

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.011

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОДА ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА FENICS-2019

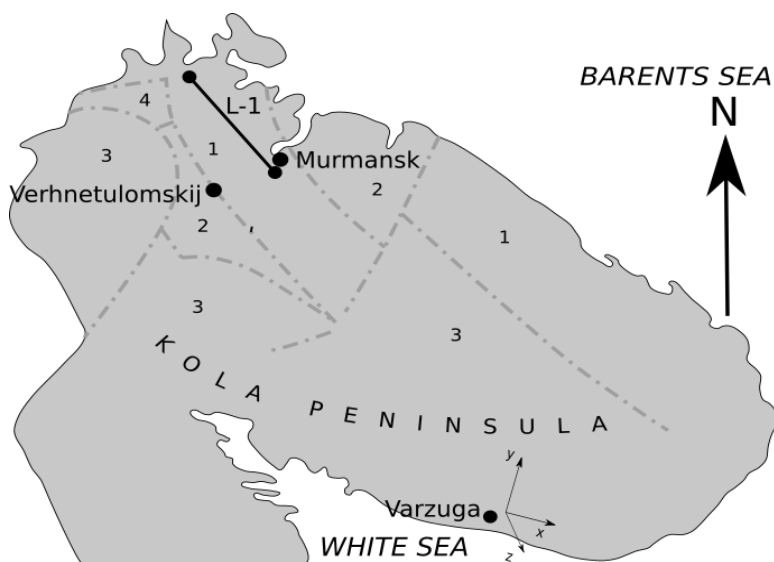
П.Е. Терещенко<sup>1</sup>, Р.Ю. Юрик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Мурманск, Россия

**Аннотация.** В ходе эксперимента FENICS-2019 по зондированию Земной коры полем контролируемого источника в КНЧ диапазоне (0.3-94 Гц) регистрировалось пять компонент электромагнитного поля в средней зоне линейных антенн. По измеренным компонентам электрического и магнитного поля были рассчитаны приведенные поверхностные импедансы, используемые в методиках электромагнитного зондирования литосферы. Было показано, что частотные изменения импеданса в основном объясняется простой двухслойной моделью Земной коры. Для более детального исследования Земной коры необходимо использовать не только амплитуды полей, но и их поляризационные характеристики. При этом необходимо учитывать вклад ионосферы на распространение поля.

**Введение.** Электромагнитные методы наряду с сейсмическими играют значительную роль в исследовании литосферы. Применение наземных контролируемых источников электромагнитных полей КНЧ (3–30 Гц) и СНЧ (30–300 Гц) дает возможность зондировать Земную кору от нескольких десятков метров до десятков километров вглубь. При этом современные технологии, как в области генерации, так и в области приема, делают возможным разнесение передатчик и приемников на расстояниях в сотни километров на Земной поверхности. Поэтому исследование особенностей возбуждения и распространения волн КНЧ и более низкого диапазона важно не только в ближней зоне излучателя, но и в средней (до десяти высот волновода Земля-ионосфера) зоне, где ионосфера оказывает существенное влияние на распространение электромагнитного поля.



**Рисунок 1.** Схема эксперимента. Ориентировочная проводимость Земной коры. 1 –  $10^{-4}$  См/м, 2 –  $6 \cdot 10^{-5}$  См/м, 3 –  $10^{-3}$  См/м, 4 –  $10^{-2}$  См/м.

В данной работе, на основе проведенных наблюдений в ходе эксперимента по зондированию литосферы FENICS-2019, производится расчет поверхностного импеданса. Полученные значения сравниваются с моделью распространения плоской электромагнитной волны в двухслойной среде, и делается вывод об их идентичности. Отмечается, что для более полного извлечения информации о Земной коре недостаточно использовать только амплитудные методы.

**Эксперимент.** В сентябре 2019 года проводился международный эксперимент FENICS-2019 по зондированию Земной коры электромагнитными полями активного источника (рис. 1). В качестве одной из антенн использовалась высоковольтная линия L-1 длиной около 110 км, расположенная на Мурманском блоке с эквивалентной проводимостью примерно  $10^{-4}$  См/м

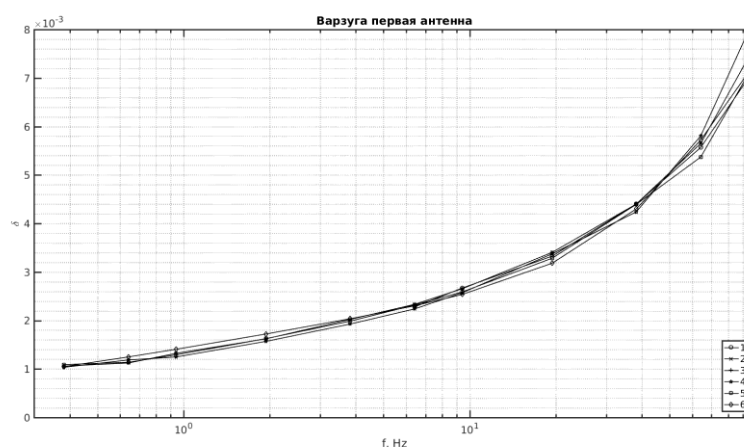
[Ковтун, 1989]. Излучение проводилось с 01:00 по 05:00 по местному времени на 14 частотах продолжительностью 10-15 минут в диапазоне 0.2 - 95 Гц. Сила тока в передающей антенне регистрировалась цифровой системой сбора данных.

Для проведения наблюдений за распространением поля в волновом канале Земля-ионосфера вблизи п. Варзуга был установлен пятикомпонентный магнитометр конструкции ПГИ [Lebed et al., 2012]. Расстояние от точки приема до концов антенны составило 314 и 370 км. Для измерения магнитных компонент использовались три индукционных датчика: два ортогональных горизонтальных и один вертикальный. Горизонтальные датчики ориентировались по показаниям магнитного компаса в направлениях запад-восток ( $H_x$ ) и север-юг ( $H_y$ ). Магнитное склонение в районе наблюдений восточное,  $16^\circ$ . Электрическое поле измерялось ортогональными электрическими линиями длиной  $l \sim 80$  метров каждая с заземлением в центре и на концах. Для получения значений напряженности электрического поля полученные потенциалы  $U_x$  и  $U_y$  нормировались на удвоенную длину антенн  $E_{x,y} = U_{x,y} / 2l$ . Электрические линии ориентировались аналогично индукционным датчикам. Отметим, что угол между субширотными составляющими регистрируемых полей и передающей антенной незначителен. Поля регистрировались в течение пяти дней, первым двум из которых по данным обсерватории ПГИ Ловозеро (<http://pgia.ru:81/PGI%5FData/2019/III/Kin/>) соответствовала спокойная геомагнитная обстановка ( $k_i$  индексы меньше трех), трем последним — возмущенная ( $k_i=4-6$ ).

Для контроля качества и напряженности излучаемого электромагнитного поля использовался пятикомпонентный магнитометр, стационарно установленный в обсерватории ПГИ Верхнетуломский, находящейся в ближней зоне излучающей антенны.

По окончании эксперимента была проведена спектральная обработка полученных данных, как по полям в точке приема и контрольной точке, так и по току в передающей антенне, по методу Уэлча [Марпл, 1990]. В результате была выполнена нормировка амплитуды магнитного поля на силу тока в антенне.

**Результаты эксперимента и их теоретическая интерпретация.** Горизонтальные компоненты магнитного поля были выделены из шумов во всем диапазоне 0.2 - 95 Гц, при этом соотношение сигнал/шум было не менее десяти для меньшей компоненты магнитного поля  $H_x$  и не менее пятидесяти для компоненты  $H_y$ , аналогичные результаты получены и для электрического поля, за исключением первого часа измерения компоненты  $E_y$ , когда возникли сильные внешние помехи неизвестного происхождения. Стабильность генерации поля в течение сеансов была подтверждена наблюдениями в ближней зоне в обсерватории Верхнетуломский. Вертикальная составляющая магнитного поля наблюдалась, но была много меньше горизонтальных, сравнима с уровнем шума. Таким образом, принимаемое поле является горизонтально поляризованным. В силу расположения антенны и точки приема компоненты  $H_y$  и  $E_x$  были в пять-семь раз больше соответствующей пары  $H_x$ ,  $E_y$ . По полученным значениям больших компонент полей для диапазона 0.3 - 95 Гц были определены модули приведенных поверхностных импедансов  $\delta = |(E_x)/(H_y)|/Z_0$ , где  $Z_0 = 120\pi$  (Ом) — характеристический импеданс [Макаров и др., 1991]. Использование больших компонент поля позволило уменьшить разброс данных из-за естественных и техногенных шумов. Результаты приведены на рис. 2, (кривые 1-5). Видно, что геомагнитная обстановка мало влияет на амплитудно-частотную зависимость измеренного импеданса.



**Рисунок 2.** Приведенные поверхностные импедансы. 1 - 5 экспериментально полученные, 6 — модельный расчет  $\delta_m$ .

Для интерпретации полученных результатов воспользуемся предположением о применимости теории, связанной с распространением плоской волны в слоистых средах. В работе [Макаров и др., 1991] приведен анализ приведенных поверхностных импедансов плоских структур, показано, что для образующих земную структуру сред в широком диапазоне частот импедансы практически не зависят от угла падения волны, оказываются одинаковыми для обеих поляризаций и для двухслойной среды задаются приближенными выражениями

$$\delta_m = \left( \frac{1 - R_{1,2} \exp\left(2ik_0 \sqrt{\varepsilon'_m} d\right)}{1 + R_{1,2} \exp\left(2ik_0 \sqrt{\varepsilon'_m} d\right)} \right),$$

$$R_{1,2} = (\delta_{01} - \delta_{02}) / (\delta_{01} + \delta_{02}), \quad \delta_{0k} = 1 / \sqrt{\varepsilon'_{mk}}, \quad \varepsilon'_{mk} = \varepsilon_{mk} + i\sigma_k / (2\pi f \varepsilon_0), \quad \varepsilon_{mk} = \varepsilon_k / \varepsilon_0, \quad k = 1, 2,$$

где  $\sigma_1, \varepsilon_1$  - проводимость и диэлектрическая проводимость верхнего слоя,  $\sigma_2, \varepsilon_2$  - нижнего,  $\varepsilon_0$  диэлектрическая постоянная,  $f$  частота падающего поля,  $d$  - толщина верхнего слоя. По приведенным формулам был произведен расчет поверхностного импеданса с различными параметрами среды. Оптимальными оказались результаты для следующих параметров подстилающей поверхности:  $\varepsilon_{m1} = \varepsilon_{m2} = 20$ ,  $\sigma_1 = 10^{-4}$  См/м,  $\sigma_2 = 10^{-5}$  См/м,  $d = 10$  км (Рис. 3, кривая 6). Таким образом, получено хорошее совпадение экспериментальных и модельных данных во всем диапазоне использованных для зондирования частот.

Сравнивая параметры использованной модели с моделью электропроводности земной коры Фенноскандинавского щита и его обрамления из работы [Zhamaletdinov, 2011], можно сделать следующий вывод - используемые частоты не показывают неоднородности слоя литосферы глубже десяти километров. Что касается верхнего слоя, то для разрешения изменения его проводимости с глубиной необходимо использовать более высокие частоты, чем были при проведении эксперимента.

По полученной амплитудно-частотной зависимости поверхностного импеданса можно вычислить эффективную проводимость однородного полупространства исходя из связи импеданса и относительной диэлектрической проницаемости [Макаров и др., 1991]

$$\delta_0 = 1 / \sqrt{\varepsilon'_m}.$$

Отсюда получаем

$$\sigma_{ef} = 2\pi f \varepsilon_0 (\delta_0^{-2} - \varepsilon_m) / i.$$

Расчет эффективной проводимости представлен на Рис. 3. Низкая эффективная проводимость на низких частотах связана с проникновением поля на большие глубины, где находятся породы с низкой проводимостью, что характерно для юго-востока Кольского полуострова [Zhamaletdinov, 2011].

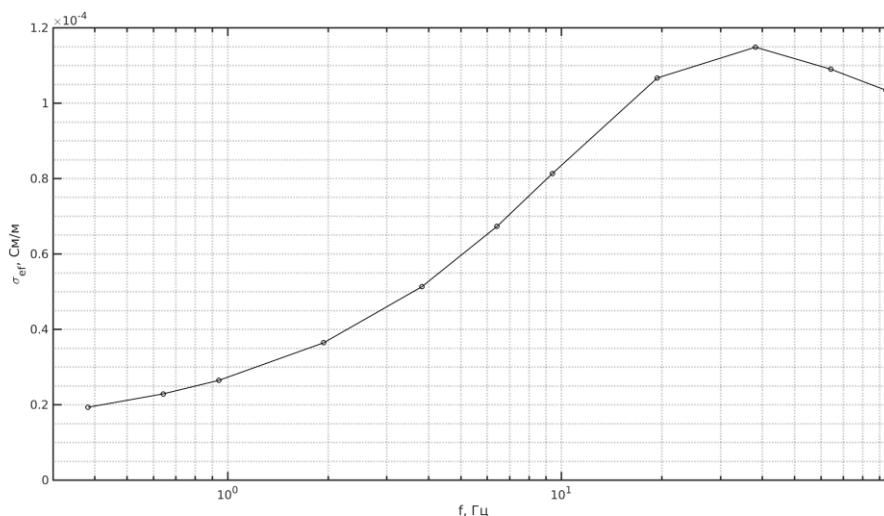


Рисунок 3. Частотная зависимость эффективной проводимости  $\sigma_{ef}$ .

Сходные результаты были получены для амплитудных измерений в ближней зоне (обсерватория ПГИ Ловозеро) в ходе эксперимента FENICS-2014 [Tereshchenko et al., 2018; Tereshchenko et al., 2019], где экспериментальные данные объяснялись моделями распространения электромагнитного поля в одно и двухслойной литосфере с учетом влияния ионосферы. Проведенные вычисления показали, что примером подходящей для этого эксперимента модели является двухслойная среда с верхним слоем с проводимостью  $6 \cdot 10^{-5}$  S/m и толщиной  $d = 20$  km, лежащем на более проводящем основании с проводимостью  $10^{-2}$  S/m. Эта модель не противоречит имеющимся геологическим представлениям о строении Земной коры в центральной части Кольского полуострова [Ковтун, 1989], для которого, в отличие от юго-востока, рассмотренного выше, характерно наличие толстого слоя пород с малой проводимостью.

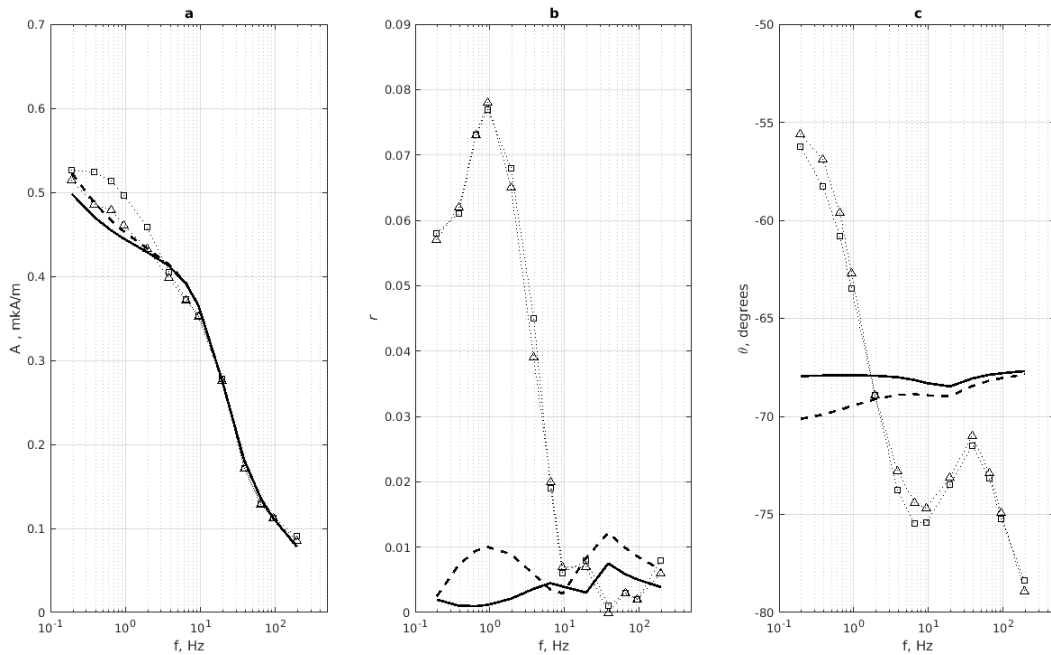
Но если от амплитудных наблюдений перейти к поляризационным характеристикам поля [Tereshchenko et al., 2019]

$$A = \sqrt{\left(I_p + \sqrt{Q^2 + U^2}\right)/2}, B = \sqrt{\left(I_p - \sqrt{Q^2 + U^2}\right)/2}, \quad (1)$$

$$r = B/A, \quad (2)$$

$$\theta = \arg(Q + iU)/2, \quad (3)$$

где  $I = |H_x|^2 + |H_y|^2$ ,  $Q = |H_x|^2 - |H_y|^2$ ,  $U = 2\text{Re}(H_x H_y)$ ,  $V = -2\text{Im}(H_x H_y)$ ,  $I_p^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ , то двухслойная модель Земной коры хорошо согласуется с экспериментальными данными для большой полуоси эллипса поляризации напряженности поля  $A$ , задаваемой выражением (1) (рис. 4а). Для угла между главной осью эллипса и осью абсцисс –  $\theta$  (формула (3)) и коэффициента эллиптичности  $r$  (формула (2)) теоретические расчеты не совпадают с экспериментальными данными, что позволяет сказать о влиянии на электромагнитное поле более тонкой структуры литосферы.



**Рисунок 4.** Теоретические кривые поляризационных параметров, рассчитанные при двухслойной модели подстилающей среды, в сопоставлении с экспериментальными данными. а — большая полуось эллипса поляризации, б — коэффициент эллиптичности, с — наклон эллипса поляризации. Сплошные кривые - проводимость ионосферы  $10^{-2}$  S/m, пунктирные -  $10^{-4}$  S/m.

## Выводы

Проведенный эксперимент показал эффективность зондирования литосферы с активным источником. Показано, что в диапазоне 0.3 - 95 Гц хорошим приближением для определения проводимости в районе п. Варзуга является двухслойная модель с проводимостью слоев  $\sigma_1 = 10^{-4}$  См/м,  $\sigma_2 = 10^{-5}$  См/м. Для более детального изучения структуры земной коры необходимо расширение частотного диапазона, по сравнению с используемым в эксперименте, как в сторону верхних частот для изучения верхнего слоя, так и низких - для расширения глубинного зондирования Земли. Для выделения более тонких структур литосферы необходимо привлекать поляризационные характеристики электромагнитного поля, с учетом воздействия ионосферы.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №. 19-05-00823 и 18-05-00528). Автор выражает благодарность А.А. Жамалетдинову за проведенные эксперименты FENICS-2014 и FENICS-2019.

## Список литературы

- Ковтун А.А., Стрoение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурического зондирования. Л.: Из-во ЛГУ, 1989.
- Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т., Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991, 195 с.
- Марпл-мл. С.Л., Цифровой спектральный анализ и его приложения. М: Мир, 1990, 584 с.
- Lebed O.M., Pil'gaev S.V., Fedorenko Y.V., A firmware system for phase measurements in extremely low and ultralow frequency ranges. *Instrum. Exp. Tech.*, 2012, V. 55, pp. 351–356. <https://doi.org/10.1134/S0020441212020224>
- Tereshchenko E.D., Sidorenko A.E., Grigor'ev V.F., Tereshchenko P.E., Zhamaletdinov A.A., Effect of ionosphere on the excitation of electromagnetic field at extremely low and lower frequencies in the near-field zone. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2018, T. 63, № 6, C. 881-887. DOI:10.1134/S1063784218060233
- Tereshchenko E.D., Sidorenko A.E., Tereshchenko P.E., Effect of Ionosphere and Inhomogeneity of the Earth Structure on the Polarization Characteristics of Magnetic Field at Frequencies of 0.2-200 Hz in the Near-Field Zone of a Horizontal Grounded Antenna. *Technical Physics*, 2019, V. 64, No. 7, pp. 1029–1035. DOI:10.1134/S1063784219070259
- Zhamaletdinov A.A., The New Data on the Structure of the Continental Crust Based on the Results of Electromagnetic Sounding with the Use of Powerful Controlled Sources. ISSN 1028\_334X, *Doklady Earth Sciences*, 2011, V. 438, Part 2, pp. 798–802.