

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.016

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН КНЧ-ДИАПАЗОНА ОТ КОНТРОЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА В ВЫСОКОШИРОТНЫХ РАЙОНАХ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВОВ РЫБАЧИЙ И СРЕДНИЙ

В.А. Любчик

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия; e-mail: lubchich@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты трехмерного моделирования процесса распространения в земной коре электромагнитных волн крайне низкочастотного (КНЧ) диапазона, излученных контролируемым источником, в районе полуостровов Рыбачий и Средний. Модельные значения компонент электромагнитного поля соответствуют экспериментально измеренным значениям, полученным в рамках проекта FENICS-2019 по электромагнитному зондированию (ЭМЗ) земной коры Балтийского щита с использованием промышленных линий электропередач (ЛЭП). По результатам моделирования было показано, что существенное влияние на распространение электромагнитных волн КНЧ-диапазона в данном районе оказывает наличие зон тектонических разломов с повышенной электропроводностью, разделяющих Балтийский щит и Западно-Арктическую платформу, и присутствие морской воды, окружающей полуострова Средний и Рыбачий с трех сторон. Такая конфигурация электропроводящих объектов приводит к образованию макромасштабных замкнутых электрических контуров, в которых генерируются вторичные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника.

Ключевые слова: электромагнитное зондирование, тектонический разлом, трехмерное моделирование.

Описание эксперимента. В 2019 году был проведен эксперимент FENICS-2019 по электромагнитному зондированию земной коры Балтийского щита с помощью промышленных ЛЭП. В рамках этого проекта группа сотрудников Полярного геофизического института (ПГИ) провела измерения в пределах полуостровов Рыбачий и Средний. Основной задачей исследования было изучение влияния мощного низкоомного осадочного чехла и крупномасштабных тектонических нарушений на закономерности распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона в земной коре. Полуострова Рыбачий и Средний расположены в зоне перехода от пород кристаллического Балтийского щита к осадочным породам Западно-Арктической платформы. Данная зона перехода характеризуется наличием крупных тектонических разломов. Так полуостров Средний отделен от Балтийского щита сбросом Карпинского, а между полуостровами Рыбачий и Средний проходит тектоническая система сдвига-надвигов Троллефьорд–Рыбачий–Кильдин (ТРК).

В качестве одной из антенн контролируемого источника электромагнитных волн использовалась промышленная ЛЭП – Л-403 длиной 130 км. В линии генерировались электромагнитные поля в диапазоне частот 0.194 - 94.22 Гц. В качестве контролируемого источника использовался экспериментальный образец мощного генератора, разработанный в ПГИ [1]. Измерения электромагнитных полей производилось в двух пунктах, расположенных в южной части полуострова Рыбачий и на полуострове Средний в окрестности буровой скважины «Пограничная-1». С помощью индукционного магнитометра с цифровой системой сбора и обработки информации, основанной на шестиканальном 22-битном АЦП с частотой дискретизации 1024 Гц [2], измерялись горизонтальные магнитные и электрические компоненты поля. Длина приемных электрических антенн составляла 100 м.

Экспериментально измеренные значения отношения амплитуды полного горизонтального электрического поля к полному горизонтальному магнитному полю были пересчитаны через кривые нормального поля в значения кажущегося сопротивления среды ρ_k . Экспериментальная кривая зависимости кажущегося сопротивления среды ρ_k от частоты электромагнитного поля f для точки измерения на полуострове Рыбачий соответствует трехслойной среде с наличием проводящего слоя, расположенного между высокоомным кристаллическим фундаментом и слоем с относительно повышенным удельным сопротивлением в верхней части разреза. В то же время, график кажущегося сопротивления ρ_k для точки измерения электромагнитного

поля на полуострове Средний более соответствует двухслойной среде, где верхний слой с повышенной электропроводностью расположен над плохо проводящим фундаментом.

Описание модели. В соответствии с подобным строением литосферы полуостровов Рыбачий и Средний была выбрана модель осадочного чехла для данной части Западно-Арктической платформы при проведении трехмерного моделирования процесса распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона в исследуемом районе. Модель соответствовала четырехслойной среде с удельным электрическим сопротивлением кристаллического фундамента $10000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. По результатам интерпретации данных ЭМЗ с контролируемым источником [3] для осадочного чехла севернее системы тектонических разломов ТРК была выбрана следующая модель: верхний слой, соответствующий породам собственно полуострова Рыбачий, мощностью 200 м с сопротивлением $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, относительно высокоомный слой мощностью 1000 м с сопротивлением $5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, слой с относительно пониженным сопротивлением $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ мощностью 5000 м . Для области между сбросом Карпинского и системой разломов ТРК модель земной коры состояла также из верхнего слоя мощностью 200 м с сопротивлением $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, соответствующего породам собственно полуострова Средний, второго слоя, относящегося к осадочным породам, мощностью 1000 м с сопротивлением $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и третьего слоя мощностью 5000 м с сопротивлением $5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, относящегося к верхней части кристаллического фундамента. Эта модель базируется также на результатах бурения скважины «Пограничная-1» [4]. Удельная электропроводность моря в модели была принята 2 См/м , глубина слоя морской воды – 200 м . Тектонические зоны системы ТРК и сброса Карпинского, разделяющие Балтийский щит, полуострова Рыбачий и Средний, моделировались узкими линейными элементами шириной 1000 м с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, глубина погружения разломов была принята 10000 м . На рис. 1 представлен горизонтальный план построенной модели, соответствующий земной поверхности.

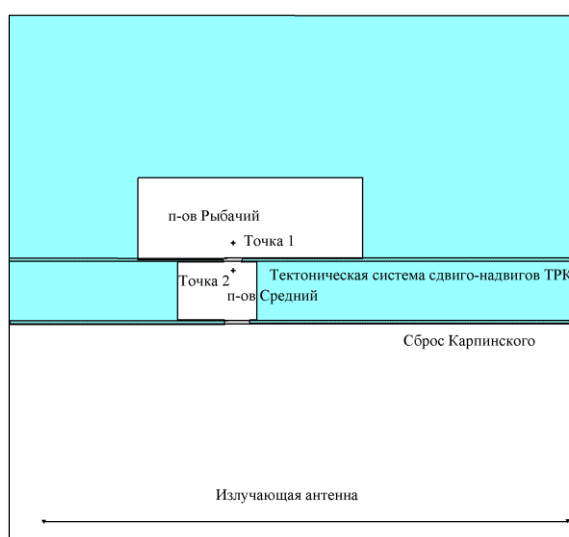


Рисунок 1. Горизонтальный план модели района полуостровов Рыбачий и Средний. Крестами обозначены точки, для которых рассчитывались модельные значения горизонтальных компонент электромагнитного поля. Узкие заштрихованные области соответствуют положению в модели зон тектонических разломов.

При моделировании использовался метод сеточной аппроксимации уравнений для векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля [5]. В этом методе электрические и магнитные поля представлены в виде суммы нормального (первичного) поля E_0, H_0 , обусловленного контролируемым источником, и аномального поля E, H , связанного с избыточной электропроводностью $\Delta\sigma$ в некоторых ограниченных областях среды. Для аномального электрического поля вводятся векторный A и скалярный φ потенциалы:

$$\vec{E} = \vec{A} + \nabla\varphi.$$

Значения аномального магнитного поля H определяются векторным потенциалом A :

$$\vec{H} = (i\omega\mu)^{-1} \nabla \times \vec{A}.$$

Для однозначного определения векторного потенциала используется калибровка Кулона. Тогда уравнение Гельмгольца для аномального электрического поля можно преобразовать в систему дифференциальных уравнений для векторного A и скалярного φ потенциалов:

$$\nabla^2 \bar{A} + i\omega\mu\sigma(\bar{A} + \nabla\varphi) = -S_E$$

$$\nabla \cdot (\sigma\bar{A}) + \nabla \cdot (\sigma\nabla\varphi) = -(i\omega\mu)^{-1} \nabla \cdot S_E,$$

где

$$S_E = i\omega\mu(\sigma - \sigma_0)\bar{E}_0,$$

$\sigma - \sigma_0$ – избыточная электропроводность в аномальных зонах среды, μ – магнитная проницаемость среды, ω – круговая частота электромагнитного поля.

Данная система дифференциальных уравнений удобна тем, что после сеточной аппроксимации мы получим систему линейных уравнений с ленточной матрицей, которая будет обладать свойством сильной диагональной доминантности, что значительно упрощает решение системы. Система линейных уравнений с диагонально доминантной матрицей решалась с помощью итерационного метода Зейделя.

Для сеточной аппроксимации системы дифференциальных уравнений была выбрана трехмерная прямоугольная сетка с линейными размерами ячеек $2000 \times 2000 \times 500$ м (за исключением верхнего слоя, где глубина моря была принята 200 м, и зон тектонических нарушений, где размер ячеек составлял $2000 \times 500 \times 500$ м). Моделирование проводилось для частот генерируемого электромагнитного поля $f = 0.642, 6.422, 64.22$ Гц. Результаты проведенного моделирования для точек измерения электромагнитного поля на полуостровах Средний и Рыбачий представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, модельные значения амплитуд компонент электромагнитного поля, в целом, совпадают с экспериментально измеренными величинами.

Таблица 1. Модельные и экспериментально измеренные значения амплитуд компонент электромагнитного поля в точках наблюдения на полуостровах Рыбачий и Средний.

	Результаты моделирования для полуострова Рыбачий (точка 1)			Результаты моделирования для полуострова Средний (точка 2)		
	f = 0.642, Гц	f = 6.422, Гц	f = 64.22, Гц	f = 0.642, Гц	f = 6.422, Гц	f = 64.22, Гц
H_x экспериментальные значения, А/м	6.21E-07± 1.84E-07	7.35E-08± 1.3E-08	1.27E-08± 2.11E-09	3.35E-07± 1.64E-07	1.05E-07± 5.91E-08	9.48E-09± 2.72E-09
H_{mx} модельные значения, А/м	5.12E-07	1.42E-07	2.65E-08	4.22E-07	1.91E-07	3.32E-08
H_y экспериментальные значения, А/м	1.06E-06± 6.1E-07	3.74E-07± 2.64E-08	1.13E-07± 6.29E-09	1.54E-06± 1.07E-07	5.45E-07± 1.02E-07	1.54E-07± 2.61E-09
H_{my} модельные значения, А/м	2.34E-06	8.62E-07	1.77E-07	3.18E-06	1.17E-06	2.30E-07
E_x экспериментальные значения, В/м	6.07E-09± 1.95E-11	1.09E-08± 6.86E-11	1.31E-08± 7.36E-10	6.79E-08± 2.46E-10	2.08E-08± 1.65E-10	8.14E-09± 1.32E-10
E_{mx} модельные значения, В/м	2.91E-08	1.26E-08	6.16E-09	3.41E-08	1.71E-08	8.01E-09
E_y экспериментальные значения, В/м	7.23E-08± 3.28E-10	1.10E-08± 6.53E-11	9.85E-10± 3.36E-10	4.36E-08± 1.6E-10	1.25E-08± 1.03E-10	1.89E-09± 1.37E-10
E_{my} модельные значения, В/м	1.20E-08	1.68E-09	9.23E-10	2.15E-08	2.77E-09	1.15E-09

Результаты моделирования. Наблюдаемые некоторые расхождения между модельными значениями и экспериментально измеренными величинами можно объяснить следующим образом. Присутствие морской воды с высокой электропроводностью, окружающей полуострова Средний и Рыбачий с трех сторон, а также наличие высокопроводящих зон тектонических разломов приводит к образованию замкнутых контуров, в которых генерируются вторичные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника. В таблице 2, для примера, приведены модельные значения компонент нормального поля, обусловленного контролируемым источником, и аномального поля, связанного с избыточной электропроводностью в аномальных зонах, в точке наблюдений на полуострове Средний для частоты электромагнитного поля $f = 64.22$ Гц.

Таблица 2. Модельные значения компонент нормального и аномального электромагнитных полей в точке наблюдения на полуострове Средний для частоты поля $f = 64.22$ Гц.

нормальное поле E_{0x} , В/м	-8.52E-07-i7.89E-10	аномальное поле E_{ax} , В/м	8.46E-07-i4.23E-09
нормальное поле E_{0y} , В/м	-1.20E-07-i8.32E-11	аномальное поле E_{ay} , В/м	1.19E-07-i6.45E-10
нормальное поле H_{0x} , А/м	-3.79E-08-i3.74E-08	аномальное поле H_{ax} , А/м	2.04E-08+i9.20E-09
нормальное поле H_{0y} , А/м	2.71E-07+i2.64E-07	аномальное поле H_{ay} , А/м	-1.47E-07-i7.02E-08

Подобный эффект образования макромасштабных замкнутых электрических контуров при проведении электромагнитных зондирований на Кольском полуострове с использованием мощных контролируемых источников рассматривался в работе [6]. Итоговые модельные значения получаются как разность первичного и вторичных электромагнитных полей и по амплитуде модельные значения на один – два порядка меньше, чем амплитуды первичных и вторичных полей. В такой ситуации сложно добиться идеального совпадения модельных значений с экспериментально измеренными величинами при использовании достаточно грубой модели земной коры в районах полуостровов Рыбачий и Средний.

Вывод. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие мощных зон тектонических разломов, обладающих повышенной электропроводностью, и присутствие морской воды оказывают существенное влияние на результаты ЭМЗ с контролируемым источником в районе полуостровов Средний и Рыбачий, расположенных в зоне перехода от пород кристаллического Балтийского щита к осадочным породам Западно-Арктической платформы. Возникновение замкнутых макромасштабных контуров, в которых генерируются вторичные аномальные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника, приводит к понижению амплитуд измеренных компонент электромагнитного поля.

Список литературы

1. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44. № 4. С. 43–66.
2. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 73–75.
3. Любич В.А., Шипилов Э.В., Юрик Р.Ю. Первые результаты экспериментального электромагнитного зондирования земной коры на полуостровах Средний и Рыбачий // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. №17. С.334–338.
4. Куликов Н.В., Коновалов В.А., Медведев С.А., Чигвинцев В.Д. Новые данные о геологическом строении севера Кольского полуострова // Разведка и охрана недр. 2007. № 4. С. 22–25.
5. Aruliah D.A., Ascher U.M., Haber E., Oldenburg D. A method for the forward modelling of 3D electromagnetic quasi-static problems // Mathematical Models in Applied Sciences (M3AS). 2001. V. 11. P. 1–21.
6. Велихов Е.П., Григорьев В.Ф., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., Орехова Д.А., Попова И.В., Терещенко Е.Д., Щорс Ю.Г. Электромагнитное зондирование Кольского полуострова мощным крайне низкочастотным источником // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. №3. С. 390–395.