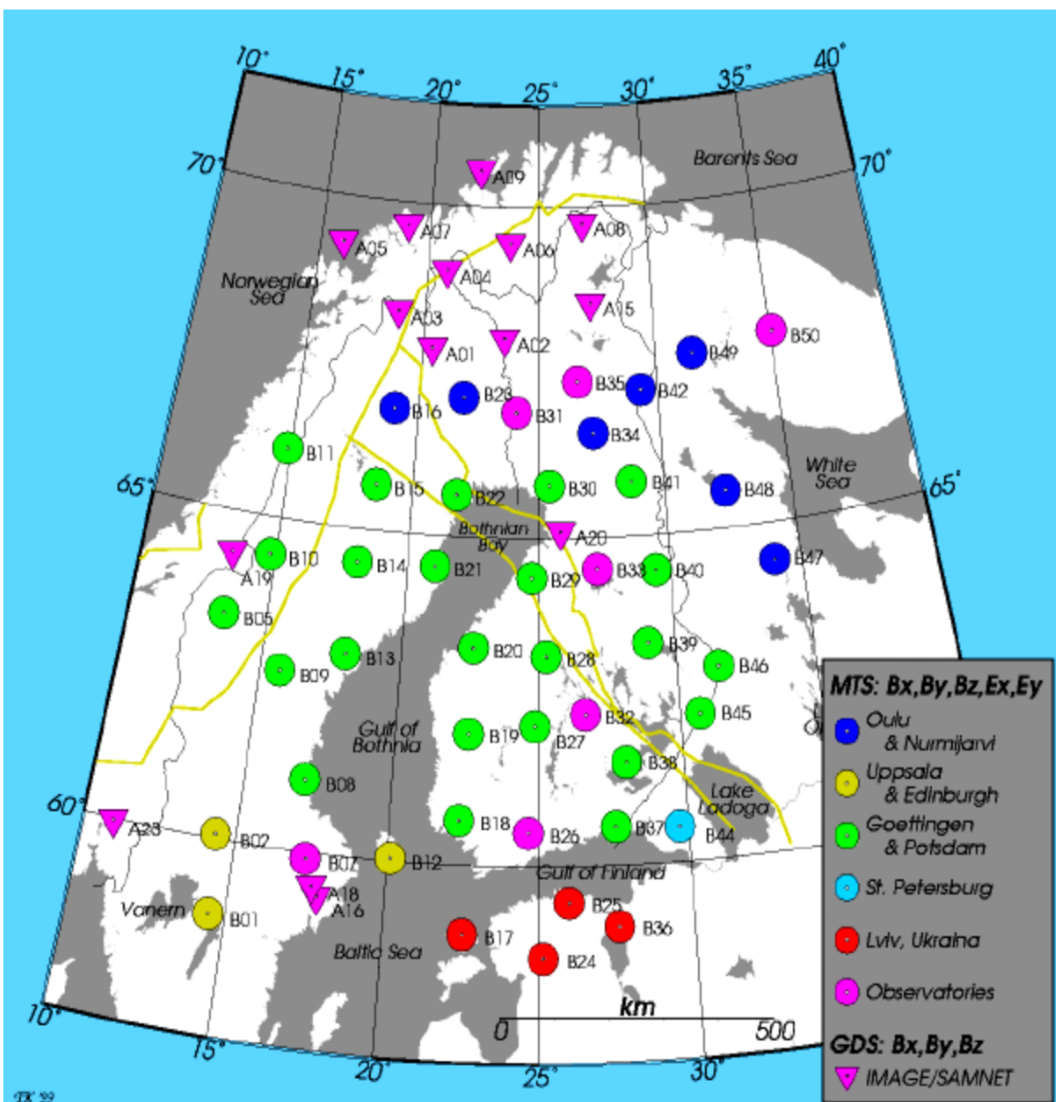


Рис. 1. Структура синхронного массива ЭМ зондирований BEAR (1998)

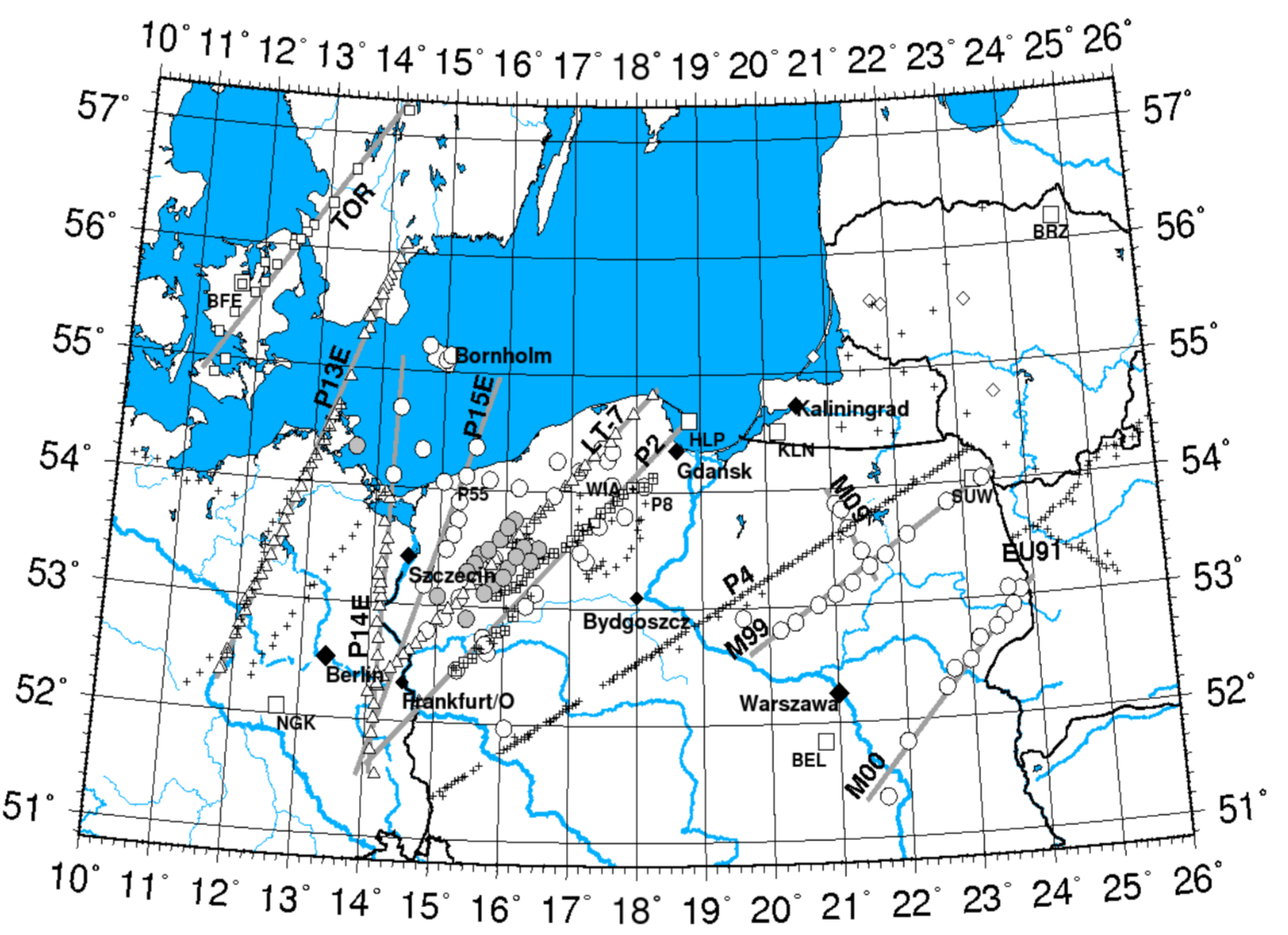


Рис. 2. Структура синхронного массива ЭМ зондирований EMTESZ-Pomerania (1999-2013)

## Приложения в эксперименте BEAR

Метод мульти-RR оценивания с когерентностными критериями отбраковки получил широкую апробацию при определении импедансов и типперов в масштабном эксперименте BEAR. В каждом пункте BEAR было использовано от 3-4 до 9 удаленных точек, расположенных под разными азимутами на удалениях от 100 до 1000 км (рис. 1).

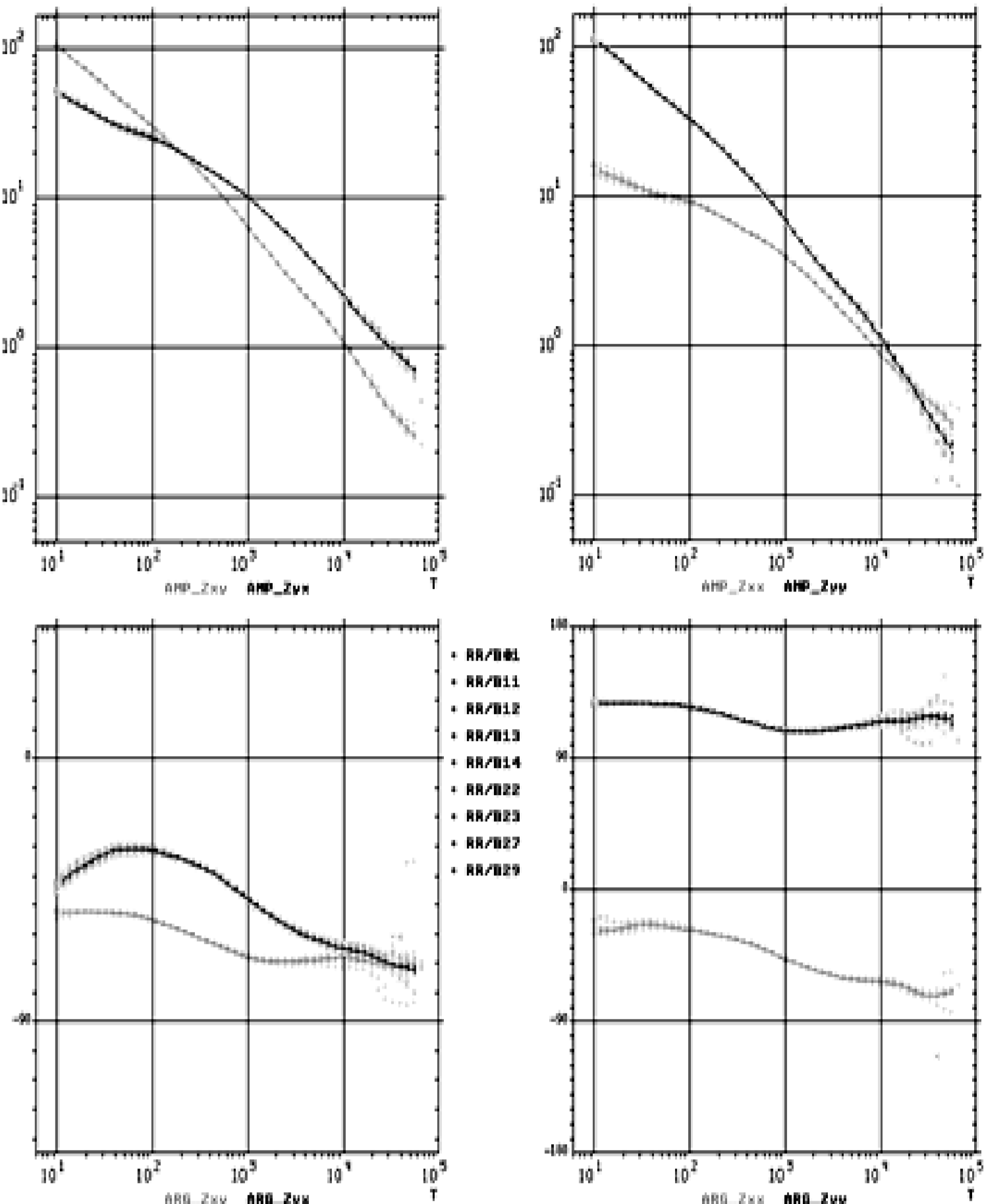


Рис. 1. "Облака" RR оценок импеданса в т. B02 (центральная Швеция) эксперимента BEAR для серии из 9 удаленных пунктов (в 100-900 км, названия - в легенде) и построенная путем их робастного осреднения мульти-RR оценка (сплошные кривые): вверху – амплитуды главных (слева) и дополнительных (справа) компонент, внизу – аналогичные фазовые оценки. Все RR оценки обеспечивают подавление больших систематических искажений, наблюдаемых при SS оценивании компонент Z<sub>yx</sub> и Z<sub>xy</sub> на периодах до 300-1000 с, но на периодах выше 10000 с мульти-RR осреднение позволяет преодолеть разброс отдельных RR оценок..

## Приложения в эксперименте EMTESZ-Pomerania

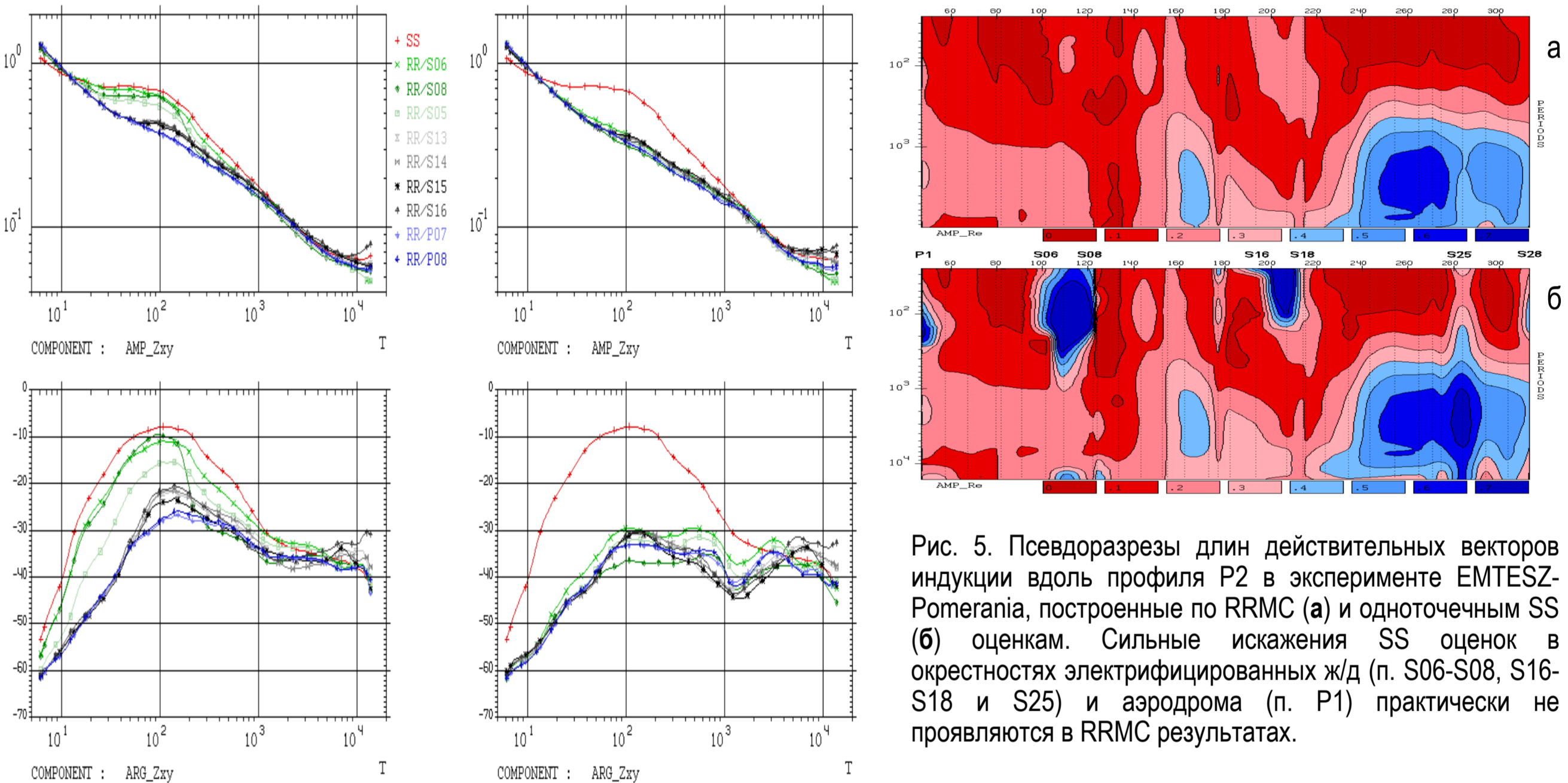


Рис. 4. Синхронное определение импеданса Z<sub>xy</sub> в п. S07 на профиле P2 эксперимента EMTESZ-Pomerania, расположенной в 10 км от ж/д электрифицированной на постоянном токе: слева - стандартные RR оценки для серии удаленных точек (S06, S08 и S05 в 9, 14 и 18 км, S13-S16 - в 60-90 км и P07, P08 - в 160 и 195 км), справа – более эффективные RRMC оценки, для сравнения красным показаны сильно искаженные однотоочечные (SS) оценки; вверху - амплитуда, внизу - фаза. При RRMC оценивании обеспечивается существенное подавление шумов для всех рассмотренных RR-точек, даже самых ближних, а надежные результаты получаются при удалении в первые десятки км, в то время как в стандартной схеме приходится относить RR точку далее 150 км, что сильно ограничивает возможности мульти-RR осреднения.

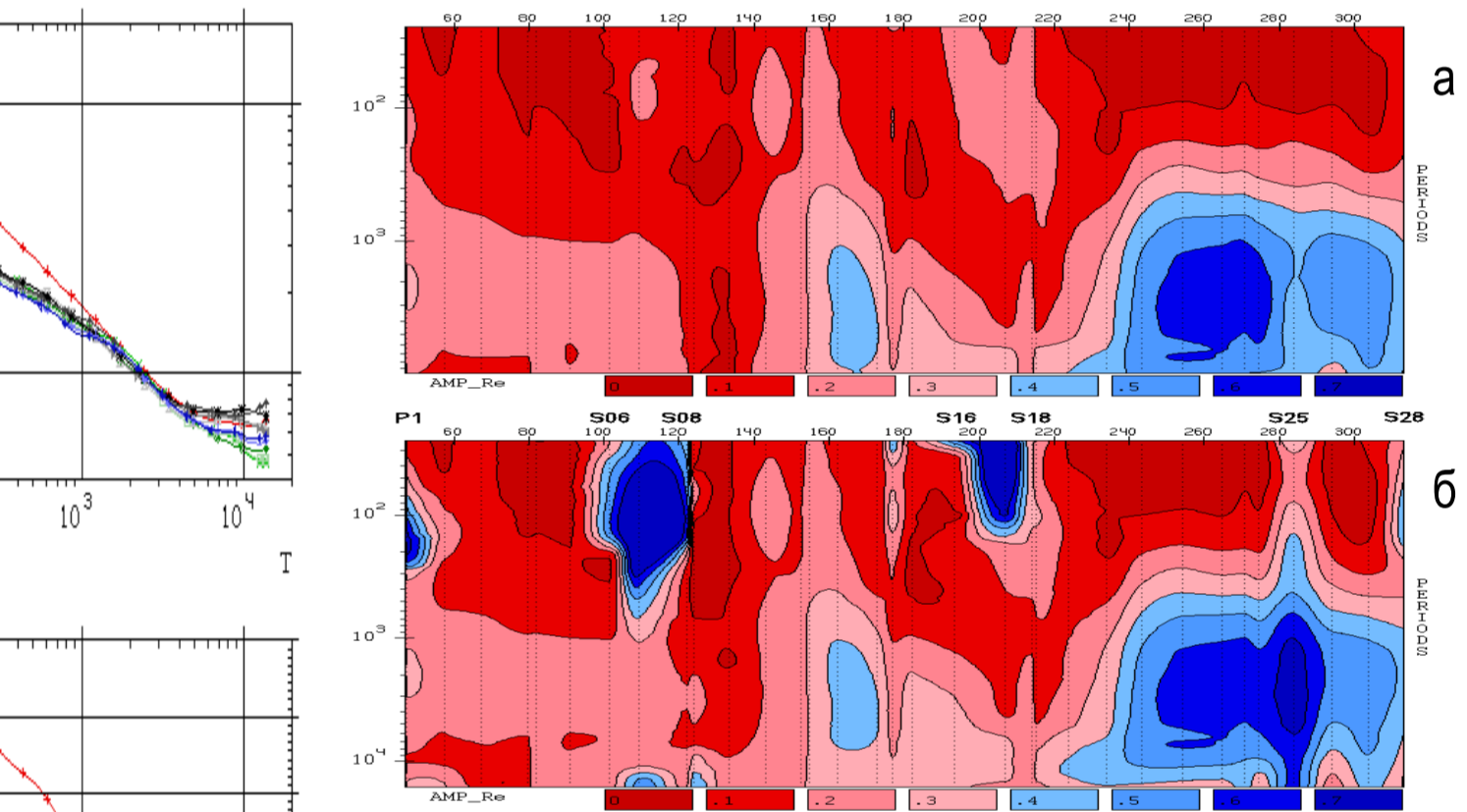


Рис. 5. Псевдорезрезы длин действительных векторов индукции вдоль профиля P2 в эксперименте EMTESZ-Pomerania, построенные по RRMC (а) и однотоочечным SS (б) оценкам. Сильные искажения SS оценок в окрестностях электрифицированных ж/д (п. S06-S08, S16-S18 и S25) и аэродрома (п. P1) практически не проявляются в RRMC результатах.