

## Массив синхронных МТ/МВ зондирований EarthScope: многоточечное оценивание и анализ передаточных операторов в активном регионе северо-запада США

Д.А. Грачева, Ив.М. Варенцов, И.Н. Лозовский  
ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк, mckoreneva@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

В докладе представлены результаты обработки данных массива синхронных магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) зондирований программы EarthScope с использованием разработанной в ЦГЭМИ ИФЗ РАН программной системы PRC\_MTMV. Примененная методика позволила получить надежные оценки импеданса и типпера, превосходящие по качеству имеющиеся результаты американской синхронной обработки. Важнейшим результатом стала апробация процедур оценивания горизонтальных МВ откликов, свободных от приповерхностных гальванических искажений и обеспечивающих прямое картирование глубинных проводящих структур. Подготовлен новый массив данных МВ передаточных операторов для последующей многокомпонентной инверсии.

**Ключевые слова:** магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования, передаточные операторы, робастное оценивание, программа EarthScope, проект EMScope.

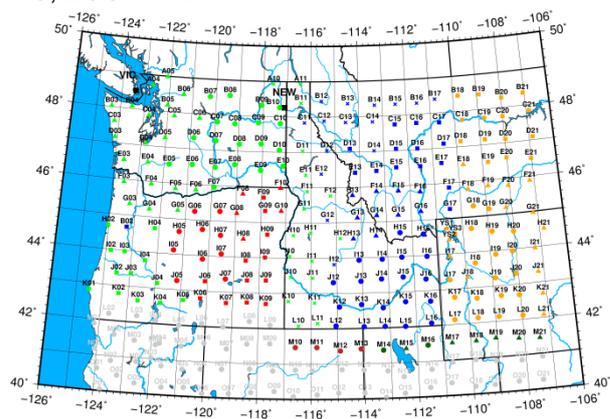
### ВВЕДЕНИЕ

EarthScope является многолетней национальной программой США по изучению глубинного строения и динамики континента Северной Америки, открытой для мирового научного сообщества (Kelbert et al., 2018). В ее рамках реализуется проект EMScope площадных синхронных МТ и МВ зондирований с целью изучения геоэлектрической структуры континентальной тектоносферы. В проекте EMScope синхронно для кластеров, включающих первые десятки зондирований, ведутся измерения пяти компонент естественного электромагнитного (ЭМ) поля Земли. Наблюдения выполняются с секундной дискретизацией в течение 3-6 недель с помощью нового поколения американской длиннопериодной аппаратуры (Kelbert et al., 2018). Сеть наблюдений – квазирегулярная, с расстояниями между зондированиями ~100 км.

Основными задачами первого этапа наших исследований являлись апробация разработанных в ЦГЭМИ ИФЗ РАН методов обработки синхронных МТ/МВ данных в сопоставлении с имеющимися американскими результатами на массивах данных, полученных с применением новой аппаратуры, получение оригинальных оценок горизонтальных МВ откликов, отсутствующих у американской стороны, и подготовка массива данных для дальнейшей сводной 3D интерпретации совокупности МВ откликов (горизонтальных и типпера) с применением методов 3D инверсии.

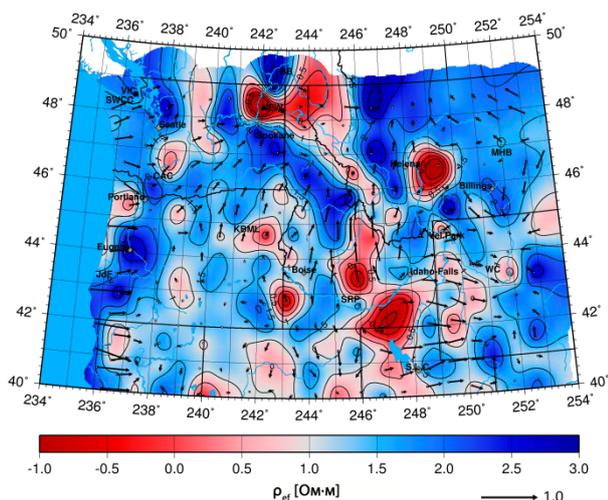
### СТРУКТУРА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МАССИВА ГЛУБИННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ EARTHSCOPE

Для обработки данных и их дальнейшего анализа был выбран массив из 225 МТ/МВ зондирований, выполненных в 2006-9 г. (рисунок 1), покрывающий территорию от прибрежных субдукционных геоэлектрических структур до области Йеллоустонского плюма. В исследовании использовались синхронные записи в четырех обсерваториях сети INTERMAGNET: NEW, VIC, BOU и FRN.



**Рисунок 1.** Обработанные нами синхронные МТ/МВ зондирования EMScope на СЗ США. Геофизические исследования в выбранном регионе чрезвычайно актуальны в связи с его крайне высокой геодинамической активностью, а важность применения метода глубинных ЭМ зондирований велика в связи с его высокой чувствительностью к корово-мантийным зонам флюидизации и частичного плавления.

По американским результатам синхронного оценивания импеданса и типпера (Kelbert et al., 2018), полученным по методике (Egbert, 2002), построена карта эффективного кажущегося сопротивления с наложенными действительными векторами индукции для периода 2048 с (рисунок 2). Эта карта отражает как наиболее глубокие корово-мантийные проводящие структуры (SRP, Snake River Plain; MHB, Medicine Hat Block; CAC, Cascades Arc Conductor), так и менее глубокие коровые и осадочные (BB, Belt Basin; KBML, Klamath-Blue-Mountains Lineament и др. – названия даны по (Kelbert et al., 2020)). Индукционные векторы отчетливо выделяют структуры SRP, MHB и KBML, а также показывают сложную суперпозицию океанического берегового эффекта и откликов континентальных аномалий в зоне субдукции плиты JdF, Juan-de-Fuca (Варенцов и др., 1996; Ваньян и др., 2002; Kelbert et al., 2020).



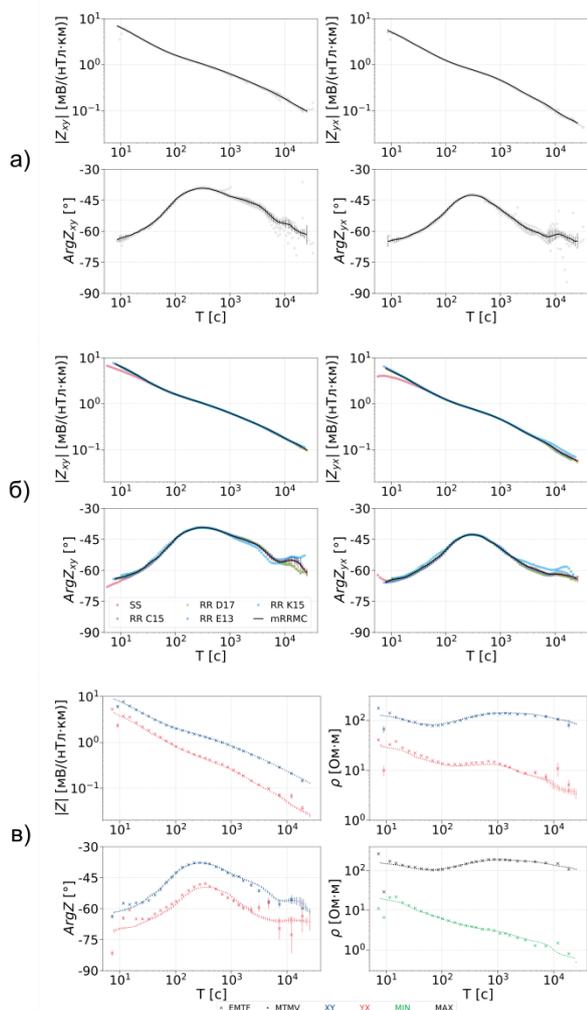
**Рисунок 2.** Карта эффективного кажущегося сопротивления ( $\Omega \cdot \text{м}$ , lg-масштаб) с наложенными векторами индукции ( $R_e$ , в конвенции Визе) для периода 2048 с (по данным (Kelbert et al., 2018)); названия структур – по (Kelbert et al., 2020).

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Последовательное применение мульти-RRMC технологии (Варенцов и др., 2003; Varentsov, 2015) продемонстрируем в пункте зондирования D13, лежащем на севере массива вне ярких проводящих структур (рисунки 1, 2). На рисунке 3а показаны результаты многооконного осреднения для главных (антидиагональных) компонент импеданса  $\mathbf{Z}$  в геомагнитных координатах для RR оценки относительно п. D17, расположенного восточнее почти на 400 км. Итоговые амплитудные оценки получены с малыми погрешностями по данным для 11 различных временных окон фиксированной длины в общем

интервале периодов от 8 с до 6 часов. На рисунке 3б приведены результаты мульти-RRMC осреднения результатов для четырех удаленных точек (C15, D17, E13 и K15) и искаженной на коротких периодах SS оценки (красные кривые), учитываемой лишь для периодов  $>30$  с. В результате осреднения достигнуто заметное уменьшение погрешностей фаз на длинных периодах, особенно в ух компоненте. На рисунке 3в дано сопоставление (уже в географических координатах – с учетом восточного магнитного склонения на  $15.8^\circ$ ) наших и американских итоговых результатов.

Американские амплитудные кривые  $\mathbf{Z}$  теряют монотонность для периодов менее 30 с и более 3 часов, существенный разброс фазовых оценок также наблюдается до 30 с и уже после 2 часов. Российские оценки выглядят предпочтительнее в силу расширенного диапазона периодов оценивания, равномерного представления на логарифмической оси периодов, гладкости всех компонент и монотонности амплитуд. Отметим устойчивость и гладкость нашей оценки минимального кажущегося сопротивления в амплитудной инвариантной схеме Спица (Spitz, 1985), зависящей от всех элементов  $\mathbf{Z}$  и весьма существенной при выявлении глубоких проводящих аномалий. Еще несколько примеров сопоставления наших и американских результатов оценивания импеданса и типпера, а также особенности оценивания горизонтальных МВ откликов обсуждаются в работе (Варенцов и др., 2020). Полученные результаты мульти-RRMC оценивания показывают, что данная технология обеспечивает надежное получение кондиционных результатов импеданса и горизонтального МВ отклика до периодов 4-6 часов и типпера до периодов около 3 часов, позволяя зондировать тектоносферу до глубин  $\sim 300$  км.



**Рисунок 3.** Главные компоненты  $Z$  в п. D13: **а** – многооконное осреднение при RR оценивании с удаленным п. D17; **б** – мульти-RRMC осреднение оценок SS и RR (для 4 пунктов); **в** – сопоставление мульти-RRMC оценки (MTMV) со стандартной американской RR оценкой (EMTF), справа добавлены кривые кажущегося сопротивления (в осях наблюдения и экстремальные – в амплитудной декомпозиции (Spitz, 1985)); штрихами показаны погрешности оценок.

### СТРУКТУРА ПОЛУЧЕННОГО МАССИВА МВ ОТКЛИКОВ

При работе с данными зондирований EMScope особое внимание уделялось оцениванию горизонтальных МВ откликов  $M$ , поскольку американская сторона их не получила. Операторы  $M$  связывают горизонтальные магнитные поля в точке зондирования с аналогичными полями в выбранной базовой точке кластера синхронных наблюдений, либо в близкой геомагнитной обсерватории (Varentsov, 2015). Обработанный нами массив данных EMScope состоял из 14 синхронных кластеров (рисунок 1), в среднем включающих ~20 зондирований. В каждом кластере выбраны локальные базовые пункты (BCi, где  $i$  – номер кластера), относительно

которых по секундным временным рядам определялись отклики  $M(Dxx, BCi)$  в оставшихся Dxx пунктах кластера. Оценивание велось независимо для серии временных окон фиксированной длины. Затем, как и для импеданса и типпера, выполнялось робастное осреднение результатов для серии окон.

Для каждой локальной базы кластеров получены оценки операторов  $M(BCi/VIC)$  и  $M(BCi/NEW)$  относительно ближних геомагнитных обсерваторий VIC и NEW. Эти определения велось уже по минутным записям – необходимые секундные обсерваторские записи 2006-8 г. в сети INTERMAGNET отсутствовали. Далее осуществлялся алгебраический пересчет всех оценок от локальных баз к избранным обсерваториям:

$$M(Dxx, VIC) = M(Dxx, BCi) * M(BCi, VIC),$$

$$M(Dxx, NEW) = M(Dxx, BCi) * M(BCi, NEW).$$

Для контроля точности проводилось сравнение оценок  $M(Dxx, VIC)$  и  $M(Dxx, NEW) * M(NEW, VIC)$ .

Аналогично производился пересчет оценок от обсерваторий к выбранной интерпретационной базе, поскольку наблюдения в NEW испытывают заметное влияние проводящей аномалии ВВ, расположенной севернее, а в данных VIC проявляется океанический береговой эффект и влияние аномалии SWCC (рисунок 2). Рассматривалось несколько возможных базовых пунктов на севере массива – предпочтение отдано п. C08 (рисунок 1).

Сводные массивы оценок горизонтального МВ отклика относительно обсерваторий VIC, NEW и интерпретационной базы C08, полученные в географических координатах для периодов от первых сотен секунд до 3 часов, стали первым примером подобных построений в практике эксперимента EMScope. Они, в комплексе с данными типпера, обеспечили новый взгляд на геоэлектрические структуры средней и нижней коры и верхней мантии, свободный от приповерхностных гальванических искажений. На рисунке 4 показаны важнейшие инварианты МВ откликов для периода 4096 с: карта максимальных амплитуд оператора  $M$  (относительно п. C08), эллипсы экстремальных амплитуд его аномальной части (повернутые на 90°) и векторы индукции (Re), построенные по данным типпера.

Положительные амплитудные аномалии указывают на глубинные проводящие объекты, длинные тонкие эллипсы в их пределах свидетельствуют об их квази-2D структуре, указывая простираение, а большие, но более изометрич-

ные эллипсы отмечают 3D структуры. Отчетливо выделяются четыре глубинные проводящих структуры: САС на СЗ, ВВ севернее обсерватории NEW, МНВ на СВ и SRP к ЮЗ от Айдахо Фоллз. Эллипсы и индукционные векторы уверенно трассируют прибрежную зону субдукции JdF в пределах и восточнее Берегового хребта.

В докладе будут также обсуждаться псевдо-разрезы компонент и инвариантов МВ данных для серии меридиональных профилей. Они детализируют структуру МВ откликов в окрестности пересекаемых аномалий SPR и МНВ.

### Выводы

Первым существенным результатом работы с материалами зондирований EarthScope стало сопоставление российских и американских синхронных оценок импеданса и типпера с демонстрацией преимуществ российских оценок этих операторов и подтверждении кондиционности большинства американских оценок.

Важнейшим результатом исследований является успешное опробование наших технологий оценивания горизонтальных МВ откликов в пределах синхронных кластеров зондирований, интеграции оценок для серии кластеров в единые массивы с опорой на данные геомагнитных обсерваторий и пересчет этих массивов к интерпретационной базе, удаленной от геоэлектрических аномалий. В ходе работы были построены карты важнейших инвариантов МВ данных и подготовлен сводный массив МВ данных для решения задач инверсии.

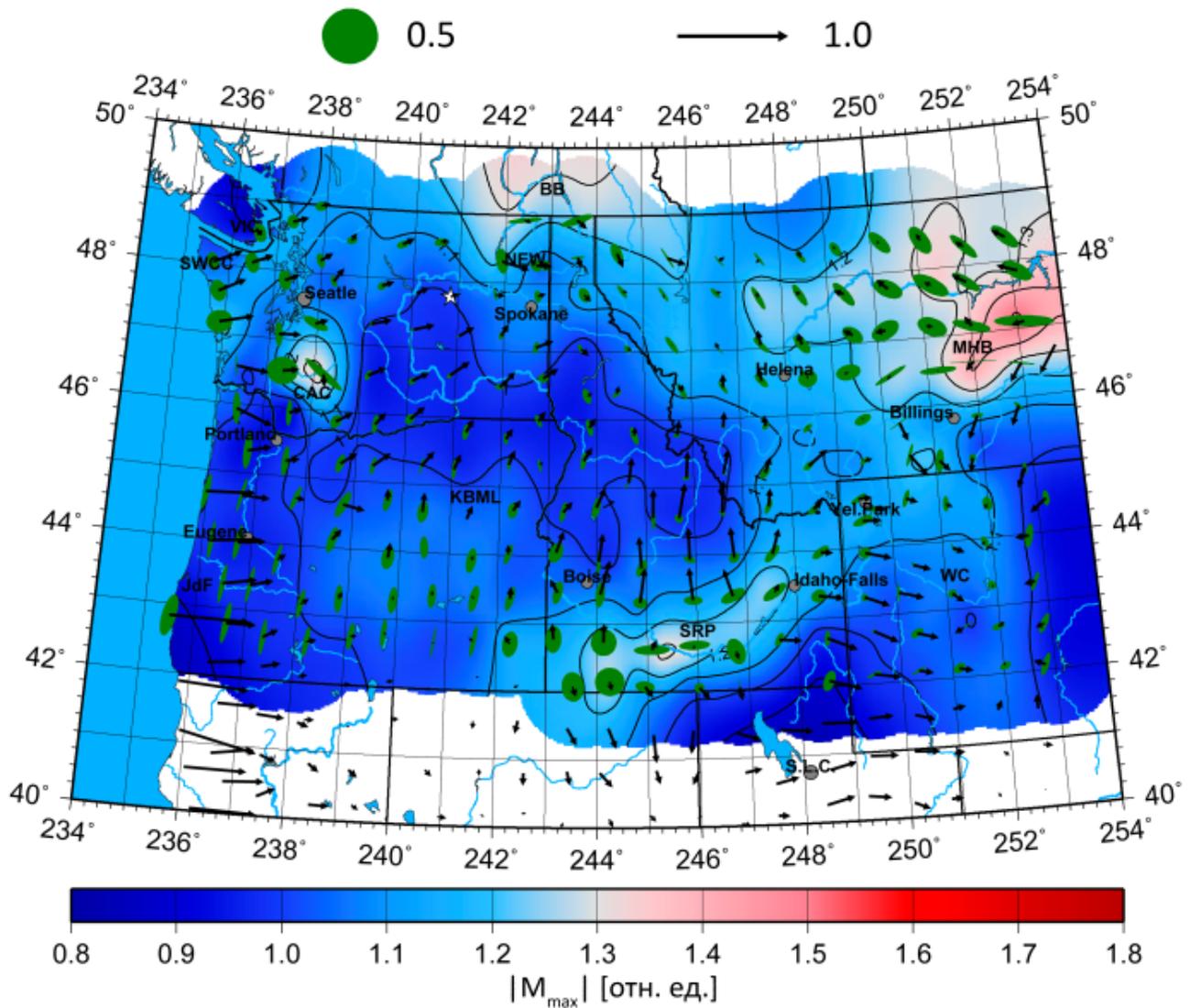
В рамках дальнейших исследований планируется проведение сводной квази-3D (многоплочной) инверсии ансамблей МВ откликов и последующей 3D инверсии всего комплекса МТ/МВ данных.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-35-00598\_мол\_а) и в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН №0144-2019-0021. Данные и средства работы с ними доступны на [www.earthscope.org](http://www.earthscope.org). Программа EarthScope поддержана Национальным научным фондом (NSF) США (гранты EAR-0323309, EAR-1851048). Благодарим сеть геомагнитных обсерваторий INTERMAGNET за возможность использования обсерваторских данных на западе США и Канады.

### ЛИТЕРАТУРА

- Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарев П.Ю. и др. Геоэлектрическая модель Каскадной зоны субдукции // *Физика Земли*. 2002. № 10. С. 23–53
- Варенцов Ив.М., Голубев Н.Г., Гордиенко В.В. и др. Исследование глубинной геоэлектрической структуры вдоль профиля Линкольн Лайн (эксперимент EMSLAB) // *Физика Земли*. 1996. № 4. С. 124–144
- Варенцов Ив.М., Грачева Д.А., Лозовский И.Н. Массив синхронных МТ зондирований EarthScope: методика многоточечного оценивания передаточных операторов в активном регионе Кордильер на северо-западе США // *Геофизика*. 2020. № 4. С. 50-57
- 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
- Egbert G.D. Processing and interpretation of the electromagnetic induction array data // *Surv. Geophys.* 2002. V. 23. P. 207–249
- Kelbert A., Erofeeva S., Trabant C. et al. Taking MT data out of the drawer // *Eos*. 2018. V. 99. doi:10.1029/2018EO112859
- Kelbert A., Bedrosian P., Murphy B. The First 3D conductivity model of the contiguous United States: reflections on geologic structure and application to induction hazards // *Geomagnetically induced currents from the sun to the power grid*. AGU. 2020. P. 127-151
- Spitz S. The MT impedance tensor properties with respect to rotations // *Geophysics*. 1985. V. 50(10). P. 1610-1617
- Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion // *EM Sounding of the Earth's Interior*, V. 40 (2<sup>nd</sup> Edition). Amsterdam: Elsevier. 2015. P. 271-299



**Рисунок 4.** Карта важнейших инвариантов МВ откликов для периода 4096 с: максимальные амплитуды оператора  $M$  (относительно п. С08), эллипсы экстремальных амплитуд его аномальной части (повернутые на 90°) и векторы индукции ( $Re$ ), построенные по типперу  $W_z$ ; масштабы эллипсов и векторов даны выше карты.