

Квази-3D моделирование ЭМ откликов приповерхностных геоэлектрических структур в пределах Воронежского массива и прилегающих осадочных бассейнов

Ив.М. Варенцов, И.Н. Лозовский, Э.Б. Файнберг

Центр геоэлектроманнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Троицк; ivan_varentsov@mail.ru

Аннотация

В области сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии), на обширной территории Воронежского массива, Украинского щита и прилегающих осадочных бассейнов в рамках проектов KIROVOGRAD и SMOLENSK выполнены масштабные площадные синхронные магнитотеллурические (MT) и магнитовариационные (MV) зондирования. Регион исследований характеризуется сильной интерференцией MT/MВ откликов (импеданса, типпера и горизонтального магнитного оператора) от приповерхностных токовых систем в осадочных структурах с суммарной проводимостью до нескольких тысяч См и глубинных токов, текущих в пределах линейных коровых проводников Кировоградской, Курской, Кирово-Барятинской и других аномалий. Наиболее сильно приповерхностные искажения проявляются в данных типпера.

Для проведения надежных глубинных геоэлектрических построений необходимы адекватные оценки структуры приповерхностных откликов. Простейший путь построения – сбор информации о приповерхностной продольной проводимости S региона, учитывая MT зондирования и другую доступную априорную информацию. Далее ведется квази-3D моделирование MT/MВ откликов в слоистой модели, включающей тонкую приповерхностную пленку с полученным неоднородным распределением S . В рамках представляемых исследований выполнено существенное уточнение распределения S для обширной области (45.5–57.0° с.ш., 26.0–45.0° в.д.). Использованы асимптотические оценки продольной проводимости по эффективному импедансу на периодах 1–64 с для сотен синхронных зондирований массива KIROVOGRAD+SMOLENSK и сопоставимого числа предшествующих локальных зондирований. За пределами охвата доступных ~800 зондирований использованы карты S для отдельных фрагментов области исследований на территориях России, Белоруссии и Украины. После медианного осреднения накопленных оценок и применения сглаживающих фильтров Гаусса значения S определены на сетке квадратных ячеек размером 5x5 км. Полученное распределение S использовано в качестве входных данных для квази-3D (плёночного) моделирования электромагнитных (ЭМ) полей и передаточных операторов. Слоисто-однородный нормальный разрез получен путем робастного осреднения и подбора длиннопериодных ($T > 1000$ с) эффективных импедансных кривых в областях с умеренной продольной проводимостью осадков ($S < 200$ См).

Адекватное представление поверхностных ЭМ аномалий достигается для периодов, превышающих первые сотни секунд. Полученные в результате квази-3D моделирования карты компонент ЭМ полей и инвариантов различных передаточных операторов отчетливо выделяют крупные тектонические структуры. Выполнена оценка интенсивности и изменчивости (в зависимости от пространственного положения и периода) приповерхностных откликов. В пределах каналов с максимальным уровнем S показана их высокая интенсивность для периодов до 1–2 часов. Сравнение MT/MВ откликов, полученных для зондирования массива KIROVOGRAD+SMOLENSK, с результатами выполненного плёночного моделирования позволяет районировать область исследований по соотношению интенсивностей приповерхностных и глубинных откликов и должным образом выстроить стратегию 2D/3D инверсии реальных данных.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, магнитотеллурические зондирования, осадочные бассейны, кристаллические массивы, суммарная продольная проводимость, нормальный разрез, квази-3D моделирование

Сводная карта приповерхностной продольной проводимости S для Воронежского массива и сопредельных территорий

Исследования, выполненные в 2018–20 г. в рамках проекта SMOLENSK (Варенцов и др., 2021а,б), позволили существенно расширить массив синхронных MT/MВ зондирований KIROVOGRAD (Варенцов и др., 2012; Алексанова и др., 2013; Куликов и др., 2018) на восток в сторону Белорусского массива и на север в пределы Московской синеклизы. Полученные результаты позволили заметно уточнить региональное распределение S в пределах Воронежского массива и сопредельных осадочных бассейнов. На рис. 1 показана карта S для СЗ части региона исследований, построенная по асимптотическим оценкам продольной проводимости по эффективному импедансу на периодах 1–64 с для сотен синхронных зондирований массива KIROVOGRAD+SMOLENSK и сопоставимого числа предшествующих локальных зондирований, выполненных в Белоруссии (Fainberg et al., 1998; Астапенко, Дубаневич, 2017) и на СЗ склоне Воронежского массива (силами Геологического ф-та МГУ и ООО «Северо-Запад» – Алексанова и др., 2013).

Вне пунктов асимптотических оценок S , показанных на рис. 2а для всей области сводных построений, были использованы данные с ранее подготовленных региональных карт приповерхностной S , учитывающих широкий комплекс электроразведочных материалов: России (Шейнман, 2008; Шейнман, Нарский, 2009) – рис. 2б; Украины (Байсарович и др., 1998; Rokityansky et al., 1999; Логвинов, 2015а,б) – рис. 2в; Белоруссии (Fainberg et al., 1998; Астапенко, 2012; Астапенко, Дубаневич, 2017) – рис. 2г. Дополнительные региональные данные не учитывались в окрестности пунктов асимптотических оценок и согласовывались в областях взаимного пересечения на границах России, Белоруссии и Украины. Далее вся совокупность оценок S была подвержена робастному медианному осреднению. Построенная сводная карта S представлена на рис. 3.

Дальнейшая трансформация полученного массива данных S для использования при решении задачи квази-3D (плёночного) моделирования ЭМ откликов приповерхностных геоэлектрических структур заключалась в его проекции на равномерную сетку в географических координатах с ячейками 5x5 км. Начало координат было выбрано в точке с координатами 52° с.ш./34° в.д. Проекция значений $\lg(S)$ на равномерную сетку велась методом триангуляции с линейной интерполяцией и умеренным сглаживанием фильтром Гаусса. На края сетки выполнена гладкая экстраполяция данных до постоянного периферийного уровня в 2000 См.

Итоговое распределение приповерхностной суммарной продольной проводимости показано на рис. 4. Значения S изменяются в широких пределах: от первых единиц в пределах Воронежского массива, Украинского щита и Белорусской антеклизы до >3000 См в Днепровско-Донецкой впадине, Рязано-Саратовском и Крестцовском влакогенах и в других периферийных областях. Карта существенно уточняет геоэлектрическую структуру Оршанской впадины, особенности ее сочленения со структурами Московской, Припятской и Днепровско-Донецкой впадин, а также контуры Воронежского массива на севере и востоке. Она позволяет с достаточной детальностью изучить структуру ЭМ откликов, связанных с токовыми системами в осадочных бассейнах региона исследований, и оценить влияния приповерхностных токовых систем на результаты глубинных зондирований.

Квази-3D (плёночное) моделирование ЭМ откликов приповерхностных геоэлектрических структур

Тонкая неоднородная пленка S дает простейшее приближение интегральной продольной проводимости неоднородного приповерхностного слоя ограниченной мощности h . Такая аппроксимация справедлива на относительно длинных периодах, для которых глубина проникновения ЭМ поля в несколько раз превышает величину h . В пределах региона исследований мощность приповерхностного проводящего слоя меняется от десятков и первых сотен метров на кристаллических массивах до 2–3 и более км в осадочных бассейнах. В среднем, величина h лежит в пределах 1–2 км. Соответственно, плёночная аппроксимация оправдана для периодов, превышающих первые десятки секунд. В области моделирования также должен сохраняться плоский характер падающей и распространяющейся в среде ЭМ волны – это требование ограничивает размеры области плёночного моделирования величиной ~2500 км.

В проведенных модельных расчетах использована программа SLPROG, основанная на общей теории ЭМ индукции в проводящих средах, состоящих из однородных слоев и неоднородных тонких пленок [Зингер, Файнберг, 1985; Fainberg, Singer, 1987]. Использована показанная ниже модель 1D нормального разреза геоэлектрической среды. Тонкая неоднородная пленка S лежит на глубине 2 км.

Глубина, км	Мощность, км	УЭС, Ом·см
0–2	2	100
2–3	1	300
3–10	7	1000
10–30	20	1000
30–50	20	1000
50–100	50	1000
100–200	100	400
200–300	100	150
>300		40

Расчеты выполнены для 24 периодов в диапазоне 1–16384 с. В центрах ячеек сетки получены массивы значений компонент ЭМ поля для двух поляризации и передаточных операторов – импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика. На рис. 5 представлены результаты моделирования кажущихся сопротивлений и амплитуд горизонтального МВ отклика (относительно п. BAVN на Воронежском массиве западнее Брянска, показанного звездочкой) для периода 2500 с.

Полученные модельные результаты отчетливо выделяют крупные тектонические структуры региона. В пределах массива зондирования SMOLENSK они объясняют доминирующую приповерхностную природу аномалий кажущегося сопротивления в центре Оршанской впадины, но указывают на значительную глубинную составляющую севернее – вдоль Крестцовского влакогена. Этот тренд еще более нагляден в данных амплитуд горизонтального МВ отклика – модельные аномалии максимальны в Оршанской впадине, а наблюдаемые – систематически возрастают в северном направлении (Варенцов и др., 2021).

Заключение

Анализ представленных результатов моделирования будет продолжен в сопоставлении с наблюдаемыми данными.

Новая карта приповерхностной суммарной продольной проводимости может быть использована для планирования и проведения новых MT/MВ зондирований в области исследований и для построения стартовых моделей в ходе 3D инверсии площадных данных.

Благодарности

Исследования выполнялись в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН №0144-2019-0021 и были поддержаны грантом РФФИ №18-05-00733. Авторы благодарны участникам Рабочих групп KIROVOGRAD и SMOLENSK за вклады в создание региональных баз данных приповерхностной продольной проводимости и полезные обсуждения.

Литература

- Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. № 2. С. 32–38.
- Астапенко В.Н. Земная кора и мантия территории Беларуси по MT данным. Минск: Экономпресс, 2012. 208 с.
- Астапенко В.Н., Дубаневич М.А. Базисная 3D геоэлектрическая модель литосферы Беларуси // Литасфера. 2017. Т. 2(47). С. 80–92.
- Байсарович М.М., Трегубенко В.И., Насад А.Г. Геоэлектричні неоднорідності літосфери України // Геолог. журн. 1998. № 1–2. С. 13.
- Варенцов Ив.М., Иванов П.В., Ионичева А.П. и др. Массив MT зондирований SMOLENSK: изучение глубинной структуры области тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы // Геофизика. 2021. № 1. С. 46–56.
- Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Синхронные MT и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофиз. журн. 2012. Т. 34(4). С. 90–107.
- Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М. и др. Барятинская коровая аномалия электропроводности по результатам площадных MT исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 31–43.
- Логвинов И.М. Карта суммарной продольной проводимости осадочного чехла Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса // Доповіді НАНУ. 2015а. № 6. С. 107–113.
- Логвинов И.М. Карта суммарной продольной проводимости осадочного чехла Центральной Украины // Доповіді НАНУ. 2015б. № 11. С. 66–74.
- Шейнман А.Л. (ред.). Карта суммарной продольной проводимости осадочного чехла Европейской части России и сопредельных территорий. Масштаб 1:2 500 000. М.: ВНИИГеофизика, 2008.
- Шейнман А.Л., Нарский Н.В. Карта суммарной электропроводности осадочного чехла территории России // ЭМ зондирования Земли: Материалы IV Всерос. школы-семинара по ЭМ зондированиям. / г. Москва, (1–4 сентября), М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 45–46.
- Fainberg E.B., Andrieux P., Astapenko V.N. et al. Deep EM soundings in Belarus: Europrobe crustal soundings // Izv., Phys. Solid Earth. 1998. V. 34(6). P. 486–495.
- Fainberg E.B., Singer B.Sh. The influence of surface inhomogeneities on deep electromagnetic sounding of the Earth // Geophys. J. R. Astron. Soc. 1987. V. 90. P. 61–73.
- Rokityansky I.I., Ingerov A.I., Tregubenko V.I. Forty years of MTS studies in Ukraine // Earth Planet. Space. 1999. V. 51. P. 1127–1133.

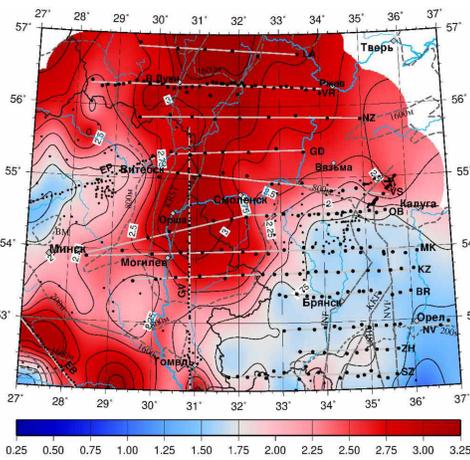


Рис. 1. Распределение приповерхностной продольной проводимости S (См, lg-масштаб) по асимптотическим оценкам для эффективного импеданса в пунктах зондирования проектов KIROVOGRAD+SMOLENSK и предшествующих исследований.

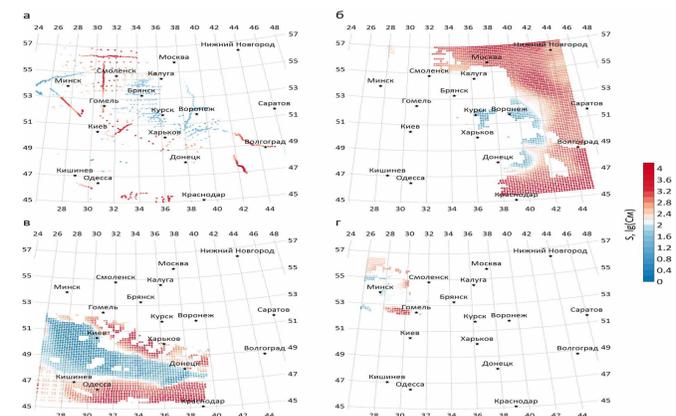


Рис. 2. Данные, использованные при построении сводной карты S для Воронежского массива и сопредельных территорий: а – точки асимптотических оценок S для массива KIROVOGRAD+SMOLENSK и предшествующих зондирований; далее – элементы карт S территорий: б – России (Шейнман, 2008; Шейнман, Нарский, 2009); в – Украины (Байсарович и др., 1998; Rokityansky et al., 1999; Логвинов, 2015а,б); г – Белоруссии (Fainberg et al., 1998; Астапенко, 2012; Астапенко, Дубаневич, 2017).

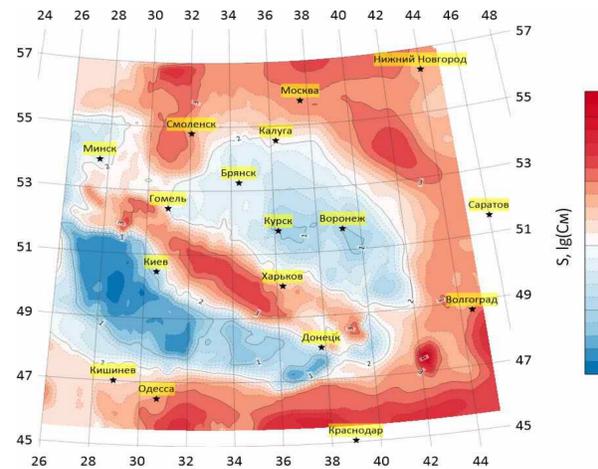


Рис. 3. Сводная карта S (См, lg-масштаб) для Воронежского массива и сопредельных территорий.

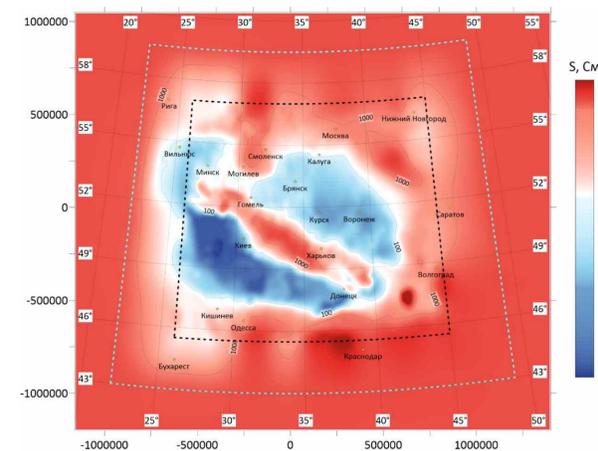


Рис. 4. Распределение приповерхностной продольной проводимости S (См, lg-масштаб), подготовленное для плёночного моделирования ЭМ откликов осадочных структур Воронежского массива и сопредельных территорий.

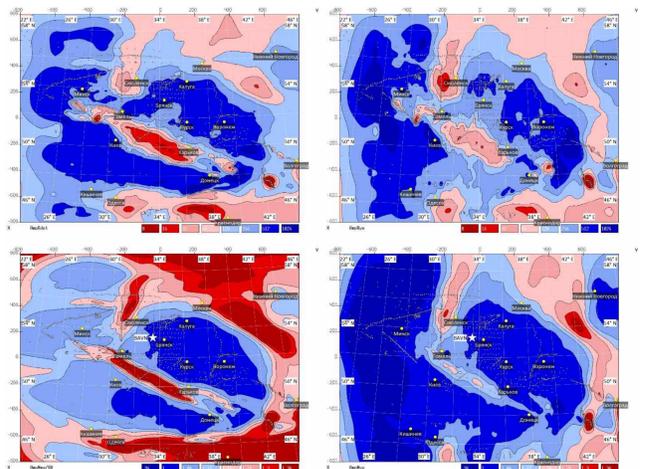


Рис. 5. Карты модельных данных для периода 2500 с: сверху – кажущиеся сопротивления (эффективные – слева, ух – справа); внизу – амплитуды горизонтальных МВ откликов (относительно п. BAVN – звездочка, максимальные – слева, уу – справа).